

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK DESTEKLİ
BİR KLİMA SİSTEMİNİN FARKLI SOĞUTUCU
AKIŞKAN KULLANIMI ALTINDA İLERİ
TERMODİNAMİK ANALİZLERİ**

Hüseyin Günhan ÖZCAN

Danışmanlar : Prof. Dr. Hüseyin GÜNERHAN
Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Makina Mühendisliği Doktora Programı

İzmir
2020

Hüseyin Günhan ÖZCAN tarafından doktora tezi olarak sunulan “Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Destekli Bir Klima Sisteminin Farklı Soğutucu Akışkan Kullanımı Altında İleri Termodinamik Analizleri” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 04.11.2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Hüseyin GÜNERHAN

Raportör Üye : Doç. Dr. Nurdan YILDIRIM

Üye : Prof. Dr. Ali GÜNGÖR

Üye : Prof. Dr. Aytunç EREK

Üye : Prof. Dr. Mustafa Tolga BALTA

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Destekli Bir Klima Sisteminin Farklı Soğutucu Akışkan Kullanımı Altında İleri Termodinamik Analizleri” 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.

04/11/2020

Hüseyin Günhan ÖZCAN

ÖZET**ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK DESTEKLİ BİR KLİMA
SİSTEMİNİN FARKLI SOĞUTUCU AKIŞKAN KULLANIMI
ALTINDA İLERİ TERMODİNAMİK ANALİZLERİ**

ÖZCAN, Hüseyin Günhan

Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları: Prof. Dr. Hüseyin GÜNERHAN

Prof Dr. Arif HEPBAŞLI

Ekim 2020, 146 sayfa

Dünya genelinde enerji konusu sıcak gündem maddesi olarak yerini sürekli olarak korumaktadır ve ülkelerin gelişmişlik düzeyi uyguladıkları milli enerji politikaları ile ilişkilendirilmektedir. Bu denli öneme sahip enerji alanında kullanılan teknolojilerinin değerlendirilmesi ülke kazanımları açısından büyük öneme sahiptir. Bu tez çalışması kapsamında Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü binasının üçüncü katında bulunan 15,48 m²'lik bir odanın iklimlendirilmesi, şebeke bağlantılı, 2,55 kW_p FV (fotovoltaik) destekli, 9,6 kWh kapasiteye sahip 4 adet batarya kullanımı ile enerji depolama olanağına sahip bir klima (2,52 kW soğutma, 2,84 kW ısıtma) sisteminin tasarımı ve kurulumu ile gerçekleştirilmiştir. Sistemin devreye alınmasının ardından ise ileri termodinamik ve ekonomik analizler yazılım paket programlarına dayalı modelleme-benzetim çalışmaları ile dinamik olarak yapılmıştır. Bu sırada TRNSYS, PVSOL ve Pack Calculation Pro programları kullanılmıştır. Ayrıca, nümerik çalışmalar ile kurulan modeller gerçek zamanlı deneysel çalışmalar ile test edilmiştir.

İleri termodinamik ve ekonomik analizler yıllık enerji, yaşam boyu maliyet, yıllık geleneksel ekserji, geleneksel eksergo-ekonomi, yıllık ileri ekserji ve ileri eksergo-ekonomi yöntemlerini kapsamaktadır. Bu denli karmaşık bir yapının dinamik olarak modellenmesi-benzetimi ve yukarıda verilen analizlerle bütünleştirilmesinin daha önce yapılmadığı detaylı literatür çalışmaları ile belirlenmiştir. Bu sebeple, tez çalışması metodolojik bir özgünlüğe sahiptir. Ayrıca sistemin ileri termodinamik ve ekonomik performansı birçok parametrik çalışma ile incelenmiştir. Bu sırada farklı iklim bölgeleri (İzmir ve Berlin), çalışma koşulları

(sürekli ve ofis saatleri içerisinde) ve sistem bileşenleri içerisinde yer alan klimada farklı soğutucu akışkan kullanımı (R410A, R134a ve R22) ele alınmıştır.

Geleneksel ekserji analizleri ile elde edilen sonuçlar ilk önceliğin solar FV panel grubuna verilmesi gerektiği ortaya koymuştur. Bu bileşeni sırasıyla klima, batarya grubu ve evirici/düzenleyici takip etmiştir. Bu bileşenlere ait yıllık ortalama ekserji verimleri sırasıyla % 11,9, % 14,8, % 79,6 ve % 93,0 hesaplanmıştır. İleri ekserji analizleri sonuçları temel alındığında ise öncelik sırası klima, evirici/düzenleyici, batarya grubu ve solar FV panel grubu olarak belirlenmiştir. Bu bileşenlere ait ekserji yıkım akımları içerisindeki önlenebilir paylar sırasıyla % 53,8, % 41,1, % 28,5 ve % 8,9 olarak elde edilmiştir. Yaşam boyu maliyet analizi sonucunda sisteme ait net bugünkü değer -5.766,1€ bulunmuştur. Sistemin şu anki koşullar altında ekonomik olarak elverişsiz olduğu değerlendirilmiş olup sistemin ekonomik olarak elverişli hale gelebilmesi için iyileştirme önerileri sunulmuştur. Eksergo-ekonomik ve ileri eksergo-ekonomik faktörlere ait en düşük yıllık ortalama değerler ise sırasıyla 0,58 ve 0,64 olmak üzere klima bileşenine ait bulunmuştur. Bunun sonucunda, değiştirme işlemi sırasında yatırım önceliğinin bu bileşene verilmesi gerektiği görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Güneş enerjisi, fotovoltaiik, modelleme-benzetim, TRNSYS, enerji depolama, yaşam boyu maliyet analizi, ileri ekserji analizi, ileri eksergo-ekonomik analiz.

ABSTRACT**ADVANCED THERMODYNAMIC ANALYSIS OF A GRID
CONNECTED SOLAR PHOTOVOLTAIC POWERED AIR
CONDITIONING SYSTEM UTILIZING DIFFERENT
REFRIGERANTS**

ÖZCAN, Hüseyin Günhan

PhD in Mechanical Eng.

Supervisors: Prof. Dr. Hüseyin GÜNERHAN

Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI

October 2020, 146 pages

The subject of energy is constantly being maintained as a hot topic in a worldwide and the level of development of countries is related to national energy policies. Evaluation of the technologies used in the field of energy has a great importance in terms of country gains. Within the scope of this thesis study, a grid connected photovoltaic (PV)-2.55 kW_p powered air conditioner-2.52 kW in cooling and 2.84 kW in heating with a back up system including four batteries-9.60 kWh was designed and set up for a single room-15.48 m² located on the third floor of Mechanical Engineering Department, Ege University. Following the commissioning of the system, advanced thermodynamic and economic analyses were performed dynamically with modeling-simulation studies. In these studies, the software package programs such as Transient System Simulation Program (TRNSYS), PVSOL and Pack Calculation Pro were utilized. The developed numeric models were also tested by real-time experiments.

Advanced thermodynamic and economic analyses consisted of annual energy, life cycle cost, annual conventional exergy, conventional exergo-economic, annual advanced exergy, advanced exergo-economic methods. Since the dynamic modeling and simulation of such a complex structure and its integration with the above-given analyses were not carried out based on the detailed literature survey, the thesis study has a methodological originality. Meanwhile, various parametric studies were undertaken to evaluate the advanced thermodynamic and economic performances of the system. These considered different climatic zones (Izmir and Berlin), operating

conditions (non stop and during office hours) and the use of various refrigerants (R410A, R134a and R22) of the air conditioner included in the system components.

Conventional exergy analysis revealed that the priority should be given to the first solar PV panel group. This was followed in order by the air conditioner, the battery group and the inverter/regulator. The annual average exergy efficiency values of these components were calculated to be 11.9%, 14.8%, 79.6% and 93.0%, respectively. However, based on the main results of advanced exergy analysis, the order of the priority was determined to be the air conditioner, the inverter/regulator, the battery group and the solar PV panel group. The avoidable parts of exergy destruction rates for these components were obtained to be 53.8%, 41.1%, 28.5% and 8.9%, respectively. As a result of the lifecycle cost analysis, the net present value of the system was estimated to be -5,766.1€. The system was evaluated economically unfavorable under the current conditions, but suggestions for possible improvements were given to get the system economically favorable. The lowest annual average values of exergo-economic and advanced exergo-economic factors were also computed in the air conditioning component with 0.58 and 0.64, respectively. This concluded that the initial investment priority should be given to this component during the replacement process.

Keywords: Solar energy, photovoltaic, modeling-simulation, TRNSYS, energy storage, life cycle cost assessment, advanced exergy analysis, advanced exergoeconomic analysis.

ÖNSÖZ

Hayat her geçen gün birçok alanı değişikliğe uğratarak devam etmektedir. Farklı alanlarda meydana gelen bu değişimin daimî olma yeteneği ise sürdürülebilirlik kavramı ile açıklanmaktadır. Enerji, başta güç üretimi olmak üzere iklimlendirme ve ulaşım gibi birçok sektörde sürdürülebilirliği belirleyici unsur olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, ülkelere ait milli menfaatler, çevre, ekonomi ve insan sağlığı gibi konular enerji teknolojisi uygulamalarında sıklıkla kendisine yer bulmaktadır.

Enerjinin sürdürülebilirlik kavramı için teşkil ettiği öneme istinaden bu alanda kullanılan teknolojiler enerji üretimi, enerji tüketimi ve bunlar arasındaki etkileşimi içerecek şekilde disiplinler arası çalışmalarla planlanmalı ve sistemli bir şekilde uygulanmalıdır. Günümüzde, enerji üretimi tarafında temiz, yenilenebilir, çevre dostu, düşük karbon salımına sahip vb. enerji terimleri kullanılırken, enerji tüketimi kısmında ise iklimlendirme sistemleri, pasif enerji uygulamaları, yapı kalitesi, termal konfor, enerji verimliliği, vb. ifadeler yer almaktadır. İlaveten, enerji üretimi ve enerji tüketiminin dinamik olarak değişmesinden ötürü enerji depolama ve akıllı yönetim sistemleri öne çıkan kavramlardır. Tüm bu ifadeler disiplinler arası çok yönlü bir yaklaşım gerekliliğinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

Öte yandan, yukarıda değinilen teknolojilerin kullanılması sürdürülebilir bir enerji sistemi uygulaması için tek başına yeterli değildir. Teorik yaklaşımlar, deneysel çalışmalar ve günümüzde birçok alanda geliştirilen ve/veya geliştirilmekte olan modelleme-benzetim yöntemleri kullanılarak teknik bir değerlendirme yapılmalıdır. Bu değerlendirme sırasında ise termodinamik analizler ile ekonomik-kültürel-politik unsurlar topyekûn bir şekilde tartışılmalıdır. Bu sayede geleceğe dönük sürdürülebilir bir enerji sistemi tasarlanabilecek ve toplumsal fayda sağlanabilecektir.

Bu bilgiler ışığında tez fikri, sistem tasarımı ile analiz yöntemleri konularında meydana gelen güncel gelişmeleri temel olarak oluşturulmuştur. Öncelikle, yenilenebilir enerji türlerinin güç üretiminde kullanımının gün geçtikçe artması, özellikle güneş enerjisinin son yıllarda büyük paylara erişmesi ve dağıtık enerji kaynağı ile enerjinin yerinde tüketimi kavramının ön plana çıkması dolayısıyla enerji üretimi kısmında fotovoltaik panel teknolojisine yer verilmiştir. Diğer taraftan, iklimlendirme sistemlerinin binalara ait enerji tüketiminin yaklaşık yarısından sorumlu olmasına bağlı olarak ticari bir klima enerji tüketim kısmında yer almıştır. Ayrıca, enerji üretimi ve tüketimi kısımlarındaki karşılama oranlarının dinamik olarak değişmesinden ötürü enerji depolama seçeneği de batarya grubu kullanımı ile sistem tasarımına dâhil edilmiştir. Enerji sistemlerinin değerlendirilmesi kapsamında kullanılan analiz yöntemleri göz önünde bulundurulduğunda ise deneysel ve benzetim-modelleme çalışmaları bir arada kullanılarak tezin bilimsel kalitesinin artırılması amaçlanmıştır. Tezin özgünlüğünü ortaya çıkarma adına deneysel çalışmalar ile test edilerek geliştirilmiş sistem modeli ile ileri ekserji ve ekonomi analizleri bütünleştirilmiş ve bu sayede dinamik bir yaklaşım sergilenmiştir.

İZMİR

22/09/2020

Hüseyin Günhan ÖZCAN

İÇİNDEKİLERSayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1 Yenilebilir Enerji Görünümü	4
2.2 Güneş Enerjisi Sistemleri	10
2.3 Güneş Enerjisi Potansiyeli	12
3. DAHA ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR – LİTERATÜR ÖZETİ	15
4. SİSTEM TANITIMI	29
4.1 Sistem Tasarımı	29
4.2 Sistem Kurulumu ve Devreye Alma	36
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
6. MODELLEME VE BENZETİM ÇALIŞMALARI	46
6.1 PVSOL Paket Programı	46

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6.2 TRNSYS Paket Programı.....	49
6.2.1 Potansiyel modellerin incelenmesi.....	49
6.2.2 TRNSYS bileşen modellerin deneysel çalışmalar ile test edilmesi	53
6.3 Pack Calculation Pro Paket Programı	62
6.3.1 Isıtma ve soğutma çevriminin incelenmesi.....	62
6.3.2 Pack Calculation Pro bileşen modellerin deneysel çalışmalar ile test edil	64
7. TERMODİNAMİK ANALİZLER.....	66
7.1 Yıllık Enerji Analizleri.....	66
7.1.1 Tüm sistemin makro boyutta incelenmesi	66
7.1.2 Bileşen temelli inceleme	70
7.2 Yıllık Ekserji Analizleri	71
7.2.1 Yıllık geleneksel ekserji analizleri	72
7.2.2 Yıllık ileri ekserji analizleri	74
8. EKONOMİK ANALİZLER.....	77
8.1 Yaşam Boyu Maliyet Analizi.....	77
8.2 Eksergo-ekonomik Analizler	78
8.2.1 Geleneksel eksergo-ekonomik analizler	82

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

8.2.2 İleri eksergo-ekonomik analizler	82
9. BELİRSİZLİK ANALİZİ	85
10. HASSASİYET ANALİZİ.....	86
11. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	87
11.1 Yıllık Enerji Analizleri	87
11.1.1 İklim veri grubu	87
11.1.2 Tüm sisteme ait makro boyutta inceleme	89
11.1.3 Bileşen temelli inceleme.....	98
11.2 Yıllık Ekserji Analizleri.....	101
11.2.1 Geleneksel ekserji analizleri	101
11.2.2 İleri ekserji analizleri	104
11.2.3 Geleneksel ve ileri ekserji analizlerinin birlikte değerlendirilmesi	108
11.3 Ekonomik Analizler.....	110
11.3.1 Yaşam boyu maliyet analizi.....	110
11.3.2 Eksergo-ekonomik analizler	111
11.4 Hassasiyet Analizi	116
12. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	118

İÇİNDEKİLER (devam)Sayfa

KAYNAKLAR DİZİNİ 123

TEŞEKKÜR..... 143

ÖZGEÇMİŞ 144

TEZ ÇIKTILARI 145



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. 2017 yılına ait küresel ölçekli toplam enerji tüketimi (REN21, 2019)	5
2.2. 2006-2016 yılları arasında meydana gelen yenilenebilir enerji kullanımındaki değişim (REN21, 2019).....	6
2.3. Solar FV teknolojisi kapsamında kullanılan sistem bileşenleri (Shubbak, 2019)	11
2.4. CSP teknolojisi kapsamında kullanılan sistemler (Zhang et al., 2013)..	11
2.5. Küresel güneş enerjisi potansiyeli (GSA, 2019)	13
2.6. Ulusal güneş enerjisi potansiyeli atlası (YEGM, 2019).	14
4.1. Proje odası konumu ve yerleşim planı.....	29
4.2 GEDKS kurulumu	38
5.1. Deney sistemi	42
5.2. Deneysel çalışmalar kapsamında klimaya uygulanan işlemler	44
5.3. Klima tarafı ölçüm aletlerinin yerleşimi.....	45
6.1. PVSOL programı işlem adımlarına ait bazı görseller.	49
6.2. TRNSYS programı işlem adımlarına ait bazı görseller.....	52
6.3. Solar FV panel modellerin deneysel çalışma sonuçları ile testi.	54
6.4. Bina (proje odası) modellerinin deneysel çalışma sonuçları ile testi	56
6.5. Klima modellerinin deneysel çalışma sonuçları ile testi.	58

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.6. İki kademeli katalog verisi temelli model testi.	59
6.7. İklim veri grubu testi (deney ve TRNSYS)	60
6.8. GEDKS bileşenleri arasındaki güç akımı testi (deney ve TRNSYS). ...	62
6.9. Pack Calculation Pro programı işlem adımlarına ait bazı görseller.....	63
6.10. Soğutma çevrimine ait a) basınç-entalpi, b) sıcaklık-entropi grafikleri (deney ve Pack Calculation Pro).....	65
7.1. PVSOL ile kurulan GEDKS enerji modeli	68
7.2. TRNSYS ile kurulan GEDKS enerji modeli	69
7.3. Ekserji analizleri işlem adımları	71
11.1. PVSOL programı benzetim sonuçlarına göre Sankey enerji akış diyagramı.	90
11.2. TRNSYS programı benzetim sonuçlarına göre bileşenler arası güç etkileşimi	92
11.3. TRNSYS programı benzetim sonuçlarına göre batarya güç etkileşimi.	93
11.4. TRNSYS programı benzetim sonuçlarına göre eviricide meydana gelen güç kayıpları	94
11.5. Bileşen temelli enerji analiz sonuçları.	98
11.6. Farklı soğutucu akışkan kullanımının solar FV panel grubu, evirici/düzenleyici ve batarya grubu enerji verimine etkisi.....	100
11.7. Farklı soğutucu akışkan kullanımının klima enerji performansına etkisi	100

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
11.8. Bileşen temelli ekserji analiz sonuçları.	101
11.9. Farklı soğutucu akışkan kullanımının evirici/düzenleyici ve batarya grubu ekserji performansı üzerine etkisi.	103
11.10. Farklı soğutucu akışkan kullanımının klima ekserji performansına etkisi.	103
11.11. Solar FV panel grubuna ait ileri ekserji analizi sonuçları	105
11.12. Evirici/düzenleyiciye ait ileri ekserji analizi sonuçları	106
11.13. Batarya grubuna ait ileri ekserji analizi sonuçları.	107
11.14. Soğutucu akışkan a) R410A, b) R134a, c) R22 kullanımının klima ileri ekserji performansına etkisi.....	107
11.15. GEDKS'e ait ekserji performans analizi sonuçları	110



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. 2017 yılında gerçekleşen ulusal enerji dengesi – 1000 tep (EİGM, 2019)	9
3.1. Daha önceki çalışmalara ait temel bilgiler	23
4.1 Proje odasına ait geometri, bina kabuğu ve yapı özellikleri.....	31
4.2. Solar FV panellere ait teknik özellikler (Yingli Solar, 2019; CSUN, 2019)	36
6.1. İncelenen TRNSYS modelleri.....	51
7.1. Sistem bileşenlerine ait yakıt-ürün ekserji akımları	74
8.1. Sistem bileşenlerine ait eksergo-ekonomik eşitlikler.....	81
9.1 Ölçüm sistemine ait teknik özellikler.	85
11.1. Deneysel ve nümerik çalışmalarla elde edilen iklim koşulları.	88
11.2. PVSOL yıllık enerji benzetimi sonuçları.	91
11.3. TRNSYS yıllık enerji benzetim sonuçları.....	95
11.4. EXCEM analiz sonucunda solar FV panel grubu/evirici- düzenleyici/batarya grubu/klima için elde edilen eksergo-ekonomik parametrelere ait ortalama değerler (kWh/€)	113
11.5. SPECO analizi sonucunda evirici-düzenleyici/batarya grubu/klima için elde edilen exergo-ekonomik performans göstergelerine ait ortalama değerler	115
11.6 Tüm sisteme ait hassasiyet analizi sonuçlarının performans göstergeleri ile değerlendirilmesi	117

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)ÇizelgeSayfa

11.7	Sistem bileşenlerine ait hassasiyet analizi sonuçlarının performans göstergeleri ile değerlendirilmesi.....	117
------	---	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\bar{\cdot}$ (üzeri çizgi)	Ortalama değer
$\dot{C}_w$	İş kaynaklı maliyet akımı (€/h)
$\dot{C}_i$	Giriş akımı kaynaklı maliyet akımı (€/h)
$\dot{C}_o$	Çıkış akımı kaynaklı maliyet akımı (€/h)
$\dot{C}_q$	Isı transferi kaynaklı maliyet akımı (€/h)
$\dot{R}_{en}$	Termo-ekonomik parametre
$\dot{R}_{ex}$	Eksergo-ekonomik parametre
$\dot{C}$	Maliyet akımı (€/h)
$\dot{E}$	Enerji akımı (kW)
$\dot{E}_x$	Ekserji akımı (kW)
$\dot{Q}$	Isı transfer akımı (kW)
$\dot{W}$	Güç tüketimi veya iş kaynaklı ekserji akımı (kW)
$\dot{Z}$	Saatlik indirgenmiş maliyet akımı (€/h)
$\dot{m}$	Kütleli debi (kg/s)
$\frac{\partial R}{\partial x}$	x bağımsız değişkenlerine göre kısmi türev işleci
$\cdot$ (üzeri nokta)	Birim zamandaki miktar (akım)
a	Her bir ay için gözlemlenen saatlik parametrelere ait başlangıç sıra sayısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

A	Alan (m^2)
AC	Yıllık maliyet (€/yıl)
c	Birim ekserji başına maliyet akımı (€/kWh)
CF	Soğutma faktörü (W/m^2)
C_{FIT}	Şebekeye satılan elektrik maliyeti (€/kWh)
CI	Yıllık ilk yatırım gideri (€/yıl)
c_i	Birim ekserji başına giriş akımı kaynaklı maliyet akımı (€/kWh)
C_l	Gizli ısı faktörü ($W/L \cdot s$)
c_o	Birim ekserji başına çıkış akımı kaynaklı maliyet akımı (€/kWh)
c_q	Birim ekserji başına ısı transferi kaynaklı maliyet akımı (€/kWh)
C_r	Şebekeden satın alınan elektrik maliyeti (€/kWh)
CRF	Sermaye geri kazanım faktörü
C_s	Duyulur ısı faktörü ($W/L \cdot s \cdot K$)
c_w	Birim ekserji başına iş kaynaklı maliyet akımı (€/kWh)
d_a	Fiili faiz oranı
d_n	Nominal faiz oranı
$DPBP$	İndirgenmiş geri ödeme süresi (yıl)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

DR	Soğutma modundaki günlük sıcaklık değişimi (K)
E	Enerji (kWh)
E_{FV-Klm}	Solar FV panel grubu tarafından klimaya verilen enerji (kWh)
ex	Birim ekserji akımı (kJ/kg)
f	Eksergo-ekonomik faktör
FF_s	Pencere düzeni kaynaklı güneş yükü faktörü
F_t	Sistem ömrü boyunca kredi kullanımı kaynaklı borç maliyeti (€)
g	Enflasyon oranı
G	Yıllık kazanç geliri (€/yıl)
GHI	Küresel yatay ışıınım şiddeti (W/m^2)
h_{srf}	Etkili yüzey iletkenliği ($W/m^2 \cdot K$)
I	Akım (A)
I_0	İlk yatırım maliyeti (€)
IAC	İç gölgeleme kaynaklı azaltma katsayısı
IC_t	Toplam indirgenmiş giriş maliyeti akımı (€)
IDF	Sızıntı itici gücü ($L/s \cdot cm^2$)
ITK	Isıtma tesir katsayısı
i	yıllık faiz oranı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

k_1, k_2, k_n	Duvarları oluşturan n adet katmana ait ısı iletkenlik katsayıları (W/m·K)
n	Örnek sayısı, sistem ömrü (yıl)
N_{oc}	İklimlendirilen alan içindeki kişi sayısı (-)
NPV	Net şimdiki değeri (€)
OC_t	Toplam indirgenmiş çıkış maliyeti akımı (€)
OF_t, OF_b, OF_r	Opak yüzeylere ait soğutma katsayıları (-, K, -)
OM	Yıllık bakım ve onarım maliyeti (€/yıl)
OM_t	Sistem ömrü boyunca oluşan bakım ve onarım maliyeti (€)
P	Güç (W)
P_b	Kompresöre ait basma basıncı (kPa)
P_e	Kompresöre ait emme basıncı (kPa)
PEC	Satın alma maliyeti (€)
POA	Eğimli yüzeydeki küresel ışı nım şiddeti (W/m ²)
PW	Bugünkü değeri (€)
PWF	Bugünkü değeri faktörü (-)
PXI	Gölgeleme etkisini içeren pik ışı nım şiddeti (W/m ²)
Q	Hacimsel debi (L/s)
q	Isı kazanç akımı (W)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

r	Bağıl maliyet farkı
R	Bileşen değişimine ait yıllık gider (€/yıl)
R_1, R_2, R_n	Duvar katmanlarına ait termal direnç katsayıları ($m^2 \cdot K/W$)
R_{du}	Duvara ait termal direnç katsayısı ($m^2 \cdot K/W$)
RH	Bağıl nem
R_i	İç ortam hava katmanına ait termal direnç katsayısı ($m^2 \cdot K/W$)
R_o	Dış ortam hava katmanına ait termal direnç katsayısı ($m^2 \cdot K/W$)
R_t	Sistem ömrü boyunca bileşen değişim maliyeti (€)
R_{top}	Toplam termal direnç katsayısı ($m^2 \cdot K/W$)
S_0	İlk yatırım anındaki sübvansiyon maliyeti (€)
SC	Öz tüketim oranı
$SHGC$	Solar güneş ışıınım katsayısı
SOC	Bataryalara ait doluluk oranı
SS	Kendi kendine yeterlilik oranı
STK	Soğutma tesir katsayısı
SV	Yıllık hurda geliri (€/yıl)
SV_t	Sistem ömrü boyunca meydana gelen bileşenlere ait hurda değer (€)
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
t	zaman (dakika veya yıl)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

T_0	İlk yatırıma ait vergi maliyeti (€)
T_t	Kredi kullanımı kaynaklı borca ait vergi maliyeti (€)
U	Isı transfer katsayısı ($W/m^2 \cdot K$)
v_r	Rüzgar hızı (m/s)
w_1, w_2, w_3, w_n	Ölçüm yapılan parametrelere ait özgül belirsizlikler
w_R	Ölçüm yapılan nihai parametreye ait belirsizlik
x	Gözlemlenen parametre
x_1, x_2, x_n	Duvarları oluşturan n katmanına ait kalınlıklar (m)
x_{den}	Deneyisel çalışmalar ile gözlemlenen parametreler
x_{num}	Nümerik çalışmalar ile gözlemlenen parametreler
y_r	Rüzgar yönü ($^{\circ}K$)
ΔT	Sıcaklık değişimi ($^{\circ}C$)
ΔW	Özgül nem değişimi ($kg_{su} \text{ buharı} / kg_{kuru \text{ hava}}$)
η	Enerji verimi
φ	Ekserji verimi
τ	Yıllık çalışma süresi (h)
<u>Alt indisler</u>	
0	Ölü hal
a	Dış ortam

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<i>AC</i>	Alternatif akım
<i>Bat</i>	Batarya
<i>Bat,deşarj</i>	Bataryadeşarjı
<i>Bat,şarj</i>	Bataryaşarjı
<i>Bat-Klm</i>	Batarya grubu tarafından klimaya beslenen elektrik
<i>Bat-Şbk</i>	Batarya grubu tarafından şebekeye beslenen elektrik
<i>cf</i>	İklimlendirilen komşu mahallere ait taban
<i>d</i>	Döşeme
<i>D</i>	Yıkım
<i>DC</i>	Doğru akım
<i>duy,hava</i>	Havalandırma kaynaklı duyulur
<i>duy,iy</i>	İç yük kaynaklı duyulur
<i>duy,sız</i>	Sızıntı kaynaklı duyulur
<i>ED</i>	Evirici/düzenleyici
<i>es</i>	Binanın maruz kaldığı dış yüzey
<i>F</i>	Yakıt
<i>FV</i>	Fotovoltaik
<i>FV,AC</i>	Solar FV panel grubuna ait alternatif akım tarafında üretilen elektrik

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<i>FV,DC</i>	Solar FV panel grubuna ait doğru akım tarafında üretilen elektrik
<i>FV-Bat,şarj</i>	Solar FV panel grubu tarafından gerçekleştirilen batarya şarjı
<i>FV-Klm</i>	Solar FV panel grubu tarafından klimaya beslenen elektrik
<i>FV-Şbk</i>	Solar FV panel grubu tarafından şebekeye beslenen elektrik
<i>GEDKS</i>	Güneş enerjisi destekli klima sistemi
<i>gizli,hava</i>	Havalandırma kaynaklı gizli
<i>gizli,iy</i>	İç yük kaynaklı gizli
<i>gizli,sız</i>	Sızıntı kaynaklı gizli
<i>gun</i>	Güneş
<i>hava</i>	Havalandırma
<i>ıa</i>	İklimlendirilmeyen komşu mahallere ait yüzey
<i>ısı</i>	Isıtma
<i>i</i>	Giriş, iç ortam
<i>k</i>	Sistem bileşeni “k”
<i>Klm</i>	Klima
<i>L</i>	Binaya ait etkili sızıntı
<i>l</i>	Kayıp
<i>m</i>	Modül

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

n Örnek sayısı

o Çıkış, dış ortam

$opak$ Opak yüzey

P Ürün

pen Pencere

Q Isı transferi

sa Soğutucu akışkan

$sız$ Sızıntı

$soğ$ Soğutma

sys Sistem

$\mathcal{S}bk-Bat,şarj$ Şebeke tarafından gerçekleştirilen batarya şarjı

$\mathcal{S}bk-GEDKS$ Şebeke tarafından sisteme beslenen elektrik

$\mathcal{S}bk-Klm$ Şebeke tarafından klimaya beslenen elektrik

ul Binaya ait birim sızıntı

W İş

Üst indisler

AV Önlenebilir

AV,EN Önlenebilir/içsel

AV,EX Önlenebilir/dışsal

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<i>b</i>	Her bir ay için gözlemlenen saatlik parametrelere ait bitiş sıra sayısı
<i>CI</i>	İlk yatırım
<i>EN</i>	İçsel
<i>EX</i>	Dışsal
<i>G</i>	Kazanç
<i>lt</i>	Sistem ömrü (yıl)
<i>OM</i>	Bakım ve onarım
<i>R</i>	Değişim
<i>SV</i>	Hurda değer
<i>T</i>	Toplam
<i>t</i>	Zaman (yıl)
<i>UN</i>	Önlenemez
<i>UN,EN</i>	Önlenemez/içsel
<i>UN,EX</i>	Önlenemez/dışsal
<u>Kısaltmalar</u>	
ASHRAE	Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Birliği
CSP	Yoğunlaştırılmış solar güç
ED	Evirici/düzenleyici
EXCEM	Ekserji, maliyet, enerji ve kütle
FiT	Şebekeye besleme tarifi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

FV	Fotovoltaik
GEDKS	Güneş enerjisi destekli klima sistemi
RMSE	Karekök ortalama hata
SOC	Doluluk oranı
SPECO	Birim ekserji maliyetleme
STC	Standart test koşulları
TRNSYS	Zamana bağlı sistem benzetim paket programı



1. GİRİŞ

Dünya genelinde enerji konusu sıcak gündem maddesi olarak yerini sürekli olarak korumaktadır ve ülkelerin gelişmişlik düzeyi uyguladıkları milli enerji politikaları ile ilişkilendirilmektedir. Enerji alanında oluşturulan ulusal ölçekli stratejik planda yer alan temel amaçlar ise birincil enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi (dışa bağımlı kaynakların kullanımının azaltılmasıyla ülke ekonomisine katkıda bulunulması), arz ve talebin doğru yönetilmesi, verimlilik ve tasarruf sunan teknolojilerin kullanılması şeklinde belirlenmiştir (ETKB, 2017). Bu amaçların gerçekleştirilmesi kapsamında geleceğe dönük enerji tahmin senaryolarının doğru modellenmesi ve kullanılan enerji teknolojilerin teknik, ekonomik, çevresel ve insan sağlığı gibi konuları içererek bütünsel bir yaklaşımla analiz edilmesi gerekmektedir (Bonforte et al., 2018).

Küresel ölçekte enerji görünümü incelendiğinde birincil enerji tüketiminin % 79,7 oranında fosil kaynaklardan karşılandığı görülür. Fakat fosil kaynakların hızlı bir şekilde tükenme sürecine girmesi (sürdürülebilir olmaması) ve sebebiyet verdiği çevresel zararlar neticesinde son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına doğru bir eğilim meydana gelmiştir. Örneğin: 2012 yılından itibaren yeni kurulan elektrik üretim santrallerinin daha yüksek oranda yenilenebilir enerji kaynaklı oldukları ve 2018 yılı için bu değer % 64 (% 55 güneş enerjisi) rakamına karşılık gelmiştir. Bu değer tek başına güneş enerjisi kaynaklı güç üretimi yatırımının, kömür, doğal gaz ve nükleer enerji türlerinin tümüne ait olan yatırım toplamından daha fazla olmasını sağlamıştır. Bu değişime neden olan itici güçlerden bazıları teşvik mekanizmaları, karbon fiyatlandırmaları, solar fotovoltaik (FV) sistemlerde meydana gelen maliyet düşüşü ve teknolojik gelişmeler olarak öne çıkmaktadır. Öte yandan, bina sektörü küresel ölçekte son kullanıcılara ait enerji tüketim payının % 30'unu, sadece elektrik enerjisi dikkate alındığında ise % 49'unu oluşturmaktadır (REN21, 2019). Binalarda kullanılan iklimlendirme sistemleri ise elektrik tüketiminin kabaca yarısından sorumludur (Ma et al., 2019) ve 2018 yılı içinde sadece Avrupa'da evsel kullanım amaçlı 1,2 milyon adet ısı pompası satışı gerçekleşmiştir (REN21, 2019).

Gerek bakanlık hedeflerinin gerekse küresel ölçekteki enerji görünümünün değerlendirilmesi sonucunda enerji arzı tarafında yenilenebilir enerji türlerinin (özellikle güneş enerjisi) kullanımının arttığı görülmektedir. Ayrıca, enerji talebi kısmında binalar büyük oranda iklimlendirme sistemlerinden kaynaklı olmak üzere ciddi bir tüketim ve buna bağlı olarak verimlilik artırma potansiyeline sahiptir. Bu bilgiler ışığında kolaylıkla bütünleşik tasarıma imkân vermesi (Allouhi et al., 2015) ve solar termal enerjisi kullanan teknolojilere (absorpsiyon, desikant, vb.) göre piyasa koşullarının daha elverişli olması (Reda et al., 2020) dolayısıyla solar FV kaynaklı iklimlendirme sistemlerinin kullanımının oldukça cazip bir duruma geldiği belirlenmiştir (Zhao et al., 2018). Ayrıca, ilgili sistemlerin gerek şebekedeki elektrik yükünü azaltması gerekse bina uygulamalarında termal kollektörlerle birlikte kullanılması halinde eş zamanlı olarak elektrik ve ısı üretimi gerçekleştirmesi karbon salım değerlerini düşürme potansiyeline sahiptir (Li et al., 2012). Böylelikle, çevresel kaygıları (iklim değişikliği ve küresel ısınma) gidermede ve 2050 yılı hedefi olarak belirlenen küresel ısınmanın 2 °C altında tutulmasında pozitif katkı ortaya koyacaktır (IEA, 2014). Fakat güneş enerjisinin bina uygulamalarında iklimlendirme sistemleri ile bütünleşik kullanılması tek başına yeterli değildir. Aynı zamanda enerji depolama çözümleri ile enerji üretimi ve enerji tüketimi kısımlarının dengelenmesi ve sistemin tüm yaşam ömrü boyunca irdelenmesi gerekmektedir.

Yukarıda bahsi geçen teknolojik gelişmeleri konu alan bu tez çalışmasında şebeke bağlantılı ve batarya grubu ile bütünleşik kullanılan güneş enerjisi destekli klima sistemine (GEDKS) ait sırasıyla tasarım, kurulum, test, modelleme-benzetim adımları gerçekleştirilmiştir. GEDKS eş zamanlı olarak bina, enerji üretimi (FV paneller ve şebeke), enerji tüketimi (klima) ve bunlar arasındaki etkileşim (karar, kontrol ve enerji dönüşüm mekanizmaları, en uygun enerji depolama, vb.) gibi birçok bileşeni içeren karmaşık bir yapıya sahiptir. Gereç ve yöntem kısmında ayrıntılı olarak açıklanan ileri termodinamik analizlerin kurulan model tabanlı gerçekleştirilmesiyle modele ait karmaşıklık artmaktadır (He et al., 2018; Mehrpooya et al., 2018a). Ayrıca, literatürde büyük çoğunlukla kararlı durum için uygulanan ekserji analizleri (Reddy et al., 2012; Nguyen et al., 2013; Selwynraj et al., 2015; Ibrahim et al., 2018) yerine deneysel çalışmalar ile test edilmiş benzetim paket programları kullanımına dayalı dinamik bir yaklaşım gerçekleştirilmiştir.

Bugünkü bilgimize göre benzetim paket programı ile ileri termodinamik analiz yöntemlerinin yaşam boyu bütünleşik olarak ele alındığı bir çalışma GEDKS için daha önce yapılmamıştır ve bu noktada tez çalışmasına ait metodolojik bir özgünlük ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, bina ve iklimlendirme sistemini irdelemesi, yenilenebilir enerji kaynağını kullanması ve enerji depolama seçeneği sunması ile tez çalışması bu bölümün başında sunulan enerji alanında ortaya konulan ulusal ölçekli stratejik plan hedefleriyle de örtüşmektedir (ETKB, 2017).



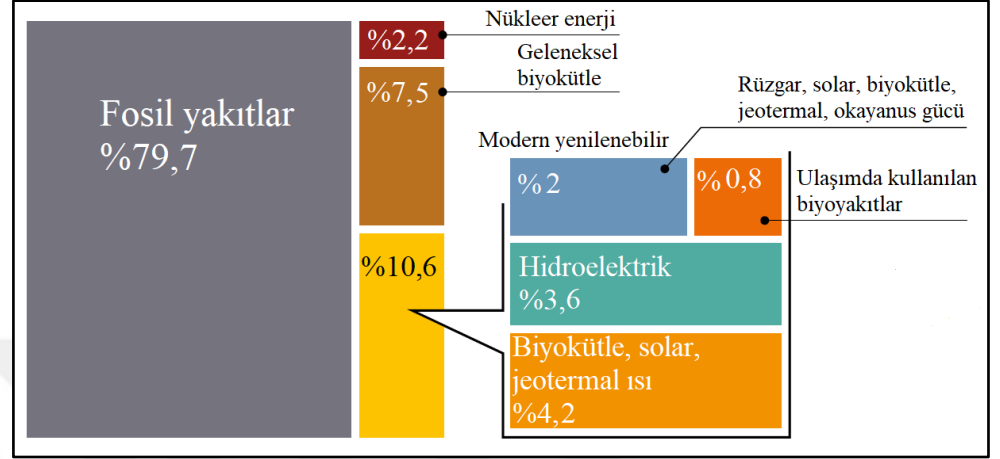
2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde küresel ve ulusal ölçekte yenilenebilir enerji görünümü, güneş enerjisi sistemleri, güneş enerjisi potansiyeli ve tez konusu ile ilişkili daha önce gerçekleştirilmiş literatür çalışmaları sırasıyla verilmiştir.

2.1 Yenilebilir Enerji Görünümü

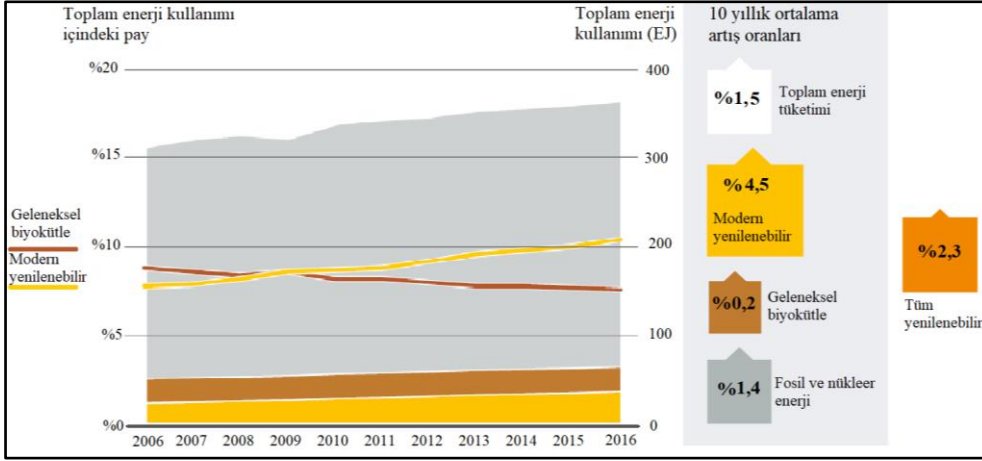
Yenilenebilir enerji kullanımında son yıllarda hızlı bir büyüme gerçekleşmiştir ve bu sayede eşitlik, çevre, maliyet üçlüsünü toplum yararına aynı anda sunabilen bir enerji modeli oluşturma fırsatı doğmuştur (Choudhary and Srivastava, 2019). Bu kullanım artışını meydana getiren başlıca unsurlar solar FV panel maliyetlerinde meydana gelen düşüş, yatırım desteklerindeki artış, teknolojik gelişim, dijitalleşme ve elektrifikasyon alanlarındaki çalışmaların önem kazanması, kömürsüz enerji ve karbon fiyatlandırmasında olduğu gibi çevreci uygulamaların yaygınlaştırılması şeklinde sayılabilir. Hidroelektrik, biyoenerji ve jeotermal enerji güç ve/veya ısı üretiminde uzun yıllardır maliyet rekabetine sahip yenilenebilir enerji kaynakları olarak kullanılmıştır. Bunlara ilaveten, solar FV ve rüzgâr türbini teknolojileri de son yıllarda yenilenebilir enerji kaynağına dayalı güç üretimine katılmış ve yeryüzünün birçok bölgesinde hâlihazırda var olan fosil kaynaklı ve nükleer enerji kullanan teknolojilerle rekabet edebilir seviyelere ulaşmıştır. Öte yandan, 2018 yılı itibariyle küresel enerji talebinde meydana gelen % 2,3 oranındaki artış, % 3,7 oranındaki ekonomik büyüme, enerji kaynaklı karbondioksit salımına ait % 1,7 oranındaki yükseliş ve kullanımı hızla azalan kömür yerine öncelikli olarak doğal gazın tercih edilmesi yenilenebilir enerji kullanımının yüzleşmek durumunda kaldığı zorluklar olarak ortaya çıkmıştır. Bunların yanı sıra dünya genelinde yaklaşık 1 milyar insan (nüfusun % 13'ü) elektrik erişimi olanağına hala sahip değildir ve 2,7 milyar insan ise temiz enerji kaynakları (salım oranı hedefi içinde kalan ve önerilen yakıtları kullanan) ile yemek pişirmemektedir. Tüm bu koşullar neticesinde 2017 yılı küresel enerji görünümü aşağıda Şekil 2.1 ile verildiği gibi ortaya çıkmıştır. Şekilden görüleceği üzere, toplam enerji tüketiminde fosil kaynaklar % 79,7 kullanım payı ile üstün hâkimiyetini devam ettirmektedir. Buna karşın, modern yenilenebilir enerji payı toplamda % 10,6 olarak gerçekleşmiştir. Yenilenebilir enerji türleri kendi içinde ele alındığında ise en büyük pay % 3,6'lık kısmı hidroelektrik olmak üzere elektrik üretim sektörüne (%)

5,6), ardından termal enerji kullanımına (% 4,2) ve geri kalan kısım ise ulaşım sektöründe kullanılan biyoyakıtlara (% 0,8) ait bulunmuştur. İlâveten, pişirme ve ısınma amaçlı kullanılan % 7,5 oranındaki geleneksel biyokütle enerjisi ile birlikte toplam yenilenebilir enerji kullanım payı % 18,1 olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 2.1. 2017 yılına ait küresel ölçekli toplam enerji tüketimi (REN21, 2019).

Yenilenebilir enerjinin küresel ölçekli toplam enerji tüketiminde teşkil ettiği paylara ilâveten aşağıda Şekil 2.2 ile bu enerji kullanımında meydana gelen 10 yıllık değişim (2006-2016) gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ilgili süre zarfında toplam % 2,3 oranında artmıştır ve ana pay % 4,5 ile özellikle solar FV teknolojisi olmak üzere modern yenilenebilir enerji kaynaklarına aittir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kullarımdaki artış hem toplam enerji tüketimindeki artıştan hem de fosil kaynaklı ve nükleer enerji kullanımı kaynaklı artıştan daha fazladır. Bu durumda küresel ölçekte yenilenebilir enerji teknolojilerinin kullanımına doğru bir eğilim olduğu açıkça görülmektedir. İlâveten, geleneksel biyokütle enerjisi kullanımının zamanla azalması her ne kadar toplam yenilenebilir enerji kullarımdaki artışı negatif yönde etkilese de enerji kullanımı ve çevre perspektifinden bakıldığında olumlu bir gelişme olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 2.2. 2006-2016 yılları arasında meydana gelen yenilenebilir enerji kullanımındaki değişim (REN21, 2019).

Sektörlere ait küresel enerji tüketimi dikkate alındığında ısıtma-soğutma, ulaşım ve elektrik üretimi karşımıza çıkmaktadır. İlgili sektörlerin 2016 yılı kapsamındaki payları % 51 (ısıtma-soğutma), % 32 (ulaşım) ve % 17 (elektrik üretimi) olarak gerçekleşmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ısıtma-soğutma sektöründe kullanım oranı % 15,2 geleneksel biyokütle, % 8 modern yenilenebilir ve % 1,8 yenilenebilir elektrik olmak üzere toplam % 25 olarak ortaya çıkmıştır. Ulaşım sektörü için bu oran % 3,3'tür ve bu oranın % 3'ünü biyoyakıtlar, % 0,3'ünü ise yenilenebilir elektrik oluşturmaktadır. Son olarak güç üretimindeki oran % 26 olarak gerçekleşmiştir ve bu oranın % 46'sını solar FV, % 32'sini rüzgâr, % 16'sını hidro, % 6'sını bir arada biyo, jeotermal, okyanus ve yoğunlaştırılmış solar birlikte meydana getirmiştir.

Yukarıda değinilen sektör temelli yaklaşımdan görüleceği üzere yenilenebilir enerji kaynakları ısıtma-soğutma sektöründe üç farklı şekilde kullanılmaktadır. Bunlar doğrudan geleneksel ya da modern biyokütlenin yakılması, jeotermal ve solar termal enerjinin doğrudan kullanılması ve bu tez kapsamında da yer verilen elektrik üretimi ile dolaylı yoldan enerji kaynağı sağlanması şeklindedir. Bu sektörde ısıtma amaçlı yenilenebilir enerji kullanımı oldukça yüksek mertebelerde görülmektedir (İsveç (%90), Danimarka (% 42)) (REN21, 2018). Bunun tam tersine, soğutma amaçlı yenilenebilir enerji kullanımı düşük seviyelerdedir ve binalarda kullanılan iklimlendirme sistemi kaynaklı elektrik tüketiminin %25 olduğu düşünüldüğünde (Ma et al., 2019) bu alanda büyük bir kullanım potansiyelinin bulunduğu görülür.

Ulaşım sektöründe 2000-2017 yılları arasında % 45 oranında bir enerji talep artışı gerçekleşmiştir ve yapılan çalışmalar genellikle karbonsuz ve/veya karbondioksit salımı azaltılmış enerji sistemlerinin kullanımı yönündedir. Örneğin, Hindistan, Hollanda ve Slovenya dizel ve benzin kullanan araçları 2030, Fransa ve İngiltere ise 2040 yılından sonra yasaklayacağını açıklamıştır. Bunlara ilaveten Çin, Avrupa ülkeleri ve Amerika Birleşik Devletleri EV100 kampanyası ile elektrikli araç kullanımının ve bu alandaki altyapı çalışmalarının teşvik edilmesi konusunda bir bildirme yayınlamıştır. Tüm bu gelişmeler ile yakıt verimliliği ve çevresel koşullar da dikkate alındığında yenilenebilir enerji teknolojilerinin ulaşım sektöründe kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu durum % 100 veya geleneksel yakıtlar ile birlikte biyoyakıtların kullanılmasıyla (etanol veya biyodizel), biyometan kullanımına olanak veren altyapının oluşturulmasıyla, doğrudan elektrikli araçlarla veya sentetik yakıt üretiminde elektrik kaynağı olarak yenilenebilir enerji türlerine yer verilmesi ile gerçekleştirilebilecektir.

Elektrik üretimi sektöründe 2018 yılı içerisinde yeni kurulan santrallerin % 64 oranında yenilenebilir enerji teknolojilerine yer verdiği (% 55 solar FV, % 28 rüzgâr ve % 11 hidro) ve bu oranın 181 GW kurulu güç kapasitesine karşılık geldiği görülmüştür. Yılsonu itibariyle birikmiş toplam kurulu güç ise 2.378 GW değerine ulaşmıştır (% 16,4 hidro, % 5,6 rüzgâr, % 2,2 biyo, % 1,9 solar FV ve % 0,4 okyanus, yoğunlaştırılmış solar ve jeotermal). Solar FV teknolojisi kullanımında meydana gelen kayda değer artış ise temel olarak 2007 ile 2017 yılları arasında gerçekleşen % 76 oranındaki maliyet düşüşüne bağlıdır. Ayrıca, solar FV teknolojisi ile bütünleşik depolama sistemi kullanımı devlet politikalarıyla dünyanın birçok bölgesinde farklı uygulamalarla desteklenmiştir. Örneğin, 2017 yılı içerisinde Çekya her 1 kW solar FV sistem montajı sırasında en az 5 kW depolama kapasitesinin sisteme bütünleştirilmesi kapsamında 20,3 milyon Amerikan doları (United States Dollar, USD) değerinde bir bütçe ayırmıştır. Amerika Birleşik Devletleri ise Maryland eyaletinde binalar ve işletmelerde kurulacak olan enerji depolama sistemleri kapsamında vergi indirimi uygulamasını ülkesel boyutta ilk kez gerçekleştirmiştir. Ayrıca, New York şehri 2020 yılına kadar 100 MWh kapasiteye sahip depolama sistemi kurulumuna ulaşacağını ilan etmiştir (REN21, 2018).

Küresel enerji görünümünün yanı sıra ulusal ölçekli enerji görünümüne ait değerlendirme birincil enerji tüketiminde dünya genelinde 19. sırada olan Türkiye için gerçekleştirilmiştir. Ulusal ölçekte enerji arzı ve tüketimi kapsamında 2017 yılında oluşan rakamlar Çizelge 2.1 ile verilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere, yerli üretim ile gerçekleştirilen toplam enerji arzının % 56,08'lik kısmını yenilenebilir enerji kaynakları oluşturmaktadır ve güneş enerjisi payı tüm yenilenebilir enerji kaynakları dikkate alındığında % 1,94'tür. Yerli üretim, ithalat, ihracat ve ihrakiye bileşenlerini bir arada içeren toplam enerji arzı göz önünde bulundurulduğunda ise ithalat kaynaklı enerji arzının % 72,25 oranına karşılık geldiği görülmüştür (EİGM, 2019). Bu durum ülkemizin üzerinde çözüm bulması gereken öncelikli ulusal problemlerin başında gelmektedir. Bu noktada, 2019 yılı ilk yarısı itibarıyla elektrik üretimi sektöründe gerçekleşen kurulu güç ile bu gücü elde etmede kullanılan enerji teknolojilerinin irdelenmesi sayesinde ülkemizin güncel durumda nasıl bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Buna göre, 2019 yılı ilk yarısı itibarıyla ülkemize ait kurulu güç 90,421 MW'dır ve bu gücün kaynak dağılımı % 31,4 hidro, % 29 doğal gaz, % 22,4 kömür, % 8 rüzgâr, % 6 güneş, % 1,5 jeotermal ve % 1,7 diğer şeklindedir. Bu birikimli güce 2019 yılı ilk yarısı itibarıyla eklenen santral sayısı-enerji kaynağı dağılımı ise 664-hidro, 67-kömür, 257-rüzgâr, 48-jeotermal, 327-doğal gaz, 6.349-güneş, 245-diğer şeklindedir. Sonuç olarak, 2019 yılı ilk yarısında kurulan santrallerin % 91,96'sının yenilenebilir enerji kaynaklı güç üretimi gerçekleştirdiği belirlenmiş olup bu durum ülkemiz açısından olumlu bir eğilim olarak görülmüştür (ETKB, 2017). Çizelge 2.1'den çıkarılacak bir diğer sonuç ise toplam nihai enerji tüketimi ve sektörler toplamı içindeki yenilenebilir enerji paylarının % 4,3 olarak gerçekleştiğidir. Tüm sektörler dikkate alındığında en büyük pay % 14,73 ile konutlara, en düşük pay ise % 0,43 ile ulaştırma sektörüne ait bulunmuştur. Güneş enerjisinin yenilenebilir enerji içindeki payı ise toplam nihai enerji tüketimi ve sektörler toplamı dikkate alındığında % 0,7 olarak gerçekleşmiştir. Tüm sektörler dikkate alındığında ise en büyük güneş enerjisi kullanım paylarının % 2,3 ile konutlara ve akabinde % 0,8 ile sanayiye ait olduğu belirlenmiştir.

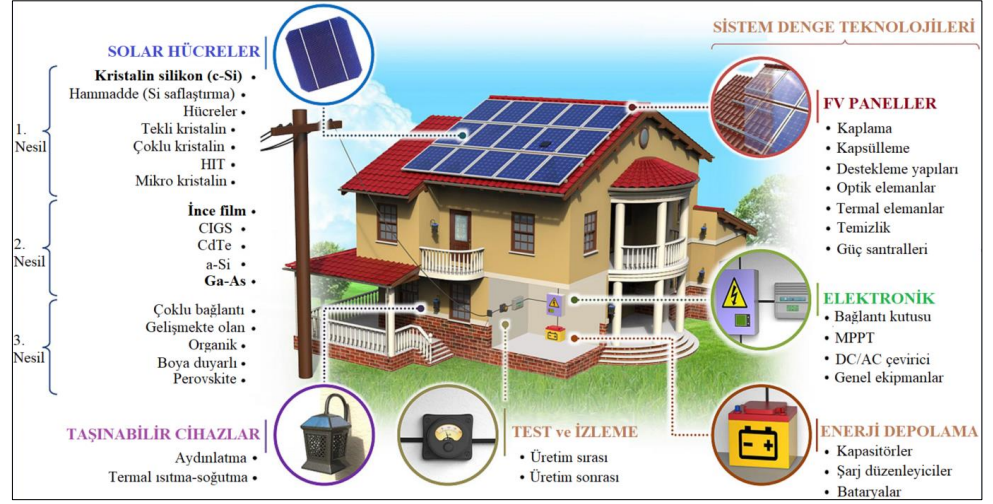
Çizelge 2.1. 2017 yılında gerçekleşen ulusal enerji dengesi – 1000 tep (EİGM, 2019).

Enerji arz dağılımı	Taş kömürü	Linyit	Ham petrol	Petrol ürünleri	Doğalgaz	Biyoenerji ve atıklar	Hidro	Rüzgâr	Elektrik	Diğer ısı	Jeotermal	Güneş	Toplam
Yerli Üretim (+)	723	13.752	2.681		292	2.531	5.007	1.540			7.128	1.091	35.357
İthalat (+)	24.347		27.055	26.668	45.581				235				124.425
İhracat (-)	60			6.876	520				284				7.853
İhrakiye (-)				4.575									4.575
Enerji ürünleri arzı	24.707	13.791	29.491	14.786	44.319	2.531	5.007	1.540	-49	0	7.128	1.091	145.305
Çevrim ve enerji sektörü	-15.823	-10.734	-29.491	28.352	-19.887	-367	-5.007	-1.540	21.306	2.281	-5.268	-248	-33.654
Toplam nihai enerji tüketimi	8.883	3.057	0	43.139	24.432	2.165	0	0	21.257	2.281	1.860	843	111.650
Sektörler toplamı	8.757	3.060	0	42.916	24.367	2.166	0	0	21.257	2.280	1.860	843	111.362
Sanayi tüketim	3.974	1.765	0	4.293	9.043	0	0	0	9.858	2.246	0	295	35.318
Ulaştırma	0	0	0	27.757	436	125	0	0	111	0	0	0	28.429
Konut	2.444	955		245	11.150	2.041			4.666		777	548	22.836
Ticaret ve hizmetler	2.340	340		880	3.074				6.037	34	475		13.179
Tarım ve hayvancılık				2.936	97				585		609		4.227
Enerji dışı tüketim	0	0	0	6.804	568	0	0	0	0	0	0	0	7.372
Petrokimya				2.179									2.179

2.2 Güneş Enerjisi Sistemleri

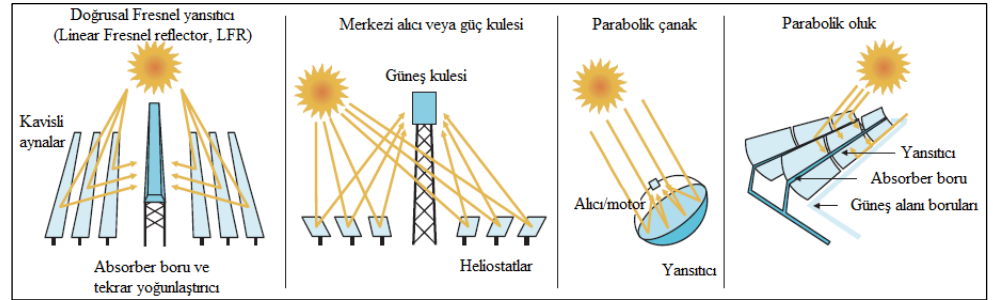
Dünya üzerinde temiz enerji, iklim değişimi ve sürdürülebilir gelişme gereksinimlerine karşılık verme potansiyeli olan yenilenebilir enerji teknolojileri son yıllarda enerji verimliliği uygulamaları ile birlikte önde gelen çalışma alanlarından biri olmuştur. Özellikle karbon dioksit salımını azaltma noktasında kilit öneme sahip olan bu teknoloji uygulamaları ile topluma enerjiye eşit erişebilirlik fırsatı sunulabilecektir. Bu hedef doğrultusunda ise güneş enerjisi sistemleri önemli bir pay teşkil etmektedir (IEA, 2014). Temel olarak güneş enerjisi sistemleri, (i) elektrik üretiminde kullanılan solar FV, yoğunlaştırılmış solar güç ve termoelektrik jeneratörler, (ii) mahal iklimlendirilmesinde kullanılan ısı pompası, absorpsiyon, adsorpsiyon, desikant, buharlı ejektör, Peltier, Rankine çevrimi, vb. kapsamında yer verilen solar ısıtma ve soğutma sistemleri ve (iii) sıcak su, proses ısısı (kurutma, damıtma, desalinasyon, yıkama, pastörizasyon, kürleme, vb.), havuz ısıtma ve yemek pişirme işlemleri için kullanılan solar termal sistemler olarak gruplandırılabilir (Kumar et al., 2019; Prieto et al., 2019).

Bu tez çalışması kapsamında ise birinci grupta yer alan güneş enerjisi ile elektrik üretimi incelenmiş olup şebeke bağlantılı sistemler göz önünde bulundurulduğunda iki temel teknoloji karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan ilki, Şekil 2.3 ile sistem bileşenleri verilen solar FV teknolojisidir. Bu teknolojiye fotovoltaik etki ile solar hücrelerdeki foton enerjisi, kimyasal ve fiziksel olaylar ile doğru akım elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Şekilden görüleceği üzere solar hücreler için üç nesil gruplandırma söz konusudur. Bugüne kadar bu hücre tiplerinden kristalin-silikon ile ince film hücrelerine ait seri üretim sivil uygulamalar için gerçekleştirilmiş olup galyum arsanit (Ga-As) ve çoklu bağlantı hücreleri ise yüksek maliyetlerinden ötürü kendilerine ancak uzay uygulamalarında yer bulmuştur. Fotovoltaik etki ile üretilen bu enerji Şekil 2.3 ile verilen sistem denge teknolojilerinin kullanılmasıyla depolanabilmekte, yük tarafı için kullanılabilmekte ya da şebekeye verilebilmektedir (Shubbak, 2019). Solar FV – şebeke entegrasyonu kapsamında ise günümüzde gelişmiş evirici, anti ada, şebeke-enerji santrali koruma, solar FV – şebeke tahmin ve akıllı şebekeler alanlarında teknolojik çalışmalar yürütülmektedir (Nwaigwe et al., 2019).



Şekil 2.3. Solar FV teknolojisi kapsamında kullanılan sistem bileşenleri (Shubbak, 2019).

Şebeke bağlantılı güneş enerjisi kaynaklı elektrik üretiminin gerçekleştiği bir diğer teknoloji solar termal güç olarak da nitelendirilen yoğunlaştırılmış solar güç (concentrated solar power, CSP) teknolojisidir. Aşağıda Şekil 2.4 ile farklı uygulamaları verilmiş olan bu CSP teknolojisi geleneksel termik enerji santralleri ile benzer prensibe dayalı çalışmaktadır (buharın sahip olduğu termal enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir). 2011 yılı mart ayı verisine göre, CSP sistemlerinden yüksek verimlilik ve yüksek enerji depolama kapasitelerine bağlı olarak en fazla parabolik oluk (% 96,3) ve ardından merkezi alıcı (% 3) sistemleri kullanılmıştır. Ayrıca, bu sistemlerin neredeyse tamamının kurulumu İspanya (% 57,9) ve Amerika Birleşik Devletleri'nde (% 40,1) gerçekleşmiştir (Zhang et al., 2013).



Şekil 2.4. CSP teknolojisi kapsamında kullanılan sistemler (Zhang et al., 2013).

Yukarıda Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 ile verilen solar FV ve CSP teknolojilerinin güneş enerjisini farklı enerji kaynağı olarak kullanılmasından ötürü (termal ve ışınım) enerji depolama yöntemleri de birbirinden farklıdır. Solar FV sistemler ile özellikle büyük kapasitelerde depolama işlemi (örneğin bataryalar) oldukça güçtür.

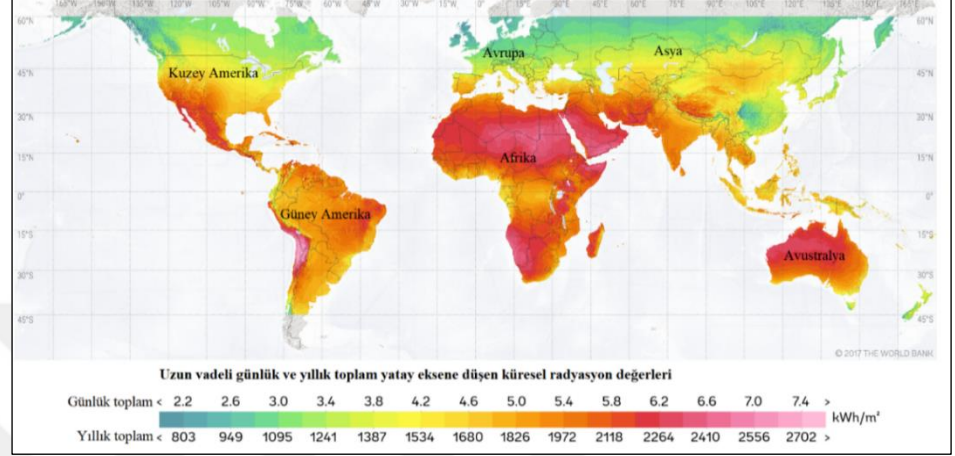
Buna karşın, CSP sistemleri termal enerji depolama çözümlemesi sunmasından ötürü bu noktada daha üstün özelliğe sahiptir. Bu sayede yüksek kapasiteli güç üretimi endüstrisinde solar FV sistemlerinde bulunan kesinti problemlerinin üstesinden gelebilmektedir. Fakat gerek buhar gerekse güneş santralini bir arada içermesinden ötürü yüksek ilk yatırım maliyetleri oluşmaktadır. Buna karşın son yıllarda solar FV sistem maliyetlerinde yüksek oranda bir düşüş meydana gelmiştir. İlaveten, MW başına gerekli olan alan solar FV teknolojisine göre yaklaşık % 50 daha fazladır (Nwaigwe et al., 2019) ve şebeke bağlantısı sırasında solar FV teknolojisi herhangi bir atalet enerjisi oluşturmamaktadır. Bu gelişmeler neticesinde enerji piyasası koşulları da göz önünde bulundurulduğunda son senelerde solar FV teknolojisinin kullanımının daha cazip bir hal aldığı görülmüştür. Örneğin, 2016 yılında güneş enerjisine dayalı elektrik üretimi kapsamında 308 GW kurulu güç yatırımı gerçekleşmiş olup 303 GW'lık kısmı (% 98) solar FV teknolojisine aittir (Právělie et al., 2019).

Solar FV ve CSP teknolojilerine ek olarak Seebeck etkisi (metallerin sıcaklık farkı sonrasında oluşan ısı karşısında birbirinden farklı olan tepkilerine dayalı elektrik üretimi) prensibine göre çalışan ve günümüzde % 5 gibi oldukça düşük ısı-elektrik verimine sahip olan termoelektrik jeneratörlerde güç üretiminde kullanılmaktadır. Düşük verim değerine karşılık enerji kaynağının minimum maliyette olması (solar ve atık ısı ile bütünleşik kullanılması) ve son yıllarda modül ile termal sistem konfüğürasyonlarında gerçekleşen iyileştirmeler ile termoelektrik jeneratörler gün geçtikçe daha cazip hale gelmeye başlamıştır (Karthick et al., 2019). Ayrıca bu teknolojinin CSP teknolojisiyle birlikte kullanıldığı uygulamalarda mevcuttur (Zhang et al., 2013).

2.3 Güneş Enerjisi Potansiyeli

Enerji arz güvenliği ve enerjiye eşit erişebilirlik problemlerini çözmüş karbonsuz bir enerji sektörüne sahip bir dünya ile sürdürülebilir gelişimin hâkim olduğu bir toplum modelini oluşturma adına yenilenebilir enerji kullanımı büyük bir fırsat sunmaktadır. Ayrıca, 2015 Paris Antlaşması ile belirlenmiş küresel ısınma etkisinin 2 °C'nin altında tutulması için 2040 yılı tahminlemesinde küresel elektrik üretiminin % 50 oranında yenilenebilir enerji kaynaklı olması gerektiği belirlenmiştir. Bu hedeflere ulaşma noktasında güneş enerjisi teknolojileri kilit rol

oynamaktadır ve bu teknolojilerin büyük çapta kullanılması ve yaygınlaştırılması doğrudan o bölgenin güneş enerjisi potansiyeline ve elektrik alt yapısına bağlıdır (Prăvălie et al., 2019). Bu bakımdan küresel güneş enerjisi potansiyeli, solar FV teknolojisi için önemli olan küresel yatay ışınlım (global horizontal irradiation, GHI) şiddetini temel alarak Şekil 2.5 ile verilmiştir (GSA, 2019).

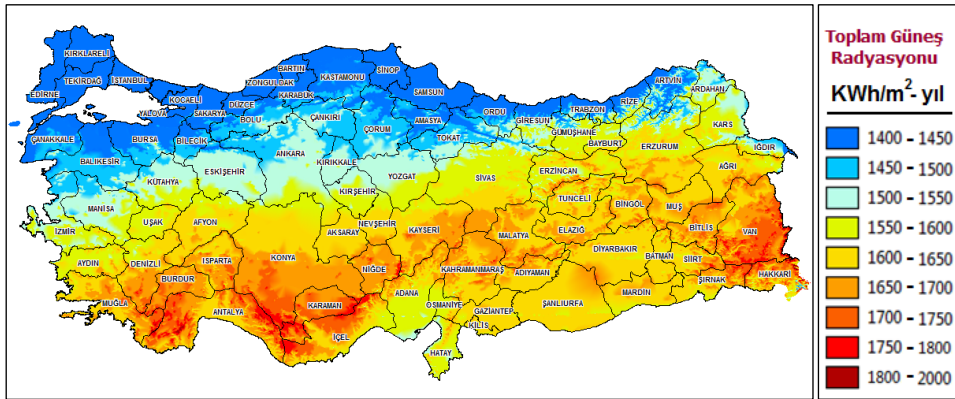


Şekil 2.5. Küresel güneş enerjisi potansiyeli (GSA, 2019).

Şekil 2.5 ile görüleceği üzere, dünya üzerinde güneş enerjisi potansiyeli 6 bölgede en yüksek değerlere sahiptir. Bu bölgeler Güney Amerika'nın batı kıyısı, Afrika'nın kuzeyi, doğusu ve güney batısı, Arap yarımadası ve Avustralya'nın kuzeyi şeklindedir. Kıta temelli bir değerlendirme gerçekleştirildiğinde ise Afrika'nın çok açık bir farkla en yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip olduğu görülür. Kıtanın %90'ında yıllık toplam 1.843,8 kWh/m² ve üzeri küresel yatay ışınlım şiddeti mevcuttur. Maksimum küresel yatay ışınlım yoğunluğu bakımından yine Afrika (10 mil km²) birinci sırada yer alırken onu Avustralya ve Asya (her biri >2 mil km²) izlemektedir. Her ne kadar Afrika kıtası en yüksek ve en yoğun küresel yatay ışınlım potansiyeliyle sahip olsa da 2016 yılında kurulan santrallerin (308 GW) sadece 2,5 GW kadarı bu kıtada gerçekleştirilmiştir ve bu değer sadece Güney Amerika kıtasına ait olan 2 GW değerini geride bırakabilmiştir. Bu durumda devlet politikaları, enerji tüketim miktarı, finansal koşullar, yasal mevzuatlar, enerji dağıtım altyapısı, toprak kanunları, vb. parametrelerin güneş enerjisi kaynaklı yatırımlarda önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Ülkeler açısından da durum pek farklı değildir. 2016 yılı sonu itibarıyla Çin, Japonya ve Almanya sırasıyla 80 GW, 42 GW ve 41 GW solar FV enerji santral kapasiteleri ile dünyada ilk üç sırada yer

almaktadır. Şekil 2.5 ile verildiği gibi bu ülkelere ait küresel yatay ışınlam potansiyeli orta seviyelerdedir (Prävlie et al., 2019).

Ülkemize ait güneş enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi kapsamında Şekil 2.6 ile verilen güneş enerjisi potansiyeli atlası kullanılabilmektedir. Buna atla göre ülkemize ait yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat (günlük ortalama 7,5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisi miktarı ise $1.527 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$ (günlük ortalama $4,18 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{gün}$) olarak tespit edilmiştir. Bölgesel olarak en yüksek potansiyeller Güney Doğu Anadolu ($1.460 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$), Akdeniz ($1.390 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$) ve Doğu Anadolu ($1.365 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$) bölgelerinde gerçekleşirken, en düşük değerlerin Karadeniz ($1.120 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$) ve Marmara ($1.168 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{yıl}$) bölgelerine ait olduğu görülmüştür. Her ne kadar Karadeniz bölgesi güneş enerjisi potansiyeli bakımından en düşük değerlere sahip olsada, solar FV kurulu gücünde dünya üçüncüsü olan Almanya'nın en yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip bölgelerinden daha yüksek olduğu bilinmelidir (Solarbaba, 2019a). İller bazında değerlendirme yapıldığında ise Antalya, Karaman, Konya, İçel, Van, Şırnak ve Hakkâri yüksek güneş enerjisi potansiyelleri ile ön plana çıkmaktadır. Ülkemizin sahip olduğu bu yüksek güneş enerjisi potansiyelin kullanan kurulu güç 2019 Ağustos ayı itibarıyla 5,5 GW değerine ulaşmıştır ve en büyük sıçrama 2017 yılı içinde gerçekleşmiştir. Bu sıçrama ile o yıl (2017), toplam solar FV kurulu gücü bakımından dünya üçüncüsü olan Almanya geride bırakılmıştır (Solarbaba, 2019b; YEGM, 2019). Bu durum devlet politikalarının ve yenilenebilir enerji teşviklerinin enerji yatırımlarında ne kadar önemli parametreler olduğunu bir kez daha ortaya çıkarmıştır.



Şekil 2.6. Ulusal güneş enerjisi potansiyeli atlası (YEGM, 2019).

3. DAHA ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR – LİTERATÜR ÖZETİ

Bu kısımda güneş enerjisi destekli klima/iklimlendirme sistemleri kapsamında daha önce gerçekleştirilen literatür çalışmaları ele alınmıştır. Araştırmalar sonucunda klima/iklimlendirme sistemleri ile güneş enerjisinin bütünleşik kullanılması durumunda güneş enerjisi kaynağından genellikle termal girdi olarak yararlanıldığı görülmüştür. Öte yandan, solar FV teknolojisinin çoğunlukla tek başına ve şebeke bağlantılı koşul altında incelendiği belirlenmiştir. Bu tez çalışması özelinde ise enerji tüketimi tarafına ait bilgilerin yer aldığı solar FV teknolojisi ile bütünleşik kullanılan klima/iklimlendirme sistemleri dikkate alınmıştır. Aşağıda ilgili çalışmalara ait kısa değerlendirmeler verilmiş olup Çizelge 2.2 ile ise bu çalışmalara ait derlenen konum, sistem bileşenleri, şebeke etkileşimi, kullanılan yöntem (metot/analiz) ve bazı temel bulgular sunulmuştur.

Opoku et al. (2018) Gana’da yer alan devlet binaları ile ticari binaların %60-80 oranında elektrik tüketiminden sorumlu olan klimaların şebeke bağlantılı solar FV sistem ile bütünleşik kullanımını teknik ve ekonomik analizler ile incelemiştir. 2,84 kWp solar FV paneller ile 200 Ah (24 V) bataryalara yer verilen benzetim çalışmalarında dört farklı senaryo (klimalanın % 50 solar FV paneller - % 50 şebeke, % 100 solar FV paneller ve % 100 şebeke ile beslendiği ve de solar FV teknolojisiyle üretilen enerjinin tamamının şebekeye verildiği) oluşturulmuştur. Dört senaryo için gerçekleştirilen fayda-maliyet analizleri sonucunda yukarıda verilen sırayla 6.140 USD, 4.353 USD, 7.700 USD ve 6.140 USD tutarındaki maliyet kalemleri 10 yılın sonunda ortaya çıkmıştır.

Laib et al. (2018) toplam ulusal enerji tüketimi içindeki payı % 42 olan bina sektöründe şebeke destekli solar FV teknolojisi kullanımı durumunda ortaya çıkan enerji performansını Cezayir’de evsel kullanım için incelemiştir. Çizelge 3.1 ile verilen sistem bileşeni kapasiteleri için çalışma sonunda yıllık enerji tüketim değerinin %88 oranında solar FV panel grubu ve % 12 oranında şebeke tarafından karşılandığı bulunmuştur.

O'Shaughnessy et al. (2018) tarafından yapılan çalışmada solar FV teknolojisinin batarya grubu ve yük tarafı kontrol uygulamaları ile bir arada yer aldığı sistem solar artı olarak isimlendirilmiştir. Çalışmada tüketilen enerji ile solar FV paneller tarafından üretilen enerjinin eşzamanlı hale getirilmesi temel

alınmıştır. Bu kapsamda elektrikli araçlar, sıcak su sistemleri, klimalar, çeşitli ev aletlerinin ön plana çıktığı belirtilmiştir. Maliyet temelli gerçekleştirilen analizde ise akıllı sıcak su sistemi ile akıllı klima sisteminin birlikte kullanılması durumunun 450 USD, 3 kWh kapasiteli batarya grubu kullanımının ise 3.000 USD tutarında bir maliyete sebep olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, solar artı sistem uygulamaları kapsamında öncelikle akıllı yük tarafı seçeneklerinin değerlendirilmesi gerektiği önerilmiştir.

Schram et al. (2018) solar FV teknolojisi ile batarya kullanımının birlikte yer aldığı sisteme ait en uygun boyutlandırma çalışmasını öz tüketim oranı ve pik yük desteği kıstaslarını göz önünde bulundurarak 72 farklı evsel kullanım için Hollanda'da gerçekleştirmiştir. Solar FV sistem kapasitesi, mahsuplaşma sonrası yük kullanımı ve özgül yük karakteristiği parametrelerine bağlı değişiklik gösteren en uygun batarya boyutu 0,5–9 kWh aralığında hesaplanmıştır. Ayrıca, batarya kullanımı ile pik yük desteği potansiyeli % 5,7 olarak belirlenmiş ve farklı kontrol uygulamaları ile bu değer % 22 ile % 51 değerine kadar çıkarılabildiği ortaya konulmuştur.

Li et al. (2018a) tarafından gerçekleştirilen benzetim çalışmasında şebeke bağlantılı solar FV teknolojinin batarya grubu ile bütünleşik kullanımı evsel uygulama için teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmiştir. Öz tüketim değerinin batarya kapasitesi artışı ile doğrusal olmayan bir şekilde arttığı ve belli değer üzerinde sabit kaldığı belirlenmiştir. Örneğin, öz tüketim oranı ocak ayında 2 kWh üzeri batarya kapasitelerinde 0,88; haziran ayında ise 7,5 kWh ve üzeri batarya kapasitelerinde 0,82 bulunmuştur. Basit geri ödeme süresi ise 5 kWp kapasiteli solar FV sistem ve 3 kWh kapasiteli batarya grubunun kullanıldığı durumda farklı şebeke besleme (0,015-0,021 USD/kWh) ve batarya için uygulanan teşvik (400-800 USD/kWh) maliyetleri altında 10 ile 17 yıl arasında değişiklik göstermiştir.

Li et al. (2018b) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise solar FV teknolojinin merkezi iklimlendirme sistemi ile kullanımına ait performans analizi güney Çin iklim koşullarına maruz kalan ofis binası için yapılmıştır. Güneş enerjisinden yararlanma, net güneş enerjisinden yararlanma ve güneş enerjisi fazlası oranları kullanılarak güneşli, bulutlu ve yağmurlu iklim koşullarının sistem üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma sırasında 2014 nisan-aralık aylarında

iklimlendirme sisteminin soğutma modunda ve hafta içi 08:00-18:30 (12:00-13:00 öğle arası) saatleri arasında çalıştığı durum göz önünde bulundurulmuştur. Yukarıda verilen sırayla performans göstergelerine ait yıllık ortalama değerler % 51,62, % 104,5 ve % 52,72 şeklinde hesaplanmıştır. Güneş enerjisi payı ise güneşli, bulutlu ve yağmurlu hava koşulları altında sırasıyla % 60-90, % 40-90 ve % 10-50 aralığında elde edilmiştir.

Dondariya et al. (2018) çatı tipi şebeke bağlantılı solar FV sistem performansını küçük bir mesken için (70 m² çatı alanı) dört farklı benzetim yöntemi kullanarak incelemiştir. PVSOL kolay, hızlı ve güvenilir sonuç veren paket programı olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sonucunda 6,4 kWp kapasiteye sahip solar FV panel grubu kullanımı ile yıllık şebeke enerjisi ihtiyacında % 41,09 oranında bir azalma meydana gelmiştir.

Talent and Du (2018) zaman ve talep temelli farklı şebeke tarife koşulları altında çalışan solar FV teknolojisi ile bütünleşik batarya kullanımını en uygun enerji kullanım planlaması ve en uygun sistem boyutlandırması sonucunda ortaya çıkan en uygun net şimdiki zaman değerine göre evsel ve ticari uygulamalar için incelemiştir. Çalışma sonunda batarya kullanımı sayesinde sisteme ait yıllık pik yük tüketimi evsel örnek için 5,98 kWh'den 2,25 kWh'e, ticari örnek için ise 450,3 kWh'den 348,6 kWh'e gerilemiştir. Evsel örnek için en uygun solar FV sistem ve en uygun batarya kullanımı ile net şimdiki değer zamana ve talebe bağlı şebeke koşulları için sırasıyla 4.260 USD ve 3.790 USD bulunmuştur.

Wu and Skye (2018) Amerika Birleşik Devletleri'nin 15 farklı şehrinde solar FV teknolojisi ile bütünleşik kullanılan iklimlendirme sistemlerini ilk yatırım maliyeti ve enerji performansı açısından incelemiştir. Farklı iklim bölgesine göre bina enerji tüketim içindeki payı % 23,8-72,9 oranında değişen iklimlendirme sistemleri farklı mekanik havalandırma (ısı geri kazanım yok, ısı geri kazanım var ve enerji kazanım ventilatörü) ve ısı pompası (toprak ve hava kaynaklı) seçenekleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Isı ve enerji geri kazanım opsiyonları ile sırasıyla 12 ve 14 farklı şehirde olumlu sonuç elde edilmiştir. İlk yatırım maliyeti kıstası altında ise 4 farklı şehirde ısı ve enerji kazanım opsiyonlarının uygulanabilir olduğu bulunmuştur. Isı pompası bakımından toprak kaynaklı çözüm 11 şehir için daha az enerji tüketimine sebep olmuştur. Fakat ilk yatırım maliyetinin yüksek olması

dolayısıyla uygulanabilirliğini sağlamak için borulama tasarımının ön plana çıktığı belirlenmiştir.

Ayala-Gilardón et al. (2018) şebeke bağlantılı solar FV sisteme ait kendi kendine yeterlilik ve öz tüketim oranlarının değişimini deneysel çalışmalarla elde edilen veri grubu kayıt aralığına ve mahsuplaşma koşuluna bağlı olarak incelemiştir. 10 saniye aralıkla elde edilen veri grubu ile 1 saat aralıkla elde edilen veri grubu arasında her iki oran için %9'luk fark hesaplanmıştır. Bu sebeple daha çok veri grubu kullanımını temel alan deneysel çalışmaların yapılması gerektiği önerilmiştir.

Zhao et al. (2018) zamana bağlı sistem benzetim paket programı (transient system simulation program, TRNSYS) kullanarak üretilen 16 farklı senaryo ile solar FV teknolojisinin 4 farklı iklim bölgesi ve 4 farklı bina tipi (Çin Ulusal Standartları ile belirlenmiş ofis, otel, alışveriş merkezi, hastane, okul) için kullanımının enerji ve ekonomik performansını araştırmıştır. Çalışma sonunda solar enerji kullanımı ve öz tüketim oranlarının yaz koşulunda bina tipine, kış koşulunda ise bina tipi ile birlikte iklim verisine bağlı değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Ekonomik analizler kapsamında ise elektriğin şebekeye satış maliyeti 0,4359 RMB/kWh, şebekeden alış maliyeti ise 1,257 RMB/kWh (8:00–11:00, 13:00–15:00, 18:00–21:00), 0,787 RMB/kWh (6:00–8:00, 11:00–13:00, 15:00–18:00, 21:00–22:00) ve 0,299 RMB/kWh (22:00–6:00) şeklinde ele alınmıştır. Bu maliyet koşulları altında iklim bölgesi açısından Guangzhou ve Beijing, bina tipi açısından ise alışveriş merkezi ekonomik açıdan avantajlı bulunmuştur.

Li et al. (2019) çatıların yeterli alana sahip olmamasından ötürü hazır beton ile bütünleşik üretilen solar FV panellere ait elektriksel ve termal performansı benzetim ve gerçek zamanlı deneyler ile incelemiştir. Yıllık analizler sonucunda tasarlanan sistem ile üretilen elektrik enerjisinden daha fazlasının termal olarak elde edilen kazanç ile ortaya çıkan tasarruf ile sağlandığı bulunmuştur. Bu durum, maksimum iç ortam konfor sıcaklığının ısıtma ve soğutma fonksiyonlarında sırasıyla 2,44 °C artması ve 1,72 °C azalmasıyla sağlanmıştır.

Sharma et al. (2019) Güney Avustralya'da yer alan bir ev için net sıfır enerjili bina (yıl boyunca üretilen ve şebekeden kullanılan enerji miktarının eşit olması)

koşulunu sağlayan batarya kullanımını çatı tipi solar FV uygulaması için araştırmıştır. Yıllık enerji tüketimi, solar enerji üretimi, yıllık faiz oranı, batarya ilk yatırım maliyeti, batarya ömrü, elektrik satış fiyatı ve solar FV paneller ile üretilen elektriğin satın alma maliyeti göz önünde bulundurulmuştur. Bu koşullar altında solar FV paneller ile üretilen elektriğe ait satın alma maliyetinin çok düşük olmasına bağlı olarak batarya kullanımının ekonomik olduğu ortaya konulmuştur. En uygun çözüme olanak sağlayan maksimum batarya maliyeti ise 80 \$/kWh/yıl şeklinde belirlenmiştir.

Zhao et al. (2019) adaptif oransal-integral-türevsel denetleyici kontrol döngüsü yöntemi ile solar FV paneller tarafından gerçekleşen enerji üretimi ve iklimlendirme sistemine ait enerji tüketimi değerleri farkını gözeterek iç ortam sıcaklığını her bir kontrol zamanında ayarlamıştır. Bu durum kompresörün çalışma frekansı üzerinde etkili olmuş ve çalışma sonunda öz tüketim oranı % 70,12'den % 74,42 değerine, solar enerji kullanım oranı ise % 82,74'den % 88,11 değerine ulaşmıştır.

Enongene et al. (2019) solar FV sistemlere ait kullanım potansiyelini Lagos, Nijerya'da yer alan 5 farklı bina tipine sahip toplam 150 adet hane için incelemiştir. Çalışma sonunda indirgenmiş elektirik maliyeti maksimum tüketime sahip binalar için 0,398-0,743 \$/kWh, minimum tüketime sahip binalar için ise 0,422-0,552 \$/kWh aralığında hesaplanmıştır. Bununla birlikte, yıl boyunca meydana gelen karbondioksit salımları maksimum tüketime sahip binalar için 76,9-7.456,44 g, minimum tüketime sahip binalar için ise 31,24-2.115,95 g şeklinde bulunmuştur.

Jurasz and Campana (2019) Polonya'da zamana ve pik yüke bağlı uygulanan üç farklı şebeke tarifesini koşullarında ticari ofisler için solar FV sistemler ile gelen enerji maliyet avantajını incelemiştir. Çalışma sonunda solar FV sistemlerin pik yüklerin meydana geldiği ve en pahalı şebeke tarife koşullarının uygulandığı zaman diliminde en yüksek enerji üretimi değerlerine sahip olmasından ötürü enerji kullanım maliyetinde % 20 oranında bir düşüş sağladığı belirlenmiştir.

Aguilar et al. (2019) Avrupa Birliği tarafından 2050 yılı hedefleri içerisinde yer alan binalara ait karbondioksit salımının % 90 düşürülmesi kapsamında önemi artan solar FV destekli şebeke bağlantılı iklimlendirme sistemini ele almıştır. Çalışmada 35m²'lik bir ofisin hafta içi 8:00-20:00 ve cumartesi 8:00-14:00 saatleri

arasında iklimlendirilmesi deneysel çalışmalar ile teknik ve ekonomik açıdan analiz edilmiştir. Solar FV panellerin % 53,8 oranında klimayı beslediği ve referans sisteme göre (sezonsal performans katsayısı 2,5) % 84 oranında maliyet kazancı ile % 74 oranında birincil enerji kullanım tarasarrufu sunduğu görülmüştür.

Li (2019) tarafından Avustralya’da gerçekleştirilen çalışmada şebeke bağlantılı solar FV teknolojisinin batarya grubu ile bütünleşik kullanımına ait en uygun boyutlandırma çalışması en düşük elektrik maliyetini sağlayacak şekilde yapılmıştır. Nisan 2012-Mart 2013 ayları arasında 7.112 farklı haneye ait yük tüketimlerinin ele alındığı çalışmada, batarya grubuna ait şarj ve deşarj çevrimleri ile gün içinde farklılık gösteren şebeke besleme tarifeleri göz önünde bulundurulmuştur. Benzetim çalışması sonucunda sistemin yük karakteristiğinin, şebekeye ait elektrik maliyetinin ve batarya grubuna ait satın alma maliyetinin belirleyici parametreler olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Poruschi and Ambrey (2019) tarafından yapılan çalışmada şebeke besleme tarifesini ile apartman yoğunluğuna ait 2001-2015 yılları arasındaki değişiminin Avustralya’nın büyük şehirlerinde kurulan çatı tipi solar FV santrallere etkisi kısa ve uzun vadede incelenmiştir. Hane başına solar enerji kullanımının en yüksek (2015 yılı 1,5 milyon hane) olduğu ülkenin sekiz büyük şehrinde yapılan çalışmada şebeke besleme tarifesinin apartman yoğunluğuna göre daha belirleyici bir parametre olduğu bulunmuştur. Ayrıca, şehirlerdeki sosyoekonomik durum ile kurulum maliyeti ön plana çıkan diğer parametreler olarak belirlenmiştir.

Dehwah and Asif (2019) çatı tipi solar FV teknolojisi kullanım potansiyelini Al-Khobar, Sudi Arabistan’da 100 km²’lik alana yayılmış 33.000 adet ev için araştırmıştır. Villa ve apartman tipi binalar için çatı tipi solar FV sistem kurulum potansiyeli sırasıyla % 21 ve % 28 olarak belirlenmiştir. Solar FV panel kurulumu çatıların % 25’ine sağlandığı takdirde elektrik gereksinimi karşılama oranı % 19 olarak bulunmuştur.

Roselli et al. (2019) gerçekleştirdikleri nümerik çalışmada yeni bir enerji endeksini sistemin şebeke ile olan etkileşimin sistemin enerji tüketimine oranı şeklinde hesaplamıştır. Bu endeks özgül güç şebeke endeksi olarak tanımlanmıştır. Farklı solar FV panel (2,5-10 kW) ve batarya (3,2-9,6 kWh) grubu kapasitelerinin toprak kaynaklı ısı pompası ile bütünleşik kullanımı benzetim çalışmalarıyla

incelenmiştir. Çalışma sonucunda en iyi özgül güç şebeke endeksi % 55,9 olarak hesaplanırken en iyi sistem kapasiteleri 7 kW-solar FV panel ile 9,6 kWh-batarya şeklinde bulunmuştur.

Talavera et al. (2019) solar FV panel teknolojisinin incelenmesi kapsamında sıklıkla kullanılan öz tüketim değerini maliyet rekabeti koşulunda Güney İspanya’da yer alan üç farklı konut için değerlendirmiştir. Çalışma sonunda küresel yatay ışıınım değerinin en az 1.000 kWh/m².yıl olduğu konumlar yatırım için elverişli bulunmuştur.

Leite et al. (2019) değişken akışkan debili ve su soğutmalı çiller iklimlendirme sistemlerinin solar FV teknolojisi ile bütünleşik kullanıldığı durumu Brezilya’nın iki farklı şehrinde ekonomik açıdan incelemiştir. Enerji tarifeleri ve yıllık değişimleri ile solar FV sistem maliyeti ve verimlilik değerleri en etkili parametreler olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda iç karlılık oranının % 22-28 oranında değiştiği ve değişken akışkan debili iklimlendirme sisteminin ekonomik göstergeler açısından daha iyi değerler sunduğu görülmüştür.

Oliva et al. (2019) Sidney’de yer alan 300 farklı evden alınan gerçek veri grubu ile solar FV sistemlerin enerji verimli tüketim teknolojisi uygulamaları ve batarya ile bütünleşik kullanımını değerlendirmiştir. Enerji tüketimi kısmında yer alan klimalara (3 yıldızdan 10 yıldıza) ve buzdolaplarına (3 yıldızdan 8 yıldıza) ait enerji verimliliği ile halojen aydınlatma uygulamaları sonucunda sırasıyla % 68, % 73 ve % 88 oranında enerji tasarrufu sağlandığı görülmüştür. Ayrıca, bu tasarruf uygulamaları ile bataryalara ait şarj aralığı düşerek batarya ömürlerinde 2 yıllık artış meydana gelmiştir.

Kim et al. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada sıfır enerjili bina kavramı ve yaşam boyu maliyet analizi değişken akışkan debili hava kaynaklı ısı pompası ve dağınık solar FV sistem kullanımı durumunda ele alınmıştır. Amerika Birleşik Devletleri’nin farklı eyaletlerinin (15 iklim bölgesi) göz önünde bulundurulduğu çalışmada iklim koşullarının ve vergi uygulamalarının önemli kistaslar olduğu ortaya çıkarılmıştır. Çalışma sonucunda 2B, 3B, 4A ve 4B iklim bölgelerinin yaşam boyu enerji analizleri açısından 4C, 5A, 7 ve 8 iklim bölgelerine göre daha üstün olduğu belirlenmiştir.

Chen et al. (2020) 20 m² alana sahip ofis için klimanın solar FV paneller ile beslendiği durumu incelemiştir. Çalışmada tasarım parametreleri olarak solar FV paneller için kapasite, seri/paralel bağlantı durumu ve eğim açısı, klima için güç tüketimi, evirici için ise alternatif akımdan doğru akıma güç çevrim verimi belirlenmiştir. Çalışma kapsamında 2 Ağustos (ayar sıcaklığı 26 °C) ve 7 Şubat (ayar sıcaklığı 20 °C) günlerinde klimanın 07:00-19:00 arasında çalıştığı durum test edilmiş olup enerji üretimi 18,5-12,5 kWh, enerji tüketimi 16,9-9,6 kWh, şebeke beslemesi ise 1,6-2,9 kWh aralıklarında bulunmuştur. Ayrıca soğutma (Haziran, Temmuz, Ağustos) ve ısıtma (Aralık, Ocak, Şubat) dönemlerine ait sistemin kendi kendine yeterlilik oranı sırasıyla 1,14 ve 0,73 hesaplanmıştır.

Jurasz et al. (2020) çatı tipi solar FV panel teknolojisinin kullanım potansiyelini Wrocław (Polonya) şehri için makro boyutta teknik, ekonomik ve çevresel açıdan incelemiştir. Çalışmada şehirde yer alan bina çatılarının % 45'inin neredeyse düz olduğu (eğim açısı 0-15 °) ve 2,9 MWp/km² tutarında bir kapasite potansiyeli bulunduğu belirlenmiştir. Yıllık elektrik tüketiminin bölgesel olarak 0 (orman ve sulak alanlar) ile 77,1 GWh (nüfus yoğun ve endüstriyel bölgeler) arasında değişiklik gösterdiği ve tüm şehir için toplam değer 2,2 TWh olduğu hesaplanmıştır. Solar FV güç üretimi teknolojisi tarafından karşılanan enerji tüketimi ve indirgenmiş elektrik maliyeti bataryasız durumda sırasıyla % 28 ve 0,167 €/kWh, bataryalı durumda ise sırasıyla % 31 ve 0,19 €/kWh bulunmuştur (solar FV kapasitesi 765 MWp ve batarya kapasitesi 0,5 GWh). Karbondioksit salım oranı düşüşü ise solar FV panel teknolojisi potansiyelinin % 100 oranında olması koşulunda % 28, 0,5 GWh ve 1 GWh batarya kapasitesi ile birlikte kullanıldığı durumda ise sırasıyla % 30 ve % 31 elde edilmiştir.

Çizelge 3.1 ile görüleceği üzere solar FV teknolojisinin klima/iklimlendirme sistemleri ile bütünleşik kullanımı durumunda kendi kendine yeterlilik, öz tüketim ve güneş enerjisi kullanım oranları birçok çalışmada yer almaktadır. Sistem enerji performansı göstergesi olarak kullanılan bu oranların yanısıra çalışmaların gerçekleştiği ülkelerde uygulanan şebeke besleme ve şebekeden beslenme koşulları ile uygulanan tarifeler ise batarya kullanımını ve sistemin ekonomik değerini ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca, sistem boyutlandırması ve sistemin gerçek zamanlı çalışması kapsamında enerji tüketimi kısmı en kritik bileşen olarak ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 3.1. Daha önceki çalışmalara ait temel bilgiler.

Yayın	Konum	Solar FV sistem	Yük, kullanım alanı ve/veya tüketim	Şebeke	Batarya	Metot/ Analiz	Notlar
Opoku et al. (2018)	Kumasi, Gana	1,04 kWp	Ofis: 30 m ² Klima: Isıtma 2,75 kW, soğutma 2,50 kW	Tek yönlü-klima besleme	Derin döngülü, 200 Ah-24 V	Nümerik (NREL), deneysel/ Enerji	- Yıllık solar FV enerji üretimi 1.211 kWh - Maksimum klima elektrik tüketimi 1,19 kW - Güneş enerjisi kullanım payı % 51±9
Laib et al. (2018)	Souidania, Cezayir	1,2 kWp	Ev: 90 m ²	Çift yönlü	Yok	Nümerik (MATLAB), deneysel /Enerji	- Yıllık solar FV enerji üretimi 2.253 kWh - Yıllık elektrik tüketimi 2.350 kWh - Yıllık şebekeye verilen ve şebekeden alınan elektrik miktarları sırasıyla 1.130 kWh ve 1.227 kWh
O'Shaughnessy et al. (2018)	Havai, Amerika Birleşik Devletleri	8 kW	Ev: 199 m ²	Çift yönlü	7,8 kWh	Nümerik (Beopt, REopt) /Enerji	- Yıllık solar FV enerji üretimi 11.663 kWh - Yıllık maliyet kazancı \$2.690 - Net mahsuplaşma = \$0,02/kWh için % 53,4 daha yüksek net bugünkü değer
pSchram et al. (2018)	Amersfoort, Hollanda	0,8–4,4 kWp	79 farklı ev: 2.637 kWh (yıllık toplam/hane adedi)	Çift yönlü	Lityum iyon, 3,5 kWh	Nümerik (MATLAB), deneysel /Enerji	- Ortalama net bugünkü değer 797€ - Ortalama en uygun batarya kapasitesi 3,36 kWh
Li et al. (2018a)	Kyushu, Japonya	1-7 kWp	200 farklı hane: 0,1-0,7 kW (hane başı ortalama)	Çift yönlü	0-10 kWh	Nümerik/ Enerji	- Basit geri ödeme süresi 18 yıl - Eve ait gündüz tüketimini tamamen karşılayan en uygun batarya kapasitesi 3 kWh
Li et al. (2018b)	Zhuai, Çin	309,5 kWp	Ofis: 14.220 m ² Su soğutmalı çiller: 362 kW	Çift yönlü	Yok	Deneysel/ Enerji	- Yıllık solar FV enerji üretimi 319.879 kWh - Yıllık çiller enerji tüketimi 306.027 kWh - Yıllık şebekeye verilen ve şebekeden alınan elektrik miktarları sırasıyla 171.826 kWh ve 157.974 kWh
Dondariya et al. (2018)	Ujjain, Hindistan	6,4 kWp	Ev: 70 m ² çatı alanı	Çift yönlü	Yok	Nümerik (PVSOL SolarGIS PVGIS SISIFO)/ Enerji	- Yıllık solar FV enerji üretimi 9.780-11.238 kWh - Yıllık enerji tüketimi 3.500 kWh - Yıllık şebekeye verilen ve şebekeden alınan elektrik miktarları sırasıyla 3.842 kWh ve 9.800 kWh - Performans katsayısı % 73,8-76,4
Talent and Du (2018)	Sidney, Avustralya	1,5 – 10 kW	300 farklı hane: 10.892 kWh (yıllık toplam/hane)	Çift yönlü	Lityum iyon, 7-21 kWh	Nümerik (Genel Cebirsel Modelleme Sistemi)/ Enerji	- Farklı tarife koşullarında en uygun solar FV panel ve batarya kapasiteleri sırasıyla 5 kW ve 7 kWh - Yıllık solar FV enerji üretimi 9.308 kWh (% 39,5 şebeke, % 37 yük ve % 23,5 batarya) - Yüke ait kaynak dağılımı % 44,5 şebeke, % 31,5 FV ve % 24 batarya

Wu and Skye (2018)	15 farklı şehir, Amerika Birleşik Devletleri	10,24 kWp	Müstakil ev: 386 m ² Hava ve toprak kaynaklı ısı pompası: 2-3 ton	Çift yönlü	Yok	Nümerik (TRNSYS), deneysel/ Enerji	• Toprak kaynaklı ısı pompası enerji tüketimi 11 şehir için daha az • Toplam (ısı pompası+ solar FV sistem) ilk yatırım maliyeti toprak kaynaklı ısı pompasında % 7 (Duluth) ve % 16 (Las Vegas) daha yüksek
Ayala-Gilardón et al. (2018)	Malaga, İspanya	3 kWp	Müstakil ev: 10,75 kWh (günlük toplam)	Çift yönlü	Yok	Deneysel/ Enerji	• Sıfır enerjili bina koşulunu sağlayan solar FV kapasitesi 2,3 kWp • Veri grubu zaman aralığı ile öz tüketim ve kendi kendine yeterlilik oranları değişimi sırasıyla % 48 ve % 98
Zhao et al. (2018)	4 farklı şehir, Çin	30 kWp	Bina: 900 m ² Hava kaynaklı ısı pompası: Soğutma 100,5 kW, ısıtma 112,5 kW	Çift yönlü	Yok	Nümerik (TRNSYS) /Enerji	• Ofis için güneş enerjisi oranı 0,7 ve hastane için öz tüketim oranı 0,6 (soğutma modu) • Yatırıma ait geri dönüş oranı 0,18-0,26 • En uygun solar FV kapasitesi 48 (ofis), 34 (alışveriş merkezi) ve 14 (hastane) kWp
Li et al. (2019)	Shanghai, Çin	0,79 m ²	Ev	Yok	Yok	Nümerik, deneysel/ Enerji	• Yıllık solar FV enerji üretimi 62,56 kWh/m² • Klimalara ait enerji tüketimi düşüşü 64,34 kWh/m²
Sharma et al. (2019)	Güney Avustralya	3 kWp	Ev: 5.210,9 kWh (yıllık toplam)	Çift yönlü	Lityum iyon	Nümerik (MATLAB)/ Enerji	• Maksimum batarya satın alma maliyeti 80 \$/kWh/yıl • Tarife farklılıkları kaynaklı 1.078,50\$ maliyet farkı
Zhao et al. (2019)	Shanghai, Çin	1,5 kWp	Oda: 26 m ² , Klima: 6 kW soğutma	Çift yönlü	0,51-0,83 kWh	Nümerik (TRNSYS)/ Enerji	• Güneş enerjisi kullanım oranı artışı % 5,37 • Öz tüketim oranı artışı % 4,3 • Minimum batarya kapasitesi kullanımı düşüşü 0,32 kWh
Enongene et al. (2019)	Lagos, Nijerya	0,3–76 kW	150 farklı ev	Yok	Kurşun asit, 2-176 kWh	Nümerik (Homer Pro)/ Enerji	• En düşük yük değerine sahip bina için solar FV sistem, batarya ve evirici kapasite değerleri sırasıyla 0,3–7 kW; 2-80 kWh; 0,1–5,4 kW • SOC %30 için en yüksek ve en düşük solar FV kapasite değerleri sırasıyla 7 kW ve 0,5 kW
Jurasz and Campana (2019)	Krakow, Polonya	60 kW	Küçük ofis: 164 MWh (yıllık toplam)	Çift yönlü	Yok	Nümerik/ Enerji	• Şebeke tarafından karşılanan pik yük düşüşü % 20 • Elektrik kullanım maliyetinde % 20 azalma
Aguilar et al. (2019)	Alicante, İspanya	0,705 kWp	Ofis: 35m ² Klima: Isıtma 3,81 kW, soğutma 3,52 kW	Tek yönlü - klima besleme	Yok	Deneysel/ Enerji	• Yıllık solar FV enerji üretimi 1.124,6 kWh • Yıllık klima enerji tüketimi 1.469,8 kWh • Solar FV enerji üretimi payı % 53,8
Li (2019)	Wales, Avustralya	5 kW	2.057 farklı ev: 130,5-603,2 kWh (günlük toplam)	Çift yönlü	Kurşun-asit, 3,36 kWh	Nümerik (Genetik algoritma), deneysel /Enerji	• Yıllık maliyet kazancı \$2.457,8 • En uygun batarya ve solar FV kapasite değerleri sırasıyla 6,1 kWh ve 3.8 kW

Poruschi and Ambrey (2019)	8 farklı şehir, Avustralya	< 10 kW	Apartman ve müstakil evler	Çift yönlü	Yok	Nümerik/ Enerji	• Şebekeye besleme tarifesini artışı ile % 15,37 oranında kurulum artışı • Bina yoğunluğunda % 1 artış ile % 2,03 oranında kurulum düşüşü
Dehwah and Asif (2019)	Al-Khobar, Sudi Arabistan	5,1-8,4 kWp	100 km ² ye yayılmış 3.000 ev	Çift yönlü	Yok	Nümerik (PVSOL, Energy Plus) /Enerji	• Solar FV enerji üretimi potansiyeli yıllık 797 GWh (eğimli yerleşim) ve 757 GWh (düz yerleşim) • Villa tipi bina için (504 m²) yıllık tüketim 63.756 kWh (% 63 soğutma) • Villa tipi bina için çatıların % 15, % 25 ve % 40'ına kurulum sağlandığında sırasıyla % 10, % 19 ve % 29 oranında tüketimi karşılama potansiyeli
Roselli et al. (2019)	Napoli, İtalya	2,5-10 kW	Ofis: 200 m ² Toprak kaynaklı ısı pompası: Soğutma 13,7 kW, ısıtma 16,5 kW	Çift yönlü	3,2-9,6 kWh	Nümerik (TRNSYS)/ Enerji	• Yıllık ısı pompası ve diğer yük kaynaklı enerji tüketimi sırasıyla 29,64 kWh/m² ve 11,74 kWh/m² • 2,5 kW solar FV sisteme ait verim % 14,5 (9,6 kWh batarya) ve % 14,3 (bataryasız) • Şebeke besleme % 7,7 (FV-2,5 kW, batarya-9,6 kWh)
Talavera et al. (2019)	Jaen, İspanya	1-3 kWp	Üç farklı konum: 1.951-5.282 kWh (yıllık toplam)	Çift yönlü	Yok	Deneyisel/ Enerji	• Öz tüketim oranı 0,5-0,65 • Öz tüketim maliyeti 14,4-18,4 c€/kWh • Kendi kendine yeterlilik oranı 0,37-0,47
Leite et al. (2019)	Recife ve São Paulo, Brezilya	109-156 kWp	Değişken akışkan debili ve su soğutmalı çiller: 100 ton	Çift yönlü	Yok	Nümerik (PVSyst, Meteororm)/ Enerji	• Geri ödeme süresi 4-5,9 yıl • Net şimdiki değerin ilk yatırım maliyetine oranı 5,95-8,22
Oliva et al. (2019)	Sidney, Avustralya	1,7 kWp	Ev: 6.980 kWh (yıllık toplam/ev)	Çift yönlü	Lityum iyon, 7-14 kWh	Deneyisel/ Enerji	• Yıllık ortalama üretim 3.800 kWh • Tüketim kısmında enerji verimlilik uygulaması ile batarya ömründe 2 sene uzama
Kim et al. (2020)	15 farklı şehir, Amerika Birleşik Devletleri	235-529 kWp	Prototip ofis: 4.982 m ² (Energy Plus ısı pompası modeli)	Çift yönlü	Yok	Nümerik (Energy Plus)/Enerji	• Enerji kullanım yoğunluğu 82-122 kWh/m² • Federal solar yatırım vergi kredileri ile basit geri ödeme süresinde 3-9 yıl düşüş
Chen et al. (2020)	Henan, Çin	3,2 kWp	Ofis: 20 m ² Klima: Soğutma 2,6 kW	Çift yönlü	Yok	Deneyisel/ Enerji	• Yıllık solar FV enerji üretimi 3.745 kWh • Soğutma, ısıtma sezonu ve tüm yıl için karşılama oranları sırasıyla % 114, % 73 ve % 188 • Geri ödeme süresi 7,5 yıl
Jurasz et al. (2020)	Wroclaw, Polonya	850 MWp	Tüm şehir: 2,2 TWh (yıllık toplam)	Çift yönlü	0,5-1 GWh	Nümerik (GIS)/Enerji	• Yıllık enerji talebi karşılama oranı % 36,8 • Yıllık enerji üretimi-tüketimi uyumsuzlukları sonucu karşılanma oranını % 29 • Yıllık enerji depolama yaz aylarında daha fazla

Çizelge 3.1 ile verilen solar FV teknolojisi ile elektriksel olarak beslenen klima/iklimlendirme sistemleri için gerçekleştirilen enerji analizlerinin yanısıra ekserji analizleri açısından GEDKS bileşenleri göz önünde bulundurulduğunda geleneksel ekserji analizlerinin solar FV teknolojisi için uygulandığı birçok çalışma karşımıza çıkmaktadır. Örneğin, deneysel çalışmalar ile temizlik ve tozun (Gürtürk et al., 2019), doğal soğutmanın (Wajs et al., 2020), kısmi gölgelenmenin (Bayrak et al., 2017) ve montaj türünün (Kumar et al., 2020) solar FV panele ait ekserji performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, şebeke bağlantılı solar FV güç santrali (Sundaram and Babu, 2015), solar FV paneller ile birlikte kullanılan batarya, elektrolayzer, yakıt pili sistemleri (Ogbonnaya et al., 2019a), hibrit FV-termoelektrik sistem (Li et al., 2017) ve tek başına solar FV panel (Ogbonnaya et al., 2019b) için ekserji verimi çalışmaları da mevcuttur. Geleneksel ekserji analizlerinin solar FV teknolojisine uygulandığı birçok literatür çalışmasının aksine, şu anki bilgimize göre, ileri ekserji analizlerinin solar FV paneller için uygulandığı tek bir çalışma Shaygan et al. (2019) tarafından yapılmıştır. İlgili çalışmada enerji, ekserji, ileri ekserji ve ekonomik analizler yakıt pili ile bütünleşik solar FV sistem için uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, solar FV panel grubunda meydana gelen ekserji yıkım akımının tamamının içsel olduğu ve % 4,77 oranında önlenebilir olduğu belirlenmiştir.

Solar FV panellerde olduğu gibi, literatürde yer alan birçok çalışmada geleneksel ekserji analizleri hava kaynaklı (Byrne and Ghouali, 2019; Su et al., 2019; Wang et al., 2019), toprak kaynaklı (Li et al., 2014; Lohani and Schmidt, 2010), absorpsiyon (Urbanucci and Testi, 2019), yüksek sıcaklık (Mateu-Royo et al., 2019) ve transkritik (Dai et al., 2019) olmak üzere birçok ısı pompası teknolojisine uygulanmıştır. Fakat ısı pompası sistemlerinin ileri ekserji analizleri kullanılarak değerlendirildiği çalışma sayısı oldukça kısıtlıdır. Voloshchuk et al. (2020) tarafından bölgesel ısıtmada kullanılan hava kaynaklı ısı pompası için, Erbay and Hepbasli (2014) tarafından yiyecek kurutması amaçlı kullanılan toprak kaynaklı ısı pompası için ve Gungor et al. (2015) tarafından yine yiyecek kurutması amaçlı kullanılan gaz motorlu ısı pompası için ileri ekserji analizleri uygulanmıştır.

Yukarıda verilen örneklerden görüleceği üzere gerek solar FV panel grubu gerekse ısı pompası sistemleri için gerçekleştirilen ekserji tabanlı performans değerlendirmesi kapsamında çoğunlukla geleneksel ekserji analiz yöntemine

başvurulmuştur. Fakat her iki teknolojinin bütünleşik kullanımı, basit ve şebekeden bağımsız çalışabilme (Allouhi et al., 2015) ve solar enerjinin termal girdi olarak kullanıldığı sistemlere göre daha ekonomik çözüm sunabilme (Reda et al., 2020) gibi iki temel avantaj getirisine rağmen ekserji analizleri ile değerlendiren çalışma sayısı oldukça azdır. Badescu (2002) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ekolojik bir binanın ısıtılması için kullanılan solar FV destekli ısı pompasına ait ekserji performansı incelenmiş olup sadece ısı pompası tarafı geleneksel ekserji analizleri ile değerlendirilmiştir. Wang et al. (2015a), solar FV paneller ile elektriksel olarak beslenen hava kaynaklı ısı pompası performansını evsel kullanım durumunda geleneksel ekserji analizleriyle araştırmıştır. İncelenen sistemde 1,7 kWp-solar FV panel grubu, 12 kWh-batarya grubu, 10 kW-evirici ve 7,12 kW-soğutma ile 7,9 kW-ısıtma kapasitelerine sahip ısı pompası kullanılmıştır. Çalışmada sistem bileşenlerinin incelenmesi yerine tüm sistemi içine alan bir değerlendirme yapılmıştır. Deneysel çalışmalara dayalı gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda sisteme ait ekserji verimi % 18,39 bulunmuştur. Abbasi et al. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise 200 m² alana sahip bir bina için kullanılan solar FV teknolojisi ile bütünleşik kullanılan toprak kaynaklı ısı pompası ve batarya grubunun ekserji performansı incelenmiştir. Wang et al. (2015b) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışma ile benzer şekilde sadece tüm sisteme ait ekserji verimi (güneş ışınlamına ait ekserjinin hangi oranda pompalar ve kompresörler tarafından kullanılan yararlı işe dönüştürülebildiği) hesaplanmıştır. İlgili verim değeri % 10 bulunmuş olup yüksek ekserji yıkımının % 76 oranında solar FV panellerden kaynaklandığı belirlenmiştir.

Ekserji analizlerinde olduğu gibi ekserji analizlerinin ekonomik analizlerle birlikte tartışıldığı eksergo-ekonomik analiz yönteminin solar FV destekli ısı pompası sistemleri için uygulandığı araştırma sayısı da yine oldukça azdır. Santarelli and Macagno (2004), solar FV panel grubu ile bütünleşik hidrojen enerjisi sisteminin evsel binaya ait elektrik ve termal enerji ihtiyacını karşılamak için kullanıldığı durumu termo-ekonomik açıdan analiz etmiştir. Çalışma sonunda solar FV panellere ait birim termo-ekonomik maliyet, yüksek ilk yatırım maliyetine ve düşük ekserji verime bağlı olarak diğer bileşenlere göre daha yüksek hesaplanmıştır. Saloux et al. (2019), binaya ait ısıtma ihtiyacını karşılamada

kullanılan güneş enerjisi destekli ve buz depolamalı su kaynaklı ısı pompası sistemi ile solar FV panel grubu destekli hava kaynaklı ısı pompası sistemini eksergo-ekonomik açıdan karşılaştırmıştır. Enerji ve ekonomi açısından ikinci sistemin, ekserji açısından ise ilk sistemin en uygun çözüm sunduğu belirlenmiştir. Kiyaninia et al. (2019), solar FV destekli doğrudan evaporatif hava soğutmalı sistemin eksergo-ekonomik performansını deneysel çalışmalarla farklı su ve hava sıcaklıkları ile farklı hava debileri altında geleneksel sistem ile karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Eksergo-ekonomik faktörün % 60 oranında arttığı ve geleneksel sisteme göre 4 yılın sonunda daha düşük değerler aldığı belirlenmiştir. Abd Elbar et al. (2019) enerji, ekserji, eksergo-ekonomi ve eksergo-çevresel analizleri solar damıtma sistemi ile bütünleşik kullanılan solar FV panel grubu için uygulamıştır. Sadece solar damıtma sistemine göre solar FV panel entegrasyonlu sistemin tuzlu su sıcaklığını arttırması ile eksergo-ekonomik faktör 1,316 değerinden 1,416 değerine yükselmiştir (faiz oranı % 10). Bu durum solar FV paneller tarafından üretilen elektriğinin doğrudan elektrikli ısıtıcıda kullanılması ve gelen güneş ışınımının solar FV paneller tarafından yansıtılmasıyla sağlanmıştır. Solar FV panellerin sadece yansıtıcı olarak kullanıldığı durumda ise eksergo-ekonomik faktör 10,01 değerini almıştır. Mata-Torres et al. (2020) CSP ile bütünleşik solar FV ve çok etkili damıtma güç santralini termo-ekonomik açıdan bir yıl boyunca analiz etmiştir. Solar FV teknolojisi entegrasyonu sayesinde termo-ekonomik elektrik maliyetinin çok büyük oranda düştüğü, termo-ekonomik su maliyetinin ise hemen hemen aynı seviyelerde kaldığı belirlenmiştir.

Yukarıda verilen literatür çalışmaları sonucunda şu anki bilgimize göre şebeke bağlantılı solar FV enerjisi destekli klima sisteminin batarya kullanımı altında hem geleneksel hemde ileri ekserji ve eksergo-ekonomik analizler ile değerlendirildiği bir çalışma daha önce raporlanmamıştır. Bu durumda tez çalışması kapsamında metodolojik bir özgünlük ortaya çıkmaktadır. İlaveten, birçok çalışmanın aksine sistemin geleneksel ve ileri ekserji ve eksergo-ekonomik performansı kararlı durum yaklaşımı yerine sistemin yaşam ömrünü temel alan dinamik bir değerlendirme ile incelenmiştir. Dinamik değerlendirme bu tez çalışması ile geliştirilen nümerik modele dayalı yapılmış olup geliştirilmiş nümerik model deneysel çalışmalarla test edilerek doğrulanmıştır.

4. SİSTEM TANITIMI

Bu bölümde deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği GEDKS'ye ait tasarım, kurulum ve devreye alma işlemleri kapsamında uygulanan adımlara ait ayrıntılı bilgilere sırasıyla yer verilmiştir.

4.1 Sistem Tasarımı

Bu tez çalışması kapsamında GEDKS tasarımı, kurulumu ve devreye alma işlemleri sırasıyla gerçekleştirilerek GEDKS deneysel çalışmalar için hazır hale getirilmiştir. İncelenen sistem şebeke bağlantılı olup solar FV panel teknolojisi ile bütünleşik kullanılan klima ve batarya grubundan meydana gelmiştir. Sistem tasarımı kapsamında öncelikle Şekil 4.1 ile konumu, yönü ve yerleşim planı verilen Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm binasının üçüncü katında yer alan proje odasına ait ısıtma-soğutma pik yük hesapları yapılmıştır.



Şekil 4.1. Proje odası konumu ve yerleşim planı.

Bölüm 1 ile verildiği gibi küresel ve ulusal ölçekte enerji talebi sürekli ve ivmeli bir şekilde artmaktadır. Isıtma-soğutma sektörüne ait oluşan talep artışını azaltmak için ise enerji verimliliği uygulamalarının yaygınlaştırılmasına ek olarak

enerji ihtiyacının doğru belirlenmesi gerekmektedir. Örneğin, bu tez kapsamında incelenen proje odasının iklimlendirilmesi için gerekli olan enerji talebinin (ısıtma ve soğutma yükleri) ihtiyaç duyulan değerden daha fazla hesaplanması ile daha yüksek kapasiteli sistem bileşenleri kullanımı (klima, FV panel grubu, evirici ve batarya grubu) ve nihayetinde daha yüksek maliyet gereksinimi karşımıza çıkacaktır. Tam tersi durumda ise enerji talebinin ihtiyaç duyulan değerden daha düşük hesaplanması ile konfor parametrelerinin sağlanamaması dolayısıyla teknik hataya sebep olacaktır. Bu sebeple, klima kapasite tayini için gerçekleştirilen pik ısıtma ve pik soğutma yükleri hesapları sırasıyla Amerikan Isıtma, Soğutma ve Havalandırma Mühendisleri Derneği (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE) el kitaplarını temel alan teorik yaklaşıma (ASHRAE, 2013a), Open Studio ve TS 825 paket programları ile gerçekleştirilen nümerik çalışmalara (İZODER, 2019; Open Studio, 2020) ve iklimlendirme sektöründe faaliyet gösteren özel bir şirket tarafından verilen hizmete dayalı olarak yapılmıştır (Ozcan et al., 2016).

Pik ısıtma ve soğutma yükleri genel olarak bina kabuğu ve yapı özelliklerini, dış ortam koşullarını ve iç kazançları temel alarak belirlenmektedir. Bunlar arasında yer alan bina kabuğu ve yapı özellikleri pik yüklere doğrudan veya dolaylı olarak etki etmektedir. Örneğin, bina kabuğunu oluşturan malzemeler, kullanılan kapı ve pencere türleri, binanın konumlandırılışı vb. özellikler doğrudan etki kapsamına girerken duvarlarda kullanılan boyanın pürüzlülüğü ve rengi, gölgelenmeye neden olan kısımlar ise dolaylı etkiye dâhil edilmektedir. Çizelge 4.1 ile proje odasına ait geometrik boyutlar ile bina kabuğu ve yapı özellikleri verilmiştir. Kullanılan dış ortam koşulları için ise İzmir ili temel alınmıştır ve her bir hesaplama yönteminde (teorik, nümerik, hizmet alımı) bu koşulların farklılık gösterdiği görülmüştür. Örneğin, ASHRAE el kitaplarında soğutma ve ısıtma koşulu için dış ortam kuru termometre sıcaklıkları sırasıyla 35,5 °C ve -2,8 °C şeklinde belirlenmiş iken (ASHRAE, 2013a), Open Studio paket programı tarafından sırasıyla 36,20 °C ve -1,8 °C olarak ele alınmıştır (Open Studio, 2020). İç kazançlar her bir hesaplama yönteminde 707 W (kişiler, aydınlatma ve ekipmanlar) kabul edilmiştir (Ozcan et al., 2016).

Çizelge 4.1 Proje odasına ait geometri, bina kabuğu ve yapı özellikleri.

No	Yön	Bileşen	Malzeme (kalınlık m)	Alan (m ²)
1	Geometrik özellikler	En	-	3,11 m
		Boy	-	4,98 m
		Yükseklik	-	3,48 m
2	Dış havaya açık- batı	Duvar	Dış sıva (0,03)	4,36
			Ekstrüde polistren köpük (0,03)	
			Yatay delikli tuğla (0,19)	
			Alçı harcı (0,02)	
		Kolon	Donatılı normal beton (0,5)	1,49
		Pencere	Standart çift cam (ısı iletim katsayısı belli)	6,07
3	Isıtılmayan iç ortama bitişik kuzey ve doğu	Duvar	Ekstrüde polistren köpük (0,07)	29,91
			Alçıdan duvar (0,03)	
4	Isıtılmayan iç ortama bitişik güney	Duvar	Yatay delikli tuğla (0,19)	17,94
			Alçı harcı (0,03)	
		Kapı	İç kapı (ısı iletim katsayısı belli)	1,94
5	Üst	Teras çatı	Ekstrüde polistren köpük (0,1)	5,28
			Donatılı normal beton (0,2)	
			Ekstrüde polistren köpük (0,1)	
		Asma tavan	Donatılı normal beton (0,2)	10,08
			Hava tabakası (0,955)	
			Alçıdan duvar (0,015)	
6	Alt	Döşeme	Donatılı normal beton (0,2)	15,36
			Linolyum (0,008)	

ASHRAE el kitaplarını temel alan pik soğutma yükü hesabı opak yüzeyler, döşemeler, saydam pencere yüzeyleri, ısıtılmayan alanlara karşılık gelen yüzeyler, sızıntı, havalandırma ve iç yükleri (kişi ve elektriksel ekipman) içerecek şekilde aşağıda verilen denklemler (1)-(17) kullanılarak hesaplanmıştır (ASHRAE, 2013a). İç ortam (konfor parametreleri) koşulları 24 °C kuru termometre sıcaklığı ve % 55 bağıl nem, dış ortam koşulları (iklim verisi) ise 35,5 °C kuru termometre ile 20,4 °C yaş termometre sıcaklıkları şeklinde kullanılmıştır. Ayrıca, eşitlik (2) ve eşitlik (8) de yer alan günlük sıcaklık değişimi (DR) 9°C alınmıştır (ASHRAE, 2013a; ASHRAE, 2013b).

$$q_{opak} = A_{opak} \cdot CF_{opak} \quad (1)$$

$$CF_{opak} = U_{opak} \cdot (OF_t \cdot \Delta T_{opak} + OF_b + OF_r \cdot DR) \quad (2)$$

$$U_{opak} = \frac{1}{R_{top}}, R_{top} = R_o + R_{du} + R_i \quad (3)$$

$$R_{du} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \dots + \frac{x_n}{k_n} \quad (4)$$

$$q_{opak,d} = A_d \cdot CF_d \quad (5)$$

$$CF_d = 1,9 - 1,4 \cdot h_{srf} \quad (6)$$

$$q_{pen} = A_{pen} \cdot CF_{pen} \quad (7)$$

$$CF_{pen} = U_{pen} \cdot (\Delta T_{pen} - 0,46 \cdot DR) + PXI \cdot SHGC \cdot IAC \cdot FF_s \quad (8)$$

$$q_{ia} = A_{ia} \cdot U_{ia} \cdot \Delta T_{ia} \quad (9)$$

$$q_{duy,hava} = C_s \cdot Q_{hava} \cdot \Delta T_{hava} \quad (10)$$

$$q_{duy,siz} = C_s \cdot Q_{siz} \cdot \Delta T_{siz} \quad (11)$$

$$q_{duy,iy} = 464 + 0,7 \cdot A_{cf} + 75 \cdot N_{oc} \quad (12)$$

$$q_{gizli,hava} = C_l \cdot Q_{hava} \cdot \Delta W_{hava} \quad (13)$$

$$q_{gizli,siz} = C_l \cdot Q_{siz} \cdot \Delta W_{siz} \quad (14)$$

$$q_{gizli,iy} = 68 + 0,07 \cdot A_{cf} + 41 \cdot N_{oc} \quad (15)$$

$$Q_{hava} = 0,05 \cdot A_{cf} + 3,5 \cdot N_{oc} \quad (16)$$

$$Q_{siz} = A_L \cdot IDF = A_{es} \cdot A_{ul} \cdot IDF \quad (17)$$

Eşitlikler (1)-(4) ile görüleceği üzere dış ortama açık opak yüzeylerde yer alan her bir yapı elemanına ait toplam ısı transfer katsayısı (U_{opak}) hava film tabakalarının termal direnç etkileri de göz önünde bulundurarak ($R_o = 0,045 \text{ m}^2\text{K/W}$, $R_i = 0,46 \text{ m}^2\text{K/W}$) ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu eşitliklerde yer alan yapı elemanlarına ait kalınlıklar (x) Çizelge 4.1, ısı iletkenlik katsayıları (k) ise ASHRAE el kitabı çizelgeleri kullanılarak belirlenmiştir (ASHRAE, 2012). Dış sıva, ekstrüde polistren köpük, yatay delikli tuğla, alçı harcı, donatılı beton ve alçıdan duvar bileşenleri için k değeri sırasıyla $0,63 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $0,03 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $0,21 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $0,42 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $1,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ve $0,16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ şeklindedir. Opak yüzeylere ait soğutma faktörü (CF_{opak}) hesabında kullanılan soğutma katsayıları (OF_t , OF_b , OF_r) ise dış havaya açık duvar ve kolon için sırasıyla 1 , $8,2 \text{ K}$ ve $-0,36$ değerlerini almıştır. Teras çatı ve asma tavan için ise aynı katsayılar sırasıyla 1 , $4,49 \text{ K}$ ve $-0,36$ ile $0,62$, $-0,21 \text{ K}$ ve $-0,19$ olarak belirlenmiştir. Eşitlik (6) da yer alan ve döşemeden kaynaklı ısı kazancının belirlendiği etkili yüzey iletkenliği (h_{srf}) üzerinde hiçbir kaplama olmayan çıplak beton için 0 W/m^2 alınmıştır. Eşitlik (7) ve (8) ile verilen pencere kaynaklı ısı kazancı hesabı sırasında kaplamasız standart çift cam kabulü koşulunda ve proje odasına ait enlem ($38,52^\circ$), konum (batı yönünde pencere) ve yükseklik (28 m) bilgilerinden yararlanılarak ısı transfer katsayısı (U_{pen}) değeri $2,73 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ olarak bulunmuştur. Ayrıca, gölgelenme etkisini içeren pik ışıınım ($PXI = 748,5 \text{ W/m}^2$), solar güneş ışıınımı katsayısı ($SHGC = 0,76$), iç gölgelenme kaynaklı azaltma katsayısı ($IAC = 0,5$) ve pencere düzeni kaynaklı

güneş yükü faktörü ($FF_s = 0,65$) ifadeleri sırasıyla ASHRAE el kitaplarından bulunmuştur (ASHRAE, 2013a; ASHRAE, 2013e). Eşitlik (9) da yer alan ısıtılmayan bölgelerin dış ortamdan $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ daha soğuk olduğu kabul edilmiştir ve kapıya ait U değeri $2,3\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ alınmıştır (ASHRAE, 2013c; ASHRAE, 2013d). İç yüklerden kaynaklı duyulur ve gizli ısı kazançları (Eşitlikler (12) ve (15)) ile havalandırma için gerekli asgari hacimsel debi (Eşitlik (16)) hesaplarını etkileyen iklimlendirilen mahal taban alanı (A_{cf}) Çizelge 4.1'den alınmıştır. Kişi sayısı ise (N_{oc}) 4 olarak belirlenmiştir. Son olarak havalandırma ve sızıntı kaynaklı duyulur ve gizli ısı kazançları bulunurken öncelikle duyulur ($C_s = 1,23\text{ W/L}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$) ve gizli ısı ($C_l = 3.010\text{ W/L}\cdot\text{s}$) faktörlerine ait değerler bulunmuştur. Ardından binanın maruz kaldığı yüzey alanı (A_{es}), birim sızıntı alanı (A_{ul}) ve binaya ait etkili sızıntı alanı (A_L) sırasıyla hesaplanmıştır. Binanın dış havaya açık duvar ve kolon kısmı ile teras çatı alanlarının toplanmasıyla A_{es} ifadesi $17,2\text{ m}^2$ bulunurken, A_{ul} değeri ortalama yapı varsayımı ile $2,8\text{ cm}^2/\text{m}^2$ olarak ele alınmıştır. Sonuç olarak A_L değeri $48,16\text{ cm}^2$ bulunmuştur. Sızıntı itici gücü (IDF) ise soğutma tasarım sıcaklığı ve bina yüksekliğinden yararlanılarak $0,058\text{ L/s}\cdot\text{cm}^2$ olarak belirlenmiştir (ASHRAE, 2013a). Gizli ısı kaynaklı ısı kazancının belirlenmesi kapsamında yer verilen özgül nem değişimleri (ΔW_{hava} , $\Delta W_{sız}$) soğutma tasarım parametreleri kullanılarak psikometrik diyagram aracılığıyla hesaplanmıştır. Bu kapsamda dış ortam için $35,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ kuru termometre ile $20,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ yaş termometre sıcaklıkları kullanılarak özgül nem $0,0095\text{ kg}_{subuhar}/\text{kg}_{kuru hava}$, iç ortam için ise $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ kuru termometre sıcaklığı ile % 55 bağıl nem koşulu ele alınarak özgül nem $0,0054\text{ kg}_{subuhar}/\text{kg}_{kuru hava}$ şeklinde belirlenmiştir. (ASHRAE, 2009).

ASHRAE el kitaplarını temel alan yöntem aracılığıyla pik ısıtma yükü hesabı gerçekleştirilirken ise yukarıda verilen denklemler güneş ışıınım kazancı, iç kazançlar ve binaya ait ısı depolama durumlarının (opak yüzey katsayıları) göz ardı edildiği koşulda tekrar kullanılmıştır. Bu sayede proje odasında yer alan tüm duvarlar (dış havaya açık, ısıtılmayan iç ortama bitişik, asma tavan, teras çatı, döşeme) için ısı kayıpları eşitlik (9) ile farklı sıcaklık değişimlerinin göz önüne alınmasıyla belirlenmiştir. Havalandırma ve sızıntı kaynaklı ısı kaybı ise sadece duyulur bileşen ele alınarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda dış ortam ve iç ortam

kuru termometre sıcaklıkları sırasıyla $-2,8^{\circ}\text{C}$ ve 20°C , ısıtılmayan bölgelere ait sıcaklık ise dış ortamdan 3°C daha fazla kabul edilmiştir (ASHRAE, 2013a).

ASHRAE el kitaplarını temel alan yöntem ile soğutma pik yük hesabını etkileyen opak yüzeyler, döşeme ve ısıtılmayan alanlara karşılık gelen yüzeylere ait ısı kazanç akımları sırasıyla 86,61 W, 29,18 W ve 217,41 W şeklinde hesaplanmıştır. Pencereleden gerçekleşen güneş enerjisi ve aktarımsal etkilerin bir arada bulunduğu ısı kazanç akımı 1.244,18 W bulunmuştur. Havalandırma ve sızıntı kaynaklı ısı kazanç akımları ise duyulur ve gizli bileşenler cinsinden sırasıyla havalandırma için 60,45 W, 52,74 W; sızıntı için ise 39,51 W, 34,47 W olarak belirlenmiştir. İç yüklerin neden olduğu duyulur ve gizli etkiler 774,83 W ve 233,08 W şeklinde hesaplanmıştır. Tüm bu değerler birlikte ele alındığında toplam pik soğutma yükü 2.772,50 W olarak elde edilmiştir. Güneş ışıınım kazancı, iç kazançlar ve binaya ait ısı depolama durumlarının (opak yüzey katsayıları) göz ardı edildiği koşulda gerçekleştirilen toplam pik ısıtma yükü ise 1.588,03 W olarak hesaplanmış olup 1.012,02 W aktarımsal duvar, 377,82 W aktarımsal pencere düzeni, 119,86 W duyulur havalandırma ve 78,34 W duyulur sızıntı şeklinde dağılım göstermiştir.

Teorik hesaplama bulgularına ek olarak TS 825 programı vasıtasıyla proje odasına ait toplam ve ocak ayında gerçekleşen maksimum ısıtma enerjisi ihtiyaçları sırasıyla 10,10 GJ ve 2,45 GJ olarak hesaplanmıştır. Yedi aylık ortalama değer ise 1,44 GJ olarak belirlenmiştir. Ocak ayı temel alındığında ortalama 940 W değerinde pik ısıtma yükü karşımıza çıkmaktadır (İZODER, 2019). Üç boyutlu bir model oluşturularak termal bölge tanımlamalarının gerçekleştirildiği Open Studio programının kullanılması sonucunda ise proje odasının yıllık ihtiyacı 6,36 GJ soğutma ve 1,99 GJ ısıtma olmak üzere 8,35 GJ olarak belirlenmiştir. Maksimum pik yükler ise ısıtma ve soğutma durumu için sırasıyla 2,17 kW ve 1,29 kW olarak hesaplanmıştır (Open Studio, 2020). İklimlendirme sektöründe faaliyet gösteren özel bir şirket tarafından verilen hizmet ile pik ısıtma ve pik soğutma yükleri sırasıyla 3,35 kW ve 2,56 kW olarak elde edilmiştir (Ozcan et al., 2016). Tüm bu yöntemlerin birlikte değerlendirilmesi sonucunda pik soğutma ve pik ısıtma yükleri için uç değerler sırasıyla 2,77 kW (9.281,02 BTU/h) ve 3,35 kW (11.430,67 BTU/h) bulunmuştur. Klima kapasite tayini kapsamında bu uç değerler kullanılmış ve

soğutma fonksiyonunda kapasite değerleri minimum 4.400 BTU/h, nominal 8.600 BTU/h ve maksimum 10.200 BTU/h; ısıtma fonksiyonunda minimum 4.400 BTU/h, nominal 9.700 BTU/h ve maksimum 13.600 BTU/h olan klima seçimi yapılmıştır. Seçilen kimanın soğutma fonksiyonunda çalışması durumunda yıllık enerji tüketim değeri 167 kWh, çalışma akımı 4,07 A ve enerji etkinlik oranı 5,29'dur. Isıtma fonksiyonunda çalışması durumunda ise yıllık enerji tüketim değeri 740 kWh, nominal çalışma akımı 3,86 A ve performans katsayısı 3,61 şeklindedir. Klima çevriminde soğutucu akışkan olarak R410A kullanılmış olup klamanın maksimum çalışma akımı 7,19 A'dır (Daikin, 2019).

Yukarıda verilen yöntemler vasıtasıyla belirlenen pik ısıtma ve pik soğutma yüklerinin uç değerlerini karşılayan klima seçiminin yapılmasının ardından GEDKS bileşenleri arasında yer alan evirici seçimine geçilmiştir. Evirici tarafından yük (klima) için sağlanan alternatif akımdaki güç, gerilim ve akım değerleri kullanılarak bir seçim yapılmıştır. Bu değerlendirme neticesinde 3 kW nominal güç, 208/220/230/240 VAC nominal gerilim ve 13,6 A nominal akım değerlerini sağlayan bir evirici kullanımı uygun bulunmuştur (Abax, 2019). Evirici seçimi sonrasında ise bu bileşene ait teknik özellik dokümanından solar FV panel grubunun yer aldığı doğru akım tarafı incelemesine geçilmiştir. Bu kısımda eviriciye ait çalışmaya başlama, nominal çalışma ve maksimum güç noktasında çalışma aralığı gerilim değerleri sırasıyla 116 VDC, 360 VDC ve 250 – 450 VDC olarak belirlenirken, maksimum giriş akımının 13 A olarak tanımlandığı görülmüştür. Ayrıca evirici ile birlikte çalışacak olan solar FV panellerin tekli kristalin, A sınıfı çoklu kristalin ve/veya bakır, indiyum, galyum ve selenyum elementlerinin birleşiminden oluşan CIGS tip olmasının önerildiği görülmüştür (Abax, 2019). Tüm bu bilgilerin değerlendirilmesi sonucunda ise 9 adet çoklu kristalin ve 1 adet tekli kristalin tip panellerin kullanılmasına karar verilmiştir. Aşağıda Çizelge 4.2 ile özellikleri ayrıntılı olarak verilen bu panellerin seri bağlanması ile eviricinin maksimum güç aralığında (250 – 450 VDC) çalışabilmesi sağlanmıştır. Çünkü nominal çalışma hücre sıcaklığında açık devre durumunda ve maksimum güçte üretilen gerilim değerleri tekli kristalin panel için 35 VDC ve 28,1 VDC iken çoklu kristalin panel için 34,7 VDC ve 27,2 VDC şeklindedir. Bu

durumda solar FV panel grubu açık devre durumunda 347,3 VDC ve maksimum güçte 277,9 VDC gerilim üretebilmektedir (Yingli Solar, 2019; CSUN, 2019).

Çizelge 4.2. Solar FV panellere ait teknik özellikler (Yingli Solar, 2019; CSUN, 2019).

MODEL	Çoklu kristalin	Tekli kristalin
Standart Test Koşullarında / Nominal Çalışma Hücre Sıcaklığında Elektrik Parametreleri		
Maksimum güç	250 W / 182,4 W	255 W / 188 W
Açık devre gerilimi	37,6 V / 34,7 V	38 V / 35 V
Kısa devre akımı	8,92 A / 7,21 A	8,82 A / 7,12 A
Maksimum güç gerilimi	29,8 V / 27,2 V	30,7 V / 28,1 V
Maksimum güç akımı	8,39 A / 6,71 A	8,30 A / 6,68 A
Modül verimi	%15,4	%15,7
Sıcaklık Karakteristiği		
Güç, gerilim ve akım kaynaklı sıcaklık katsayısı	-0,42 %/°C, -0,32%/°C, +0,05 %/°C	-0,423 %/°C, -0,307%/°C, +0,039 %/°C
ÇALIŞMA KOŞULLARI		
Maksimum sistem voltajı	1.000 VDC	
Maksimum seri sigorta değeri	15 A	20 A
Nominal çalışma hücre sıcaklığı	46 ± 2 °C	45 ± 2 °C
Çalışma sıcaklık aralığı	-40 °C ~ +85 °C	-40 °C ~ +85 °C
Maksimum yüzey yükü	5.400 Pa	
Maksimum dolu yağışı (çap, hız)	25 mm, 23 m/s	
MEKANİK ÖZELLİKLER		
Boyutlar (en x boy x yükseklik)	990 mm x 1.640 mm x 35 mm	990 mm x 1.640 mm x 35 mm
Ağırlık	18,5 kg	24,7 kg
Hücre (miktar, malzeme, boyut, bara sayısı)	60 çoklu kristalin silikon, 156 mm x 156 mm, 3	60, tekli kristalin silikon, 156 mm x 156 mm, 3
Çerçeve	Anotlu alüminyum alaşım	
Kablo (uzunluk, kesit alanı, konektör tipi, koruma derecesi)	1.000 mm, 4 mm ² , MC4, IP 68	900 mm, 4 mm ² , MC4, IP 65

Son olarak solar FV panel grubu seçimine benzer bir süreç batarya grubu için tekrarlanmıştır. Eviriciye ait teknik özellik dokümanından bataryaya ait nominal doğru akım gerilimi, maksimum şarj akımı ve alternatif akımda sağlanan gerilim değerleri sırasıyla 48 VDC, 25 A ve 208/220/230/240 VAC olarak belirlenmiştir (Abax, 2019). Bu bilgiler ışığında 4 adet özdeş 200 Ah kapasitesine ve 12 VDC gerilime sahip bataryaların seri bağlanmasıyla batarya grubu oluşturulmuştur. Bu sayede evirici için gerekli olan batarya kısmına ait nominal doğru akım gerilim değeri olan 48 V sağlanmıştır (SSB, 2019).

4.2 Sistem Kurulumu ve Devreye Alma

GEDKS'ye ait tasarım adımının gerçekleştirilmesinin ardından sistem bileşenlerinin satın alma süreçleri tamamlanarak kurulum adımına geçilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak klimaya ait mekanik ve elektriksel montaj gerçekleştirilmiştir. Klima iç ünitesi mekanik montajı hava dolaşımının serbestçe gerçekleştirilebilmesi için proje odasının uzun kenarına karşılık gelecek şekilde (doğu duvarı) yapılmıştır.

Klima dış ünitesi ise tez çalışması kapsamında gerçekleştirilecek olan termondinamik analizlerde gerekli olan klima çevrimine ait termofiziksel özelliklerin kolaylıkla ölçülebilmesi için çatıya monte edilmiştir. Bu sırada 14,5 m uzunluğunda bakır boru hattı kullanılmıştır ve bu değer izin verilen maksimum değerden 7 m daha fazladır. Bu durumun sonucunda vakumlama ve gaz dolumu sırasında klima çevrimine 140 gr fazladan (her fazla 1 m için 20 gr) gaz şarj edilmiştir (Daikin, 2020). Ayrıca, elektriksel montaj esnasında yalıtım yetersizliğinden kaynaklanabilecek tehlikeleri önlemek için topraklanma bağlantısı yapılmıştır. Klima montajı sonrasında ise solar FV panel grubuna ait mekanik montaj aşamasına geçilmiş ve çatıda panel grubunun yerleşeceği alan belirlenmiştir. Panel grubunun oturacağı alüminyum karkaslar yatay eksenle $37,7^\circ$ açı yapacak ve yönleri güneyden 30° azimut açısı ile sapacak şekilde monte edilmiştir. Ardından paneller bu karkaslar üzerine bağlantı aparatları kullanılarak sabitlenmiştir. Panel grubu, iki sıra halinde arkalı önlü yerleştirilmiş beşer adet kristalin paneller ile oluşturulmuştur (9 tanesi çoklu kristalin ve bir tanesi ise tekli kristalin). Gölgeleme etkisinden kaçınma adına iki dizi arası 2,8 m, üst dizi ile kuzey çatı duvarı arasındaki en uzun mesafe 3 m, doğu kısmında yer alan en yakın yapı ile ise 3,6 m olacak şekilde mekanik montaj gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, uygun kesitte solar kablolar kullanılarak solar FV panel grubu için tek dizi (string) seri bağlantı oluşturulmuştur. Solar FV panel grubu montajı sonrasında ise batarya grubu montajı 4 adet 12 VDC 200 Ah kapasiteye sahip solar bataryaların seri olarak birbirine bağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Güvenlik önlemleri gereği bataryalar demir bir platform üzerine yerleştirilmiştir. Son olarak eviriciye ait montaj adımına geçilmiş ve eviricinin mekanik montajı sert yüzeye dikey konumlandırılarak ve etkin soğutulmasını sağlamak için yan kısımlarında minimum 20 cm, üst/alt kısımlarında ise minimum 50 cm boşluk kalacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca eviriciye ait koruma sınıfı (IP 20) göz önünde bulundurularak kapalı alan olması şartını sağlama adına montaj proje odasına yapılmıştır. Bu bileşen içinde mekanik montaj sonrası elektriksel montaja geçilmiştir. Tüm bağlantı kabloları ve terminaller montaj gereksinimlerini karşılayacak şekilde seçilmiştir. Öncelikle şebeke – evirici bağlantı hattı üzerinde koruma amaçlı 250 VAC/30A değerine sahip akım kesiciye yer verilmiş ve bu sayede eviricinin güvenli bir şekilde sistemle bağlantısının kesilmesi sağlanmıştır. Daha sonra solar FV panel grubu – evirici

bağlantısı hat üzerinde koruma amaçlı 600 VDC/20A değerine sahip akım kesicinin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Montaj talimatında belirtildiği gibi solar FV panel grubu içinde sadece monokristalin ve A sınıfı polikristalin tip panel kullanımı gerçekleştirilmiş olup seri bağlantılı dizi ile eviricinin maksimum güç gerilimi aralığında çalışması sağlanmıştır. Bunun sonrasında evirici-batarya grubu bağlantısı hat üzerinde koruma amaçlı 60 VDC/100A değerine sahip akım kesicinin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Son olarak evirici-yük (alternatif akım çıkışı) bağlantısı uygun kablo kesitlerinin ve anahtarlama elemanının kullanılması ile sağlanmıştır. Eviricinin topraklanması da bu adımda gerçekleştirilmiştir. Aşağıda Şekil 4.2 ile kurulumu ait bazı görseller sunulmuştur.



Şekil 4.2 GEDKS kurulumu.

GEDKS kurulumunun tamamlanması sonrasında evirici yazılım programına (Solar Power) iletişim kapısı üzerinden bağlanılarak öncelikle sisteme ait çalışma koşulu programda yer alan *güç yönetimin* sekmesinden seçilmiştir. Güç yönetimin sekmesi yedeklemeli şebeke bağlantılı, şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız olmak üzere üç farklı çalışma koşulu sunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında konfor parametrelerinin sürekli sağlanmak istenmesi ve yenilenebilir enerjiden maksimum fayda sağlanması adına batarya grubunun kullanılması dolayısıyla *yedeklemeli şebeke bağlantılı* koşul ele alınmıştır. Bu koşul altında ise solar FV panel grubu tarafından üretilen enerjinin kullanım önceliği ile batarya grubunu şarj

etmek ve yükü beslemek için kullanılan mevcut kaynakların kullanım önceliklerini belirleyen dört farklı seçenek aşağıda verildiği haliyle yer almaktadır.

- (i) Yedeklemeli şebeke bağlantılı – I: Solar FV panel grubu önce batarya grubunu, sonra alternatif akımda yükü ve en son şebekeyi (opsiyonel) besler,
- (ii) Yedeklemeli şebeke bağlantılı – II: Solar FV panel grubu önce alternatif akımda yükü, sonra batarya grubunu ve en son şebekeyi (opsiyonel) besler,
- (iii) Yedeklemeli şebeke bağlantılı – III: Solar FV panel grubu önce alternatif akımda yükü, sonra şebekeyi ve en son batarya grubunu besler,
- (iv) Yedeklemeli şebeke bağlantılı – IV: Burada pik yüke bağlı iki senaryo oluşturulabilmektedir. Pik yük zaman aralığı sisteme girildiğinde solar FV panel grubunun önce alternatif akımda yükü, sonra batarya grubunu ve en son şebekeyi (opsiyonel) beslemesi; diğer zaman aralığında ise önce batarya grubunu, sonra alternatif akımda yükü ve en son olarak şebekeyi (opsiyonel) beslemesi sağlanır.

GEDKS için çalışma koşulu yedeklemeli şebeke bağlantılı – II olarak belirlenmiştir. Konfigürasyon detaylarında ise aşağıda verildiği gibi iki farklı çalışma modu (A ve B) devreye alınmıştır.

- (i) Batarya grubu sadece solar FV panel grubu tarafından şarj edilmektedir (çalışma modu A ve B).
- (ii) Alternatif akımda yükün öncelikle solar FV paneller, ardından batarya grubu ve en son şebeke ile beslenmesi sağlanmaktadır (çalışma modu A ve B).
- (iii) Solar FV panel grubunun yeterli enerjiyi sağlayamaması durumunda alternatif akımdaki yükün öncelikle batarya grubu ardından şebeke ile beslenmesi sağlanmaktadır (çalışma modu A ve B).

- (iv) Şebekenin solar FV panel grubu ve/veya batarya grubu tarafından hiçbir zaman beslenmemesi sağlanmaktadır (çalışma modu A).
- (v) Solar FV panel grubu öncelikle alternatif akımda yükü ardından ise batarya üzerinden şebekeyi beslemektedir (çalışma modu B).
- (vi) Solar FV panel grubunun yetersiz olduğu zamanlarda batarya grubunun deşarjı gerçekleşebilmektedir (çalışma modu A ve B).

Yukarıda verilen çalışma koşulu tanımlamalarına ilaveten güç yönetimim sekmesi ile alternatif akımda yüke sağlanacak nominal gerilim ve frekans değerleri için sırasıyla 220V ve 50 Hz seçilmiştir. Eviriciye ait çalışma koşulları tanımlarının girilmesinin ardından sistemin çalıştırılması ve izlenmesi işlemlerine geçilmiştir. Burada gerçek zamanlı çalışma durumu, sistem bileşenlerine ait elektriksel etkileşimler (gerilim, frekans ve güç) ve çeşitli hata kodları gözlemi yapılmıştır. Sonuç olarak solar FV panel grubunun elektrik ürettiği, klima tarafından elektrik tüketildiği ve şebeke ile batarya grubu bağlantılarının sağlandığı görülmüştür. Böylece GEDKS'ya ait devreye alma işlem adımı tamamlanmıştır.

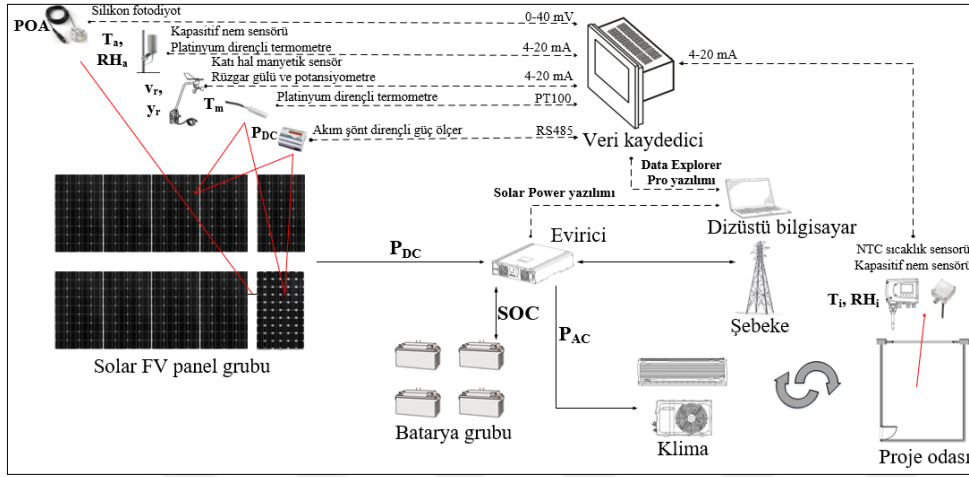
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Mühendislik uygulamaları kapsamında oluşturulan çeşitli sistemlerin çalışma performansını belirlemek için kurulan modeller gerçek koşulları yansıtmakta sorun yaşayabilmektedir. Bunun yanı sıra teorik hesaplar ile çalışma performansının değerlendirilmesi sırasında bazı kabuller göz önünde bulundurulmaktadır. Öte yandan, deneysel çalışmalar ile sistemlerin gerçek zamanlı çalışma performansları gerçekçi bir şekilde ortaya konulabilmektedir. Bu sebeple, GEDKS'ye ait tasarım, kurulum ve devreye alma işlemlerinin tamamlanmasının ardından ölçüm sistemi tasarımı yapılmış ve GEDKS ile ölçüm sisteminin bütünleşik kurulumunun sağlanmasıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.1 ile GEDKS ve ölçüm sisteminin birlikte yer aldığı deney sistemi verilmiş olup çevresel koşulları belirleme adına dış havaya ait sıcaklık (T_a), bağıl nem (RH_a), rüzgâr hızı (v_r) ve rüzgâr yönü (y_r) ile eğimli yüzeyde küresel ışıyım şiddeti (plane of array radiation, POA) ölçümleri yapılmıştır. T_a ($^{\circ}C$) ve RH_a parametreleri belirlenirken kapasitif nem sensörü ve platinyum direnç termometrenin silindirik termoplastik bir koruyucu içinde birlikte yer aldığı bir düzenek kullanılmıştır (Deltaohm, 2019a). İklim koşulları kapsamında v_r (m/s) ve v_y ($^{\circ}K$) parametreleri ise anemometre (Davis, 2019) kullanılarak ölçülmüştür. Tüm bu ölçüm gereçleri solar FV panel grubuna mümkün olduğu kadar yakın konumlandırılmıştır (1,5 uzaklıktaki kuzey duvarı). Ayrıca, solar radyasyon şiddeti ölçümü için kullanılan piranometre solar FV paneller ile aynı eğim açısına ($37,7^{\circ}$) sahip olacak şekilde monte edilmiştir (Deltaohm, 2019b). Bu sebeple solar radyasyon şiddetinin belirlenmesi kapsamında POA değerinin ölçüldüğü bilinmelidir (sadece 2019 Aralık ve 2020 Ocak aylarında GHI ölçümü yapılmıştır).

Dış ortam koşullarına ait ölçümlerin gerçekleştirilmesinin yanında Şekil 5.1 ile gösterildiği gibi birer adet tekli ve çoklu kristalin solar FV panele ait modül sıcaklıkları (T_m) ve güç üretim değerleri ($P_{PV,DC}$) de ölçülmüştür. Bu esnada T_m ($^{\circ}C$) ön cam yüzeyi ve arka modül yüzeyine konumlandırılmış yüzey tipi PT100 sensörleri vasıtasıyla belirlenmiştir (Penta, 2019). Bu sensörler solar FV panellere ait ön cam yüzeyine mengene yardımı ile arka modül yüzeyine ise alüminyum bant

ile sabitlenerek sürekli temas sağlanmıştır. Dış ortam koşullarından T_m ölçümlerinin etkilenmemesi için ise sensörler yalıtkan malzemeyle kaplanmıştır. Solar FV panellere ait $P_{PV,DC}$ (W) değerleri 100 A/60 mV şönt dirence sahip pano tipi güç ölçerler ile belirlenmiştir (Kael, 2019). Deneysel çalışmalar kapsamında proje odasına ait konfor parametrelerinin takibi de yapılmıştır. Bu esnada proje odası iç hava sıcaklığı (T_i) ve bağıl nemi (RH_i) dört farklı noktadan iki farklı mikroişlemci vericisi kullanılarak ölçülmüştür (Testo, 2019a; Testo, 2019b).



Şekil 5.1. Deney sistemi.

Yukarıda tanımlanan sensörler tarafından ölçülen her bir parametrenin sürekli olarak okunması, kaydedilmesi ve analiz edilebilir formatta elde edilmesi için Şekil 5.1 de yer alan veri kaydediciler ve ilgili yazılımları ile kullanılmıştır. Dış ortam koşulları, proje odasına ait konfor parametreleri ve iki adet solar FV panele ait modül sıcaklıkları 24 kanallı endüstriyel kayıt ve kontrol cihazı tarafından sürekli olarak bir dakika aralıklarla okunarak kaydedilmiştir. İlgili veri grubunun analiz edilebilir formatta elde edilebilmesi için ise Data Explorer Pro yazılımı kullanılmıştır (Elimko, 2019a). Bu kapsamda öncelikli olarak veri kaydedici ile şebeke arasındaki elektriksel bağlantı ve güvenlik amaçlı topraklama bağlantısı yapılmıştır. Ardından ölçüm gereci – veri kaydedici arasındaki kablolama çalışmalarına geçilmiştir. Bu noktada ölçüm gereçlerinden gelen kabloların veri kaydedici üzerindeki hangi tip ve sıradaki kanala karşılık geldiği dikkatli bir şekilde tanımlanmıştır. Bu tanımlama sırasında ölçüm gerecine ait ölçüm aralığı, veri kaydedici girişi ve ölçüm prensibi göz önünde bulundurulmuştur. Örneğin, T_a ölçüm aralığı için -40 ile 80 °C tanımlanmışken, veri kaydedici girişi 4–20 mA

olarak ele alınmıştır. Ölçüm prensibi ise bağıl direnç değişimine bağlı olarak gerçekleşen sıcaklık değişimi şeklindedir. Endüstriyel kayıt ve kontrol cihazının yanında Şekil 5.1 de yer alan bir diğer veri kaydedici GEDKS ana bileşenleri içerisinde yer alan eviricidir. Evirici tarafından DC/AC ve DC/DC dönüşümünün gerçekleştirilmesinin yanı sıra sistem bileşenleri arasındaki elektriksel (gerilim, akım, güç, vb.) etkileşimler de sürekli bir şekilde kaydedilmiştir. Bu kapsamda şebekeye ait gerilim ve frekans değerleri, solar FV panel grubu tarafından üretilen DC gerilim ve DC güç değerleri, klima tarafından tüketilen AC güç değeri, batarya grubuna ait şarj akımı ve SOC değerleri sürekli olarak bir dakika veri aralıklarıyla kaydedilmiştir. İlgili veri grubunun analiz edilebilir formatta elde edilebilmesi için ise Solar Power yazılımı kullanılmıştır (Abax, 2019).

Deneysel çalışmalar kapsamında Şekil 5.1 ile verilen ölçüm sistemine ek olarak sistem bileşenleri içerisinde yer alan klimaya ait soğutma çevrimi ile hava tarafına ait sıcaklıklar ekserji analizleri göz önünde bulundurulduğunda Şekil 5.2 ile verilen işlemlerin uygulanmasıyla ölçülmüştür. Bu kapsamda öncelikle ek bir bakır boru her iki ucunda rakorlar kullanılarak hazırlanmıştır. Ardından, debimetre bu bakır boru aracılığıyla soğutucu akışkanın % 100 sıvı olması beklenen yoğunlaştırıcı çıkışı- kısma vanası girişi arasına kaynak yöntemi ile monte edilmiştir. Debimetrenin akış ölçümüne başlaması için gerekli olan sıfırlama işlemi için ise klimada mevcut olan yoğunlaştırıcı giriş ve çıkış vanaları ile debimetre transmitteri kullanılmıştır (Rheonik, 2018). Ek bakır boru üzerine soğutucu akışkan fazını takip etmek için gaz gözü ve soğutucu akışkana ait yüksek basınç hortumunun bağlanmasına olanak vermesi için inyon montajı kaynak yöntemi ile yapılmıştır. Alçak basınç hortumu bağlantısının yapılması için ise T bağlantı Şekil 5.2 ile gösterildiği gibi kaynaklanmıştır. Bakır boru hattı üzerine inyon ve T bağlantı aparatı ile bağlanan basınç hortumlarının diğer uçları dijital manifold cihazına bağlanmıştır (Testo, 2019c). Bu bağlantıların gerçekleştirilmesinin ardından 1 saat süren vakumlama işlemi yapılmış ve hazırlanan ek bakır boru ile T bağlantı aparatı için sızdırmazlık kontrolü gerçekleştirilmiştir. Fazla bakır boru kullanımını dikkate alarak 905 gr R410A soğutkan şarjı da bu adımda sağlanmıştır. Son olarak soğutucu akışkan tarafında 6 (kompresör giriş/çıkış, yoğunlaştırıcı giriş/çıkış, buharlaştırıcı giriş/çıkış), hava tarafında 4 (yoğunlaştırıcı giriş/çıkış, buharlaştırıcı giriş/çıkış) adet

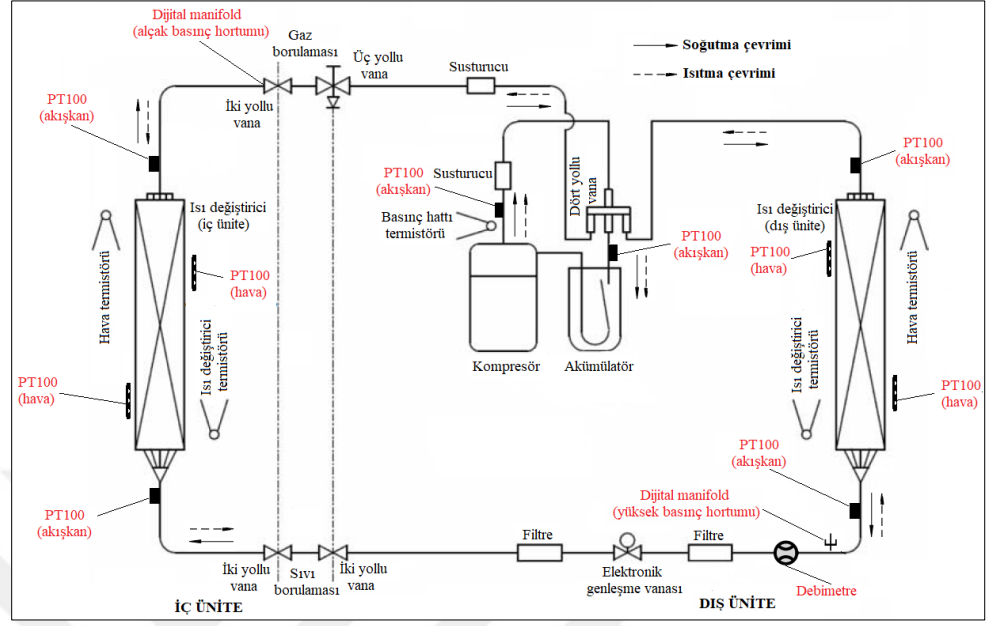
PT100 sıcaklık sensörü kullanılmış olup akışkan tarafı sıcaklık sensörleri izole malzemelerle kaplanmıştır (Elimko 2019b; Penta 2019).



Şekil 5.2. Deneysel çalışmalar kapsamında klimaya uygulanan işlemler.

Yukarıda verilen Şekil 5.2 ile gerçekleştirilen işlem adımları sırasında kullanılan tüm ölçüm sensörlerinin ısıtma ve soğutma çevrimi üzerindeki konumları aşağıda Şekil 5.3 ile kırmızı renk ile isimlendirilerek gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere soğutma ve ısıtma çevrimleri bir arada düşünüldüğünde soğutucu akışkan tarafı sıcaklıklarına ait buharlaştırıcı, yoğuşurucu ve genleşme vanasına ait giriş ve çıkış tanımlamaları tam tersi şeklinde yapılmalıdır. Ayrıca, her iki çevrimde buharlaştırıcı ve yoğuşurucu da yer değiştirecektir. Hava tarafına (buharlaştırıcı ve yoğuşurucu) ve kompresör için soğutucu akışkan tarafına ait sıcaklık giriş ve çıkış tanımlamaları aynı kalmakla birlikte her iki çevrimde yine buharlaştırıcı ve yoğuşurucu için yer değişikliği söz konusudur. GEDKS ölçüm sistemi ile benzer şekilde tüm sıcaklık sensörleri ve debimetre ile elde edilen ölçümlerin sürekli olarak okunması, kaydedilmesi ve analiz edilebilir formatta elde edilmesi için 12 kanallı endüstriyel kayıt ve kontrol cihazı ile Data Explorer Pro yazılımı birlikte kullanılmıştır (Elimko, 2019a). Debimetre tarafından sadece soğutma çevrimi için ölçülen soğutucu akışkana ait kütleli debi (kg/min), mekanik ve elektriksel bağlantının yapıldığı transmitter sayesinde 4-20 mA sinyaline dönüştürülerek veri kaydediciye gönderilmiştir (Rheonik, 2018). Basınç ölçümleri ise endüstriyel kayıt ve kontrol cihazından ayrı olarak dijital manifold belleğine

kaydedilmiştir ve cihaza ait EasyKool yazılımı kullanılarak bir dakika aralıklı veri grubu olarak elde edilmiştir (Testo, 2019c).



Şekil 5.3. Klima tarafı ölçüm aletlerinin yerleşimi.

6. MODELLEME VE BENZETİM ÇALIŞMALARI

Mühendislikte yer alan karmaşık ve/veya birbiri ile bağıntılı değişkenlerin modellenmesi, benzetimi ve en uygun değer ile çözümlenmesi gerçekleştirilirken bilgi teknolojisi uygulamalarının yanında kullanıcı dostu ara yüze sahip, zaman açısından avantaj sağlayan ve mümkün mertebe hatasız çözüm sunan yazılım paket programları ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır (Klemens, 2011). Bu programların kullanılması ile deneysel çalışmalar sırasında yaşanabilecek veri kaybı ve/veya veri gruplarının eş zamanlı olarak elde edilememesi gibi problemlerin önüne geçilebilmektedir. Ayrıca, sistemlere ait çalışma performansını etkileyen parametreler bireysel olarak diğer parametrelerin sabit tutulması ile kolaylıkla belirlenebilmektedir. Bu avantajlarından ötürü günümüzde birçok alanda çeşitli yazılım paket programları geliştirilmiş olup bu tez çalışması sırasında solar FV sistemler için sıklıkla kullanılan PVSOL ve TRNSYS programları ile soğutma ve ısıtma çevrimi için kullanılan Pack Calculation Pro programına yer verilmiştir (Pack Pro, 2020; PVSOL, 2020; TRNSYS, 2020). Her bir program ile gerçekleştirilen modelleme ve benzetim çalışmaları sırasında GEDKS bileşenleri ve sistem kurulumuna ait başlıca özellikler programlara ait işlem adımlarında tanıtılmış ve elde edilen benzetim sonuçları deneysel çalışmalarla test edilerek en uygun modeller belirlenmiştir. Aşağıda her bir programın kullanılması sırasında uygulanan temel işlem adımları ile test çalışmalarına ait bilgiler yer almaktadır.

6.1 PVSOL Paket Programı

PVSOL yazılım paket programı şebekeye bağlı solar FV sistemlerin kolay ve hızlı tasarımı ile ekonomik verimlilik tahmini için kullanılan bir benzetim programıdır. Sistem bileşenlerinin (solar FVpanel, batarya ve evirici) üretici firmalar tarafından sürekli olarak güncellendiği bu program ile otomatik en iyi evirici yapılandırması, çatı uygulamalarında otomatik solar FV panel grubu yerleşimi ve harita tabanlı sistem kurulumunun sağlanması gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca, şebekeye bağlı solar FV sistemler farklı yük profilleri ve batarya seçenekleri ile kullanılabilen olup ekonomik verimlilik tahmini için şebekeye besleme tarifi (fit in tariff, FiT) ve mahsuplaşma (net metering) durumları dikkate alınabilmektedir. Bu tez çalışması sırasında PVSOL

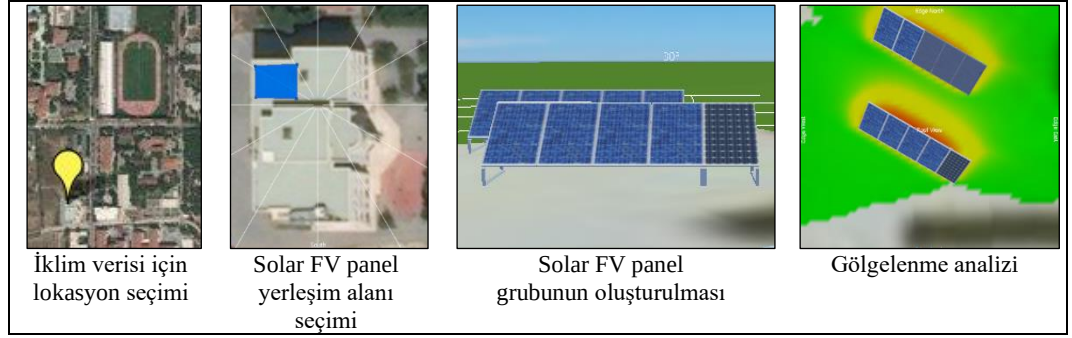
paket programı yıllık enerji analizleri kapsamında kullanılmış olup uygulanan işlem adımları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- i. Proje bilgilerinin girilmesi,
- ii. Sistem tipi, tasarım tipi, iklim verisi ve benzetim parametrelerinin belirlenmesi,
- iii. Tüketime neden olan yük profilleri ve ekipmanların tanımlanması,
- iv. Harita tabanlı üç boyutlu görüntüleme ile sistem tasarımının gerçekleştirilmesi,
- v. Solar FV panel tipi ile montaj kıstaslarının tanımlanması,
- vi. Batarya grubu, evirici tipi ve kablolama seçeneklerinin belirlenmesi,
- vii. Benzetim ve analiz çalışmalarının gerçekleştirilmesi.

Yukarıdaki maddeler ile görüleceği üzere PVSOL paket programı arayüzünde yer alan ilk işlem adımı proje bilgilerinin girilmesidir. Bu adımda proje numarası, proje tasarımcısı, müşteriye ait sorumlu kişi, şirket ve iletişim bilgileri ile projeye ait temsili fotoğraf ve proje kısa tanımı yer almaktadır. Bu bilgilerin programa girilmesinin ardından ikinci işlem adımında sistem tipi “*elektriksel ekipmanların ve batarya grubunun yer aldığı şebeke bağlantılı solar FV sistem*” olarak seçilmiştir. Tasarım tipi olarak “*üç boyutlu tasarım*” işaretlenmiştir. İklim verisi için ise ülke ve şehir seçimi ya da harita tabanlı konum seçimi yapılabilmektedir. Bu kapsamda solar FV panel grubunun yer aldığı Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği binası çatısına ait konum seçimi yapılmıştır. Bu sayede program tarafından 1991-2010 yılları arasında Çiğli’de ve Menderes’te yer alan ölçüm istasyonu değerlerini temel alan tahmini bir iklim veri grubu oluşturulmuştur. Bu işlem adımında kullanıcı tanımlı iklim veri grubunun oluşturulması da mümkün olduğu gibi benzetim parametreleri (şebeke koşulları, birimler, program dili, vb.) de belirlenebilmektedir. Üçüncü işlem adımında ise sistemin enerji tüketimi kısmında yer alan *klimaya ait aylık yük profilleri*, yıllık toplam enerji tüketimi (907 kWh) ve dış ortam sıcaklık değerlerini kullanarak oluşturulmuştur (Daikin, 2019; MGM, 2020). Bu sırada ısıtma fonksiyonuna ait

yıllık toplam 740 kWh enerji tüketimi değeri ısı pompası kabulü ile yeni yük profili olarak programa tanıtılmış ve program tarafından bu değer aylık yük profilleri şeklinde oluşturulmuştur. Soğutma fonksiyonuna ait yıllık toplam 167 kWh enerji tüketimi ise soğutmanın gerçekleştirildiği (haziran, temmuz ve ağustos) aylara ait yük profili şeklinde dış ortam sıcaklık değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. Bunun sonucunda ısıtma ve soğutma fonksiyonlarının birlikte ele alındığı durumda aylık yük profilleri % 16,54 (ocak), % 14,94 (şubat), % 12,69 (mart), % 5,5 (nisan), % 5,69 (mayıs), % 7,25 (haziran), % 7,69 (temmuz), % 7,15 (ağustos), % 1,83 (eylül), % 5,69 (ekim), % 5,5 (kasım) ve % 9,54 (aralık) olarak belirlenmiştir. Dördüncü işlem adımında *harita tabanlı üç boyutlu görüntüleme* ile sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu esnada öncelikle Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği binası konumu seçilerek sistem kurulum alanı *sketch a 3D polygon* komutu ile çatı üzerinde belirlenmiştir. Ardından bu alan *extrude 3D object* komutu ile 28 m yükseltilecek üç boyutlu model oluşturulmuştur. Bu modele ait kurulum alanı *activate* ve *add to coverable objects* komutları kullanılarak solar FV paneller ile kaplanabilir hale getirilmiştir. Bunun sonrasında program kütüphanesinden GEDKS bileşenleri içerisinde yer alan solar FV panellerin seçimi yapılmıştır (Yingli Solar, 2019; CSUN, 2019). Solar FV panellerin yerleşimi sırasında ise deneysel çalışmalarda olduğu gibi azimut (30 °) ve eğim (37,47 °) açılarına yer verilmiştir. Ayrıca, solar FV panellerin çatı üzerindeki yerleşimi, çatı duvarları ile panellerin birbiri arasındaki mesafelerin gözetilmesiyle sistem kurulumu ve devreye alma bölümünde belirtildiği haliyle ele alınmıştır (Bkz. Bölüm 4.2). Solar FV panellerin seçimi ve yerleşiminin ardından ise sistem konfigürasyonu kısmına geçilerek evirici seçimi yapılmıştır. Bu kapsamda doğru akım tarafında gücü 3 kW, nominal gerilimi 360 V ve maksimum güç noktası gerilim aralığı 250-500 V olan bir model seçilmiştir (Abax, 2019). Ardından tüm solar FV panellerin birbirine seri bağlanması (1 dizi) ve maksimum güç noktasının “1” olarak seçilmesi ile üç boyutlu modelleme kısmı tamamlanmıştır. Beşinci işlem adımında batarya grubu dört adet 165 Ah kapasite ve 12 V nominal gerilime sahip modelin kullanılmasıyla belirlenmiştir. Seçilen bataryaya ait SOC değeri ise % 50 – % 90 aralığında değişiklik göstermekte olup kullanılabilir batarya enerjisi 3,2 kWh’dir (SSB, 2019). GEDKS bileşenlerine ek olarak toplam kablo kaybı hesabı kesit alanı (4 mm²) ve toplam uzunluk (23 m) bilgilerinin girilmesi sonunda belirlenmiştir. Tüm bu

adımların tamamlanmasının ardından benzetim ve analiz aşamasına geçilmiştir. Şekil 6.1 ile uygulanan işlem adımlarına ait bazı görseller sunulmuştur.



Şekil 6.1. PVSOL programı işlem adımlarına ait bazı görseller.

6.2 TRNSYS Paket Programı

6.2.1 Potansiyel modellerin incelenmesi

TRNSYS, kojenerasyon, solar FV, rüzgâr türbini, solar termal, ısı pompası, iklimlendirme, hidrojen ve hidronik sistemlerin modellenbildiği ve zamana bağlı benzetim çalışmalarının yapılabildiği genişletilebilir işlem çevresine sahip bir yazılım paket programıdır. Program açık kaynak kodlu modüler yapıdadır ve geliştirilmiş birçok model sürekli güncellenerek kullanıcılarla paylaşılmaktadır. Bu sayede kullanıcılar açık kaynak kodlu modeller ile gerçekleştirdikleri özel çalışmaları TRNSYS ortamında bütünleştirebilmektedir. Ayrıca, TRNSYS birçok programlama dili (C, C++, FORTRAN, PASCAL, vb. leri) tabanlı çalışabilmekte olup diğer uygulama programlarıyla (MS Excel, MATLAB, COMIS, vb. leri) interaktif olarak iletişim kurabilmektedir. En genel anlamda TRNSYS; (i) benzetim stüdyosu, (ii) benzetim motoru – TRNDll.dll, (iii) benzetim motorunun işlenebilir kodu – TRNExe.exe, (iv) bina ara yüzü veri işleyicisi-TRNBuild.exe ve (v) tekrar kullanılabilir programların oluşturulduğu TRNSED uygulamaları – TRNEdit.exe olmak üzere beş temel kısımdan meydana gelmektedir. Sistem modelleme ve zamana bağlı benzetim çalışmaları sırasında öncelikle proje türünün belirlenmesi ve proje kapsamında seçilen modellerin grafiksel olarak benzetim stüdyosuna aktarımı sağlanmaktadır. Bu sırada seçilen her bir model (tip+sayı şeklinde tanımlı) için program tarafından benzetim motorunda bir matematiksel ifade, benzetim stüdyosunda ise bir proforma karşılığı oluşturulmaktadır. İlaveten, benzetim stüdyosu benzetim motoru için modelleri ve bunların birbiri ile etkileşimlerini

açıklayan “deck file” isminde bir girdi dosyası da üretmektedir. Matematiksel ifadeler FORTRAN, C, C++ vb. programlama dillerinde oluşturulmuş modelin çalışma prensibini belirleyen eşitliklerdir. Proforma ise TMF (TRNSYS model file) olarak isimlendirilen modele ait parametre, girdi, çıktı ve dış dosya (mevcut ise) tanımlarının yapıldığı kara kutu gösterimidir. Bir başka deyişle proforma matematiksel ifadeler için oluşturulmuş benzetim stüdyosunda yer alan arayüz işlecidir ve modellerin kullanılabilmesi için tam ve eksiksiz olarak tanımlanmalıdır. Bu işlemin ardından modeller arasındaki etkileşimler girdi-çıkı ilişkisi şeklinde ortaya konulmalıdır. Son olarak izlenecek özelliklerin gözlemlenmesini sağlayan çıktı modellerinin kullanılması ile analiz sonuçları yorumlanabilmektedir (TRNSYS, 2020).

Temel çalışma mantığı yukarıda açıklanmış olan TRNSYS programı bu tez çalışması sırasında yıllık enerji, yıllık geleneksel/ileri ekserji, yaşam boyu ekonomik ve geleneksel/ileri eksergi-ekonomik analizlerin gerçekleştirilmesi kapsamında kullanılmıştır. Bu esnada öncelikle benzetim stüdyosunda yer alan geleneksel ve termal enerji sistemleri uzmanları tarafından hazırlanmış olan TRNSYS modelleri GEDKS bileşenleri dikkate alınarak incelenmiştir. Bu inceleme sırasında iklim veri işleyicileri, bina modelleri, elektriksel bileşen (solar FV paneller, evirici, bataryalar) modelleri, klima modelleri ve muhtelif modeller (klima için kontrol ve çalışma profili düzenleyici modelleri, çeşitli eşitlik modelleri, birim değiştirici modeli, vb.) bir arada değerlendirilmiş ve Çizelge 6.1 ile verilen potansiyel TRNSYS modelleri belirlenmiştir. Modellerinin belirlenmesinin ardından her bir modele ait proforma tanımına parametre kısmından başlanmıştır ve GEDKS bileşen özelliklerinden yararlanılarak yapılan tanımlamalar ile modeller boyutlandırılmıştır. Örneğin, basit solar FV panel modeline (tip 103b) ait parametre kısmı için 14 farklı tanım yapılmıştır. Bunlar parantez içinde değerleri ile birlikte: (i) maksimum güç noktası izleme modu (1), (ii, iii) referans ve maksimum güç noktası koşullarında açık devre gerilimleri (37,64 V ve 29,89 V), (iv, v) referans ve maksimum güç noktası koşullarında kısa devre akımları (8,91 A ve 8,38 A), (vi, vii) referans T_m (25 °C) ve referans GHI (1 kW/m²), (viii, ix) referans kısa devre akımı ve açık devre gerilimi için sıcaklık katsayıları (0,005 A/K ve -0,123 V/K), (x, xi) seri ve paralel bağlı panel sayıları (10 ve 0), (xii, xiii, xiv) nominal çalışma

koşullarında T_m (45,9 °C), modül alanı (1,63 m²) ve hücre sayısı (60) şeklindedir. Parametre tanımı işlemi proje odası için kullanılan çoklu mahal modeli (tip 56) hariç tüm modellerde benzer şekilde uygulanmıştır. Tip 56 için ise proformada yer alan parametre tanımı yerine yeni bina projesi (çoklu mahal) seçimi yapılarak ilk iki adımda binaya ait komşu mahallerle birlikte yerleşim planı belirlenmiş ve her bir mahal boyutlandırılmıştır. Diğer işlem adımları kapsamında ise dış duvarlara ait pencere/duvar oranı, bina yönü ve konumu ile sızıntı, havalandırma, ısıtma, soğutma, iç kazançlar, aydınlatma ve gölgelenme durumları sırasıyla belirlenmiştir.

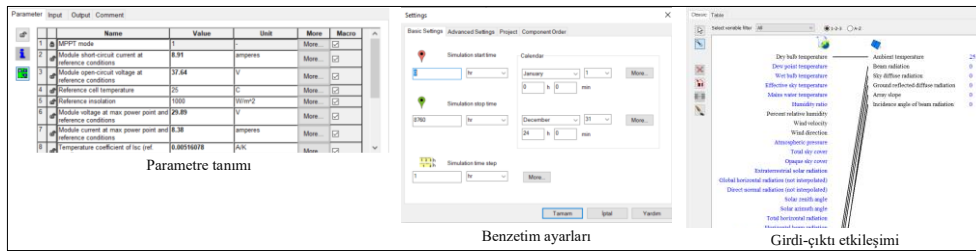
Çizelge 6.1. İncelenen TRNSYS modelleri.

Bileşen	TRNSYS modeli	Tanım	Özel not
Solar FV panel grubu	Tip 103b Tip 190c	Basit model Gelişmiş model	Sadece kristalin solar FV paneller Tüm solar FV paneller
Evirici	Tip 48b, 48c Tip 175	Çoklu çıkış Tekli çıkış	b: SOC, c: SOC-SOV (gerilim durumu) gözlemleme
Batarya grubu	Tip 47a, 47b, 47c	Giriş kaynağı güç a: basit model b, c: gelişmiş model	b, c: hücre seviyesinde şarj akımı ve gerilimi bilgisi, c: iteratif hesaplamalar için tolerans bilgisi
Şebeke	Tip 96 Tip 188a	Kullanım oranı modeli AC barası modeli	
Klima	Tip 119c Tip 144 Tip 954c, 922c Tip 964 Tip 966	Hava kaynaklı ısı pompası Split klima Hava kaynaklı ısı pompası Tek hızlı klima Hava kaynaklı ısı pompası	Yardımcı ısıtıcı ekipmanı yok Bir, iki kademeli katalog verisi temelli DOE-2 katalog verisi temelli
Bina (proje odası)	Tip 19 Tip 56 Tip 88 Tip 759	Detaylı basit mahal modeli Çoklu mahal modeli Toplu kapasite modeli Basit bina modeli	Yön etkisi tanımı
İklim veri işleyici	Tip 15-6 Tip 99	Standard format Kullanıcı tanımlı format	Dış dosya gereksinimi Dış dosya gereksinimi
Muhtelif modeller	Tip 44, 166, 1502, 1503, 108, 698 Tip 62, 66, 155 Tip 57 Tip 14, 41 Tip 65a	Kontrol modelleri Diğer programları çağırma modelleri Birim dönüştürücü modeli Çalışma profili modelleri Çevrimiçi çizici modeli	Klima için geçerli Ekserji analizleri için geçerli Klima için geçerli Eş zamanlı veri dosyası oluşturma

Yeni bina projesi kısmında gerçekleştirilen işlem adımları sonrasında TRNBuild (bina ara yüzü veri işleyicisi) programı vasıtasıyla oluşturulan yeni bina projesine ait yapı tipleri (katman, duvar, pencere, vb.), çalışma saatleri (hafta sonu, hafta içi, vb.), rejimler (sızıntı, havalandırma, iç kazançlar, vb.) ve mahaller (ofis, mutfak, vb.) tekrar düzenlenmiştir. Bu sırada proje odasına ait yerleşim planı ve yapı özelliklerine ek olarak (Bkz. Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1) her bir mahala ait kullanım durumu kabulleri yapılmıştır. Proje odası ve toplantı odası için sırasıyla hafta içi hergün 5 saat (08:00-10:00 arası 1 kişi, 13:00-14:00 arası 2 kişi, 14:00-

16:00 arası 1 kişi) ve 2 saat (10:00 - 12:00 arası 3 kişi), ofisler ve mutfak için ise sırasıyla 2 ve 1 kişi tarafından hafta içi hergün 10 saat (08:00 - 18:00 arası) kullanım durumu ele alınmıştır. Aydınlatma ve elektriksel ekipman kaynaklı iç yükler mahal kullanım tipi (mutfak, ofis, toplantı odası) seçilerek alan temelli tanımlanmıştır. Sızıntı proje odası, ofisler ve mutfak için zayıf (0,2 l/h) kabul edilmiştir. Havalandırma ise yukarıda tanımlanan mahallere ait kullanım durumları boyunca proje odası, ofisler ve mutfak için kişi başı 10 l/s hava debisini temel alarak sırasıyla 144, 72, 36 m³/h kabul edilmiştir (ASHRAE, 2001). Isıtma ve soğutma proje odası için dönüş havasına, ofisler ve toplantı odası için ise ayar sıcaklığına bağlı oluşturulmuştur.

Her bir modele ait proformada yer alan parametre tanımları ile modellerin boyutlandırılmasının ardından yine proformada yer alan giriş, çıkış ve dış dosya (mevcut ise) kısımları ele alınmıştır. Örneğin, basit solar FV model (tip 103b) için 6 farklı giriş değişkeninin (T_a , çeşitli ışınım bileşenleri, panel eğim açısı, vb.) tanımlanması ile 10 farklı çıkış değişkeninin (güç, gerilim, akım, verim, vb.) üretilebildiği görülmüştür. Giriş değişkenlerinin tamamının iklim verisi ile ilişkili olduğu ve tip 15-6 standart veya tip 99 kullanıcı tanımlı formatlı iklim veri işleyicisi modellerinin kullanılması gerektiği, çıktı değişkenlerinin ise tamamen güç üretimi göstergelerini kapsadığı ve bu göstergelerin izlenmesi ve kaydedilmesi için çıktı modeline (tip 65a) gereksinim duyulduğu belirlenmiştir. Ayrıca, proformada yer alan dış dosya kısmının iklim veri işleyicisi ve klima modelleri için mevcut olduğu görülmüştür. Parametre, giriş, çıkış ve dış dosya (mevcut ise) tanımları sonrasında ise modeller arası etkileşimler (bir modele ait çıktı - diğer modele ait girdi) belirlenmiş ve benzetim ayarlarının yapılması (zaman periyodu ve adımı) ile program çalıştırılmıştır. Şekil 6.2 ile uygulanan işlem adımlarına ait bazı görseller sunulmuştur.



Şekil 6.2. TRNSYS programı işlem adımlarına ait bazı görseller.

6.2.2 TRNSYS bileşen modellerin deneysel çalışmalar ile test edilmesi

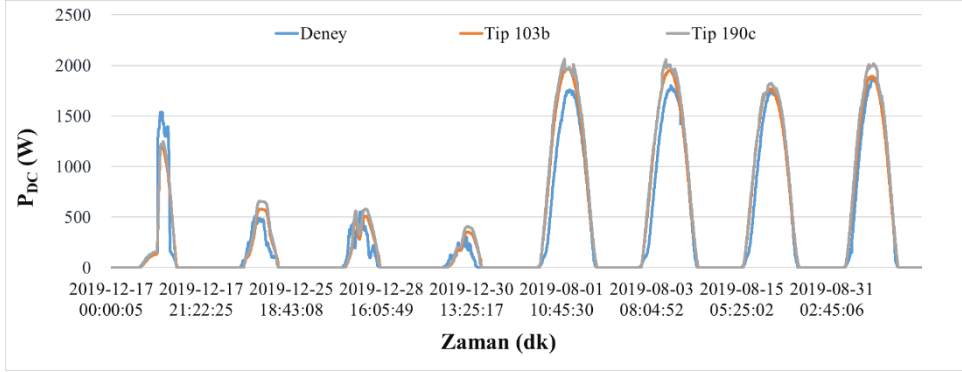
Potansiyel TRNSYS modellerinin belirlenmesi, boyutlandırılması ve girdi-çıkış ilişkilerinin tanımlanmasının ardından deneysel çalışmalar ile test edilerek en uygun modeller seçilmiştir. Bu kapsamında ilk olarak basit ve gelişmiş solar FV panel modelleri (tip 103b ve tip190c) ele alınmıştır. Hem kış (Aralık 2019) hemde yaz (Ağustos 2019) sezonunda açık gökyüzü koşullarına sahip örnek günler bir dakika aralıklı veri grubu kullanımı altında incelenmiştir. Bu esnada iklim veri işleyicisi olarak kullanıcı tanımlı format (tip 99) kullanılmış ve proformada yer alan dış dosya kısmında deneysel çalışmalar ile elde edilen T_a , RH_a , v_r , y_r , ve GHI değerleri tanımlanmıştır. 2019 Aralık ayı boyunca sadece dört farklı gün (17, 25, 28 ve 30 Aralık) kısmen açık gökyüzü koşulu gerçekleşmiştir ve tüm ay boyunca GHI değeri ölçülmüştür. 2019 Ağustos ayı boyunca ise 16 gün (1, 3, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 18, 19, 22, 23, 24, 29, 30 ve 31 Ağustos) tamamen açık gökyüzü koşulu gerçekleşmiş olup tüm ay boyunca POA ölçümü yapılmıştır. Bu nedenle, tip 99 için gerekli olan GHI değerleri Meteonorm programı kullanılarak elde edilmiştir (Meteonorm, 2020). Meteonorm programı ile GHI ve POA değerleri aynı anda üretildiğinden ötürü deneysel çalışmalar ile elde edilen POA değerleri ile eşitlik (18) de verilen kök ortalama kare hatası (root mean square error, RMSE) kullanılarak bir karşılaştırma yapılmıştır (Shukla et al., 2015). Bunun sonucunda neredeyse tipik meteorolojik yıl davranışı sergileyen ve en düşük RMSE değerlerine sahip olan 4 gün (1, 3, 15 ve 31 Ağustos 2019) karşılaştırma için seçilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{x=1}^n (x_{num} - x_{den})^2} \quad (18)$$

Eşitlik (18) de yer alan n örnek sayısını, x_{num} ve x_{den} ise sırasıyla nümerik ve deneysel çalışmalar sırasında gözlemlenen parametreleri belirtmektedir. Örneğin, yaz koşullarında 2019 Ağustos ayı boyunca POA gözlemi yapılmıştır ve 1, 3, 15 ve 31 Ağustos günleri için sırasıyla 42,11 W/m²/W/m², 38,98 W/m²/W/m², 43 W/m²/W/m², 43,31 W/m²/W/m² değerleri hesaplanmıştır.

Kış ve yaz koşullarında belirlenen sekiz örnek güne ait deneysel ve nümerik çalışmalar ile belirlenen solar FV paneller tarafından üretilen güç değerleri aşağıda Şekil 6.3 ile verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, tip 190c modeli ile tüm günlerde tip 103b modeline kıyasla daha fazla enerji üretimi gerçekleşmiştir. 2019 yılı Aralık

ve 2019 yılı Ağustos aylarına ait örnek günler için tip 190c ile sırasıyla 11,7 kWh ve 64,4 kWh, tip 103b ile ise 10,6 kWh ve 60,9 kWh değerlerinde elektrik enerjisi üretimi modellenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında ise aralık ve ağustos aylarına ait örnek günlerde 10 kWh ve 53 kWh tutarında bir enerji üretimi ölçülmüştür. Toplam enerji üretimi değerlerinin yanısıra *RMSE* değerleri, tip 103b ve tip 190c için kış koşullarında sırasıyla 247,7 kWh/kWh ve 269 kWh/kWh, yaz koşullarında ise 974,5 kWh/kWh ve 1.024,4 kWh/kWh olarak elde edilmiştir. Bu durumda tip 103b ile gerçek zamanlı deney koşullarının daha başarılı bir şekilde modellediği görülmüştür. Kış koşullarında her iki model ile deneysel çalışmalarla elde edilen üretim değerlerine daha yakın benzetim sonuçları elde edilmiştir. Her iki modele ait *RMSE* değerleri de yine kış koşullarında daha düşük mertebelerde oluşmuştur. Bunun sebebi tip 99 modeline ait dış dosyanın kış koşulları altında tamamen deneysel çalışmalarla elde edilen iklim veri grubu ile tanımlanması olarak belirlenmiştir.



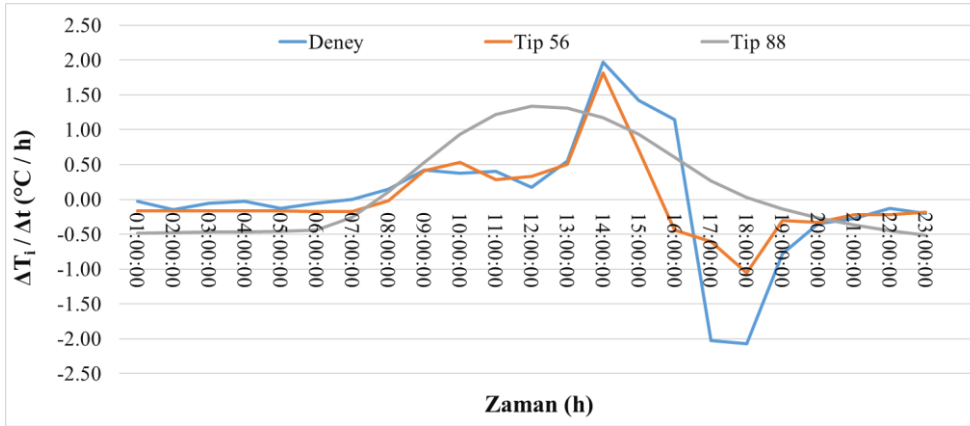
Şekil 6.3. Solar FV panel modellerin deneysel çalışma sonuçları ile testi.

En uygun solar FV panel modelinin belirlenmesinin ardından GEDKS bileşenleri içerisinde yer alan evirici ve batarya grubu için kullanılan TRNSYS modelleri incelenmiştir (Bkz. Çizelge 6.1). Evirici için tekli veya çoklu çıkış kaynağına sahip toplam üç model ele alınmıştır ve GEDKS çalışma prensibi gözönünde bulundurulduğunda çoklu çıkış kaynağına (batarya grubu, klima ve şebeke) sahip modellerin kullanılması gerektiği belirlenmiştir (tip 48b ve tip 48c). Bu modeller kendi içinde incelendiğinde ise tip 48c'nin, şebekeden batarya grubu şarjına izin verdiği bulunmuştur. Hâlbuki GEDKS'nin çalışması sırasında batarya grubu sadece solar FV panel grubu tarafından şarj edilmektedir ve alternatif akımda yükün öncelikle solar FV paneller, ardından batarya grubu ve en son şebeke ile

beslenmesi sağlanmaktadır (Bkz. Bölüm 4.2). Bu nedenle, eviricinin modellenmesi için çoklu çıkış kaynağına sahip olan ve şebekeden batarya şarjına izin vermeyen tip 48b modeli seçilmiştir. Modele ait proformada yer alan parametre kısmında ise yedi farklı değişken tanımı parantez içinde değerleri ile birlikte yapılmıştır. Bunlar; çalışma modu (1-maksimum güç noktası takibi), DC/DC verim (0,94), DC/AC verim (0,92), oransal yüksek ve alçak SOC limiti (0,97 ve 0,50), oransal SOC daki şarj/deşarj limiti (0,55) ve evirici çıkış gücü (3 kW) olarak tanımlanmıştır (Abax, 2019). Batarya modelleri için ise giriş kaynağı olarak gücü temel alan tip 47a, tip 47b ve tip 47c seçenekleri dikkate alınarak bir değerlendirme yapılmıştır. Tip 47b ve tip 47c'nin proformasında yer alan parametre kısımlarında üretici firma tarafından sağlanmayan hücre seviyesinde (hücre başına maksimum şarj akımı, hücre başına maksimumdeşarj akımı, hücre başına maksimum şarj gerilimi,deşarj kesme gerilimi) ayrıntılı bilgi gerektirdiği belirlenmiştir. Öte yandan, tip 47a modeline ait proformada yer alan tüm parametre bilgileri ise üretici firma tarafından sunulmuş olup, enerji kapasitesi (2,400 Wh), paralel ve seri bağlı batarya sayıları (1 ve 4) ile şarj verimliliği (0,9) değerlerini içermektedir (SSB, 2019). Bu sebeple bu modelin batarya bileşeni için kullanılmasına karar verilmiştir.

Elektriksel bileşenlere ait en uygun TRNSYS modellerinin belirlenmesinin ardından bina (proje odası) için kullanılan modellerinin incelemesine geçilmiştir. Detaylı basit mahal modelinin (tip 19) aktif olarak artık geliştirilmediği ve yerini kullanıcı dostu arayüze sahip çoklu mahal modelinin (tip 56) aldığı belirlenmiştir. Toplu kapasite (tip 88) ve basit bina (tip 759) modellerinin ise proje odasına ait toplam ısı transfer katsayısı, sızıntı kaynaklı havaya ait kütleli debi ve iç yükleri (aydınlatma, ekipman ve kişiler) ortalama değerler şeklinde aldığı görülmüştür. İki model arasındaki tek fark ise tip 759 modeli ile komşu mahal tanımlarının da yapılabilmesi olup tüm duvar kayıpları göz önüne alınarak tip 88 modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. Öte yandan, tip 56 modelinin daha önce tanımlandığı gibi yeni bina projesi (çoklu mahal) seçimi ve TRNBuild (bina ara yüzü veri işleyicisi) programı kullanımı olmak üzere iki ana grup işlemleri kapsadığı görülmüştür. Bu esnada bina konumlandırması, binaya ait yapı detayları (duvar, pencere, kapı, vb.), farklı rejim ve farklı iç yük tanımları aynı anda yapılabilmektedir. Bu nedenle bu modelde kıyaslamaya dâhil edilmiş ve sonuç

olarak tip 56 ve tip 88 modelleri 12 Ekim-05 Kasım 2019 tarihleri arasında klimanın proje odasında çalışmadığı koşulda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile test edilmiştir. Bu esnada iklim verisi işleyicisi olarak tip 15-6 modeli kullanılmıştır. Solar FV panel modellerinin test edilmesi kapsamında uygulanan yaklaşım sergilenerek POA değeri bakımından neredeyse tipik meteorolojik yıl davranışı sergileyen ve en düşük $RMSE$ değerine ($76,98 \text{ W/m}^2/\text{W/m}^2$) sahip olan gün (20 Ekim 2019) karşılaştırma için seçilmiştir. Kullanılan modeller ile elde edilen 9 gün sonundaki (12-20 Ekim 2019) proje odası iç ortam havası sıcaklık (T_i) değişimine ait saatlik sonuçlar Şekil 6.4 ile verildiği gibi deneysel çalışma sonuçları ile test edilmiştir. Tip 88 modeline ait proformada yer alan parametre tanımı sırasında proje odasına ait tüm yüzeyler (ısı kaybı katsayısı $0,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, yüzey alanı 86 m^2) dikkate alınmış ve deneysel çalışmalarla özdeş başlangıç koşulları ($25,88 T_i$ ve $0,011 \text{ kg}_{\text{su}}/\text{kg}_{\text{kuru hava}}$) kabulü yapılmıştır. Aynı modele ait proformada yer alan giriş kısmında ise deneysel çalışmaların gerçekleştiği sıradaki dış ortam koşulları (ortalama $21,3 T_o$ ve $0,009 \text{ kg}_{\text{su}}/\text{kg}_{\text{kuru hava}}$) ile sızıntı ($8,35 \text{ kg/s}$ hava debisi) ve iç yük (250 W) kaynaklı kazançlar modele girilmiştir. Tip 56 bileşeni için ise Bölüm 6.2 de verilen kabullerden farklı olarak proje odası için havalandırma miktarı 13:00-16:00 saatleri arasında $288 \text{ m}^3/\text{h}$ kabul edilmiştir.



Şekil 6.4. Bina (proje odası) modellerinin deneysel çalışma sonuçları ile testi.

Şekil 6.4 ile açıkça görüleceği üzere tip 56 modeli ile bina konumlandırması, farklı rejim ve farklı iç yük tanımlamalarına bağlı olarak gerçek zamanlı deney koşulları daha başarılı bir şekilde modellenmiştir. Ayrıca, güneş ışıınının mevcut olmadığı zaman aralıklarında neredeyse özdeş sıcaklık değişimlerinin meydana gelmesi binaya ait yapı (duvar, pencere, kapı, vb.) detay modelinin başarılı

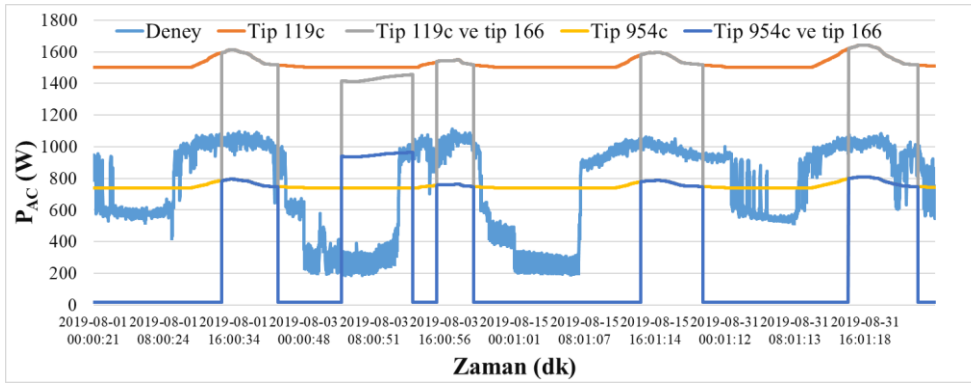
kurulduğunu göstermektedir. Bu sonuçların ardından tip 56 modelinin proje odasını için kullanılmasına karar verilmiştir.

En uygun bina (proje odası) modelinin seçilmesinin ardından TRNSYS klima modelleri incelenmiş ve beş farklı modelin geliştirildiği belirlenmiştir (Bkz. Çizelge 6.1). Bu modeller arasında yer alan split klima (tip 144) ve tek hızlı klima (tip 964) modellerinin sadece soğutma modunda çalıştığı, DOE-2 katalog verisi temelli hava kaynaklı ısı pompası modelinin (tip 966) ise proformasında yer alan parametre kısmında 36 farklı sabitin tanımlanması gerektiği görülmüştür. Bu sebeplerden ötürü bu modellerin kullanılması uygun bulunmamış ve geriye kalan tek kademeli hava kaynaklı ısı pompası modelleri (tip 119c ve tip 954c) arasında bir değerlendirme yapılmıştır. Her iki model, bina (proje odası) için belirlenen tip 56 modeli ve standart format iklim veri işleyicisi (tip 15-6) modeli ile birlikte kullanılmıştır. Modellerin testi sırasında solar FV panel modellerinde olduğu gibi neredeyse tipik meteorolojik yıl davranışı sergileyen ve en düşük *RMSE* değerlerine sahip olan 2019 Ağustos ayına ait 4 gün (1, 3, 15 ve 31 ağustos) karşılaştırma için seçilmiştir. Tip 119c modeline ait proformada yer alan parametre kısmında toplam hava debisi $0,12 \text{ m}^3/\text{s}$, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu fanlarına ait enerji tüketimi değerleri sırasıyla 18 W, 23 W olarak tanımlanmıştır. Proformada yer alan giriş kısmında ise dönüş havası özellikleri $24^\circ\text{C } T_i$, $\%50 \text{ RH}_i$ ve $554,4 \text{ kg/h}$ kütleli debi olarak tanımlanırken, dış ortam koşulları deneysel çalışmalarla elde edilen 4 gün ortalaması olan $29,58^\circ\text{C } T_o$ ve $\%43,17 \text{ RH}_o$ şeklinde girilmiştir. Tip 954c modeline ait proformada yer alan parametre kısmında ise tip 119c modeline ek olarak soğutma kapasitesi (1,89 kW (% 75) duyulur soğutma olmak üzere 2,52 kW), soğutma gücü (0,74 kW), ısıtma kapasitesi (2,84 kW), ısıtma gücü (0,7 kW) ve toplam hava debisi ($0,32 \text{ m}^3/\text{s}$) değerleri girilmiştir (Daikin, 2019). Tip 954c modeline ait proformada yer alan giriş kısmında ise tip 119c ile özdeş ifadeler yer almaktadır.

Yukarıda her iki model için verilen proforma tanımlamalarının gerçekleştirilmesinin ardından TRNSYS programı 2019 Ağustos ayına ait seçilen 4 ayrı gün için çalıştırılmıştır. Benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen klimaya ait güç tüketim değerleri ise deneysel çalışma sonuçları ile birlikte Şekil 6.5 ile verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, tip 119c modeli ile belirlenen klima güç

tüketimi değerleri deneysel çalışmaların oldukça üzerinde gerçekleşmiştir. Öte yandan, deneysel çalışmalar ile gündüz ve gece saatlerinde gerçekleşen klima enerji tüketimi ortalamasına karşılık gelen bir tüketim değerinin modellenmesi sonucunda tip 954c ile neredeyse özdeş toplam enerji tüketimi sonuçları elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar ile ölçülen dört günlük toplam enerji tüketimi 71,91 kWh iken, tip 119c ve tip 954c modelleriyle aynı örnek günler için belirlenen toplam enerji tüketimleri sırasıyla 146,44 kWh ve 72,17 kWh olarak elde edilmiştir. Bu yüzden klima bileşeni için tip 954c modelinin kullanılması daha uygun bulunmuştur.

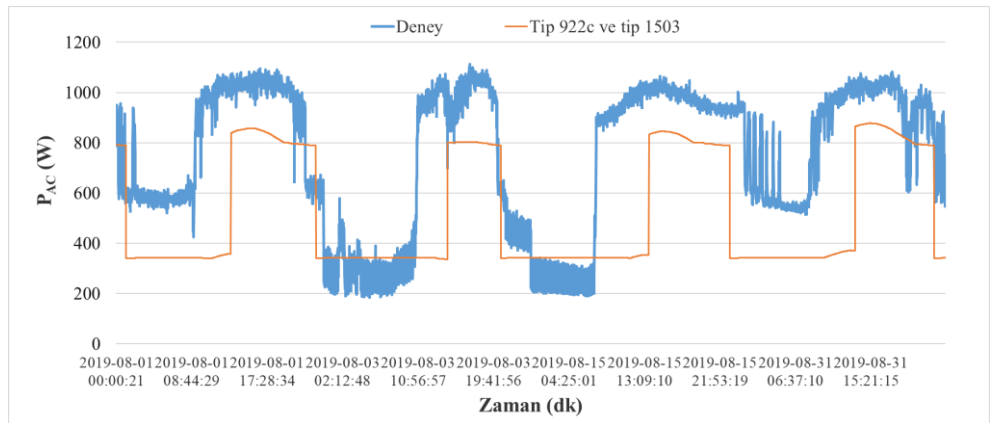
Şekil 6.5 ile irdelenen bir başka durum hava kaynaklı ısı pompası modellerinin kontrol modelleri ile kullanılması gerektiği olmuştur. Şekilden görüleceği üzere, deneysel çalışmalar ile ölçülen klima enerji tüketimi TRNSYS modellerindeki (tip 119c ve tip 954c) gibi neredeyse doğrusal değildir ve sıcaklık değişimine bağlı olarak 200 W (daha sıcak gün için 600 W) ile 1.000 W aralığında değişmektedir. Bu durum Şekil 6.5 ile sonuçları verilen ve 24 ± 2 °C aralığında çalışan açık/kapalı kontrollü basit termostat ile (tip 166) modellenmiştir. Fakat bu durumda her iki ısı pompası modeli uzun süreler boyunca kapalı kalmış ve deneysel çalışmalar ile elde edilen 71,91 kWh lik enerji tüketimi değerinden oldukça uzak benzetim sonuçları ortaya çıkmıştır (tip 119c ile 52,85 kWh, tip 954c ile 28,58 kWh). Sonuç olarak, bu yaklaşım ile klimanın çalışma prensibinin ortaya tam anlamıyla konulamadığı görülmüştür.



Şekil 6.5. Klima modellerinin deneysel çalışma sonuçları ile testi.

Klima modeli ile kontrol modelinin bir arada kullanıldığı bir diğer yaklaşımda ise tip 954c modeli kullanılarak geliştirilen, düşük ve yüksek hızlarda olmak üzere

iki kademeli çalışan ısı pompası modeli (tip 922c) ile iki kademeli basit termostat modeli (tip 1503) bütünleşik olarak kullanılmıştır. Tip 922c modeline ait proformada yer alan parametre kısmındaki değişkenler tip 954c modeli ile özdeştir ve düşük ve yüksek hız kademeleri için tekrar tanımlanmıştır. Bu kapsamda, düşük ve yüksek hız kademeleri için sırasıyla soğutma kapasiteleri 1,3 ve 3 kW, soğutma güçleri 0,38 ve 0,88 kW, ısıtma kapasiteleri 1,3 ve 4 kW, ısıtma güçleri 0,32 ve 0,98 kW ve toplam hava debileri 0,1016 ve 0,1708 m³/s olarak tanımlanmıştır (Daikin, 2019). Tip 922c modeline ait proformada yer alan giriş kısmında ise tip 954c ile özdeş tanımlamalar yapılmıştır. Diğer taraftan, tip 1503 modeline ait proformada yer alan parametre kısmında soğutma kademe sayısı 2 ve sıcaklık değişim aralığı 2 °C olarak modele girilmiştir. Bu modele ait proformanın giriş kısmında ise ayar sıcaklıkları düşük ve yüksek hız kademeleri için sırasıyla 22 °C ve 26 °C olarak belirlenmiştir. Bu tanımlamaların ardından Şekil 6.6 ile verildiği gibi tip 922c ile tip 166 modellerin birlikte kullanılması sonucu ortaya çıkan uzun süreler boyunca kapalı kalma durumunun önüne geçilmiştir (Bkz. Şekil 6.5). Ayrıca, klimaya ait zamana bağlı güç tüketim değerlerindeki değişiminin deneysel çalışmalar ile bu yeni yaklaşım modeli için benzer rejimlere sahip olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, gerçek deney koşulları bu yaklaşım sayesinde daha başarılı bir şekilde modellenmiştir ve GEDKS bileşenleri arasında yer alan klimanın modellenmesi için tip 922c ile tip 1503 modellerinin bütünleşik olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

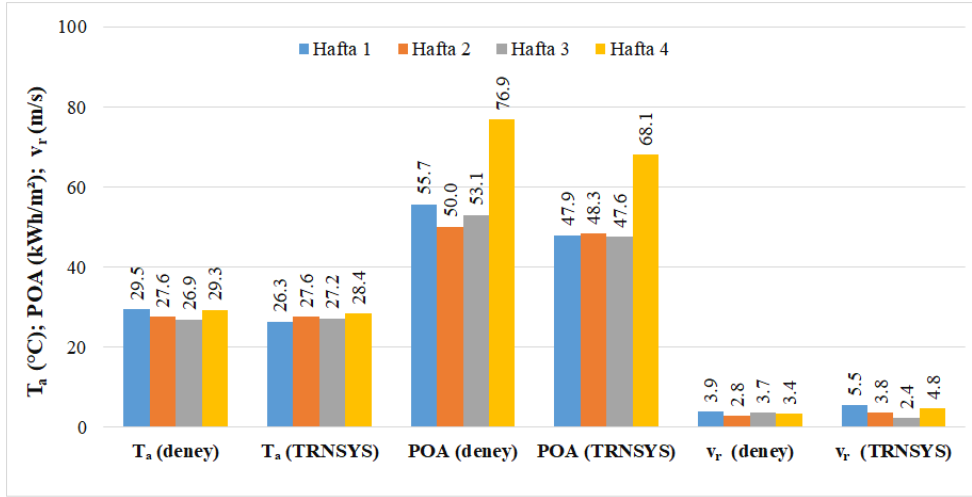


Şekil 6.6. İki kademeli katalog verisi temelli model testi.

Klimanın hem ısıtma hemde soğutma fonksiyonları bir arada düşünüldüğünde tip 1503 ile benzer mantıkta çalışan 5 kademeli oda sıcaklık

termostatı (tip 108) modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. Modelde yüksek kademe (ısıtma için 12-14 °C, soğutma için 28-30 °C), nominal kademe (ısıtma için 14-18 °C, soğutma için 24-28 °C) ve minimum değerlerin görüldüğü sıcaklık aralığı (18-22 °C) düşük kademe olmak üzere 5 kademeli bir tanımlama yapılmıştır. Beşinci kademe tanımı yapılırken yüksek kademede kullanılan fanlara ait enerji tüketim değeri bu sıcaklık aralığı için minimum kapasite değeri şeklinde tanıtılmıştır (0,35 kW). Nominal kademe için sırasıyla soğutma kapasitesi 2,52 kW, soğutma gücü 0,74 kW, ısıtma kapasitesi 2,84 kW, ısıtma gücü 0,70 kW ve toplam hava debisi 0,1283 m³/s şeklinde ele alınmıştır. Yüksek kademe için ise sırasıyla soğutma kapasitesi 3,0 kW, soğutma gücü 0,88 kW, ısıtma kapasitesi 4,0 kW, ısıtma gücü 0,986 kW ve toplam hava debisi 0,1708 m³/s olarak tanımlanmıştır (Daikin, 2019).

GEDKS bileşenleri içerisinde yer alan solar FV paneller, bina, klima ve kontrol modellerinin test edilmesi sonrasında kurulan model ile elde edilen iklim veri grubu 2019 yılı Temmuz ayı boyunca gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile bir saat aralıklı veri grubu kullanılarak test edilmiştir. Sonuçlar aşağıda Şekil 6.7 ile verilmiştir.



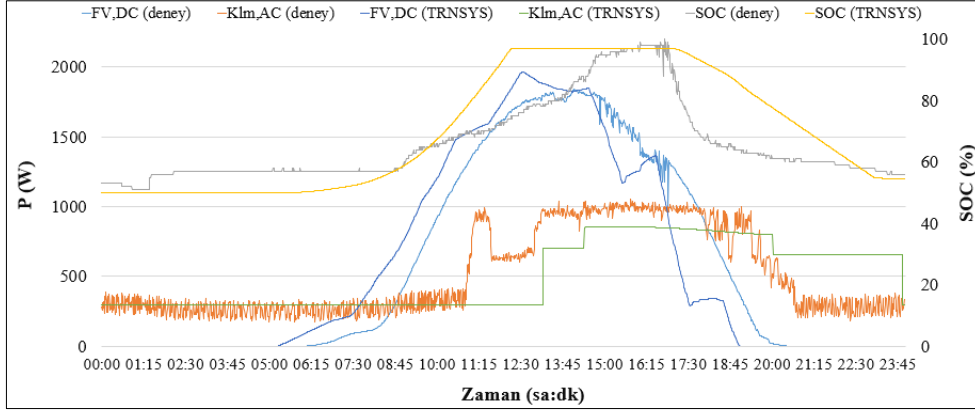
Şekil 6.7. İklim veri grubu testi (deney ve TRNSYS).

Şekil 6.7 ile görüleceği üzere, her ne kadar TRNSYS programı tipik meteorolojik yıl kabulü altında iklim veri grubunu modellese de 2019 yılı Temmuz ayında elde edilen deneysel çalışmalar ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Temmuz ayına ait ortalama sıcaklık değeri deneysel ve nümerik çalışmalarla sırasıyla 28,3

$^{\circ}\text{C}$ ve $27,4^{\circ}\text{C}$ olarak hesaplanmış olup ikinci hafta için özdeş sıcaklık değeri ($27,6^{\circ}\text{C}$) ortaya çıkmıştır. Ayrıca, POA değerleri tüm haftalarda deneysel çalışmalarla daha yüksek bulunmuş olup aylık toplam değer deneysel ve nümerik çalışmalarla sırasıyla $235,7 \text{ kWh/m}^2$ ve $211,9 \text{ kWh/m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Son olarak, v_r TRNSYS programı tarafından deneysel çalışmalara göre daha yüksek değerlerde modellenmiş olup (üçüncü hafta hariç) tüm ay boyunca ortalama değeri deneysel ve nümerik çalışmalar ile sırasıyla $3,4 \text{ m/s}$ ve $4,1 \text{ m/s}$ bulunmuştur.

Bileşenler arasındaki güç etkileşimi ise *RMSE* analizi sonucunda iklim koşullarının en yüksek benzerlikte gerçekleştiği 2019 yılı Temmuz ayına ait örnek gün (26.07.2019) için deneysel çalışma sonuçları ile bir dakika aralıklı veri grubu kullanılarak test edilmiştir. Şekil 6.8 ile görüleceği üzere, solar FV paneller tarafından DC tarafta üretilen güç ($P_{FV,DC}$), klima tarafından AC tarafta tüketilen güç ($P_{Klm,AC}$) ve bataryalara ait SOC gün boyunca benzer profilleri takip etmiştir. Tüm gün boyunca solar FV paneller tarafından üretilen enerji gerek nümerik gerekse deneysel çalışmalar ile özdeş olmak üzere $13,7 \text{ kWh}$ olarak belirlenmiştir. Bataryalara ait gün boyunca meydana gelen ortalama SOC % 70,2 (nümerik) ve % 66,1 (deneysel) olarak bulunmuştur. Klimaya ait enerji tüketimi kapsamında düşük, nominal ve yüksek kademelerde çalışma durumu her iki yaklaşımda da ortaya çıkmıştır. Şekil 6.8 ile verildiği gibi, geliştirilen TRNSYS modeli nominal kademedede daha uzun, deneysel çalışmalar ise yüksek kademedede daha uzun çalışmıştır. Düşük kademe çalışma zamanı ise her iki yöntemde neredeyse özdeş olarak ortaya çıkmıştır. Her bir kademenin ortak etkisi sonucunda günlük ortalama $P_{Klm,AC}$ nümerik çalışmalar ile $504,1 \text{ W}$, deneysel çalışmalarla ise $512,2 \text{ W}$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 ile görüleceği üzere gerek iklim veri grubu gerekse bileşenler arasındaki güç etkileşiminin TRNSYS programı ile başarılı bir şekilde modellendiği görülmüştür.



Şekil 6.8. GEDKS bileşenleri arasındaki güç akımı testi (deney ve TRNSYS).

6.3 Pack Calculation Pro Paket Programı

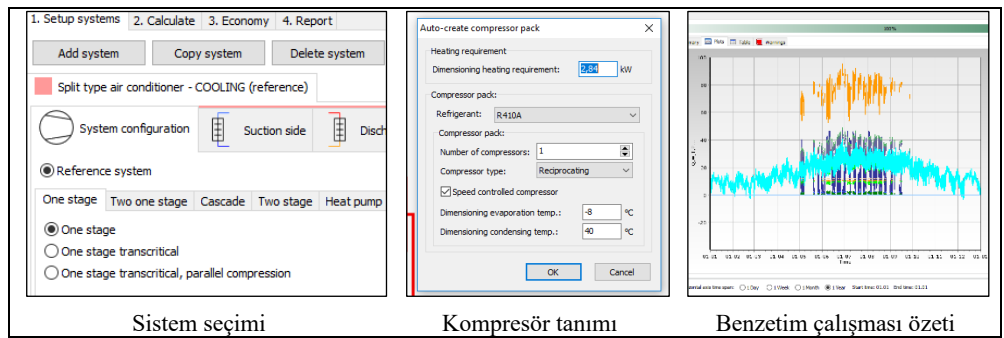
6.3.1 Isıtma ve soğutma çevriminin incelenmesi

Pack Calculation Pro, ısı pompası ve soğutma sistemlerinin saatlik olarak farklı yük profilleri ve farklı soğutucu akışkan kullanımı koşulları altında analiz edilebildiği, içerisinde 3.700 farklı bölgeye ait iklim verisi ile üretici firma kataloglarına bağlı oluşturulmuş 7.000 farklı ticari kompresör modeli bulunduran bir yazılım paket programıdır. Ayrıca, benzetim çalışmaları sırasında ekonomik (geri ödemesi süresi ve yaşam ömrü maliyeti) ve çevresel (karbondioksit salımı) analizler de yapılabilmektedir (Pack Pro, 2020). Bu tez çalışması sırasında ise Pack Calculation Pro ile farklı soğutucu akışkan (R410A, R134a ve R22) etkisi araştırılmıştır. Genel olarak klimanın soğutma ve ısıtma fonksiyonlarına ait benzetim çalışmaları sırasında Bölüm 5’de yer alan deneysel çalışma sonuçları ile klimaya ait bilgiler (Daikin, 2019) çeşitli parametre tanımları kapsamında kullanılmıştır. Belirlenemeyen parametreler için ise program tarafından kabul edilen varsayılan değerlere başvurulmuştur.

Pack Calculation Pro ile GEDKS bileşenleri arasında yer alan klimaya ait soğutma ve ısıtma fonksiyonları üç temel adımda uygulanan işlemlerle modellenmiştir. Soğutma fonksiyonu için ilk adımda 14 farklı sistem içerisinde tek kademeli soğutma sistemi seçimi yapılmıştır. Hâlihazırda var olan kompresör modellerine ait en düşük soğutma kapasitesi değeri 3,19 kW olduğu için kullanıcı tanımlı kompresör modeli seçimi yapılmıştır. Bu sırada soğutma kapasitesi (2,52 kW), soğutucu akışkan türü (R410A), kompresör adedi (1), kompresöre ait hız kontrolü (var), kompresör tipi (pistonlu) ile soğutucu akışkana ait buharlaşma (10

°C) ve yoğuşma (40 °C) sıcaklıkları tanımlanmıştır. İkinci adımda ise soğutma çevrimi emme tarafına ait soğutma profili (sabit), soğutma kapasitesi (2,52 kW), dış ortam sıcaklığına karşı soğutma profili değişimi (% 4,51/°C), soğutma profilinin tasarlandığı (32 °C) ve sabit kaldığı (20 °C) dış ortam sıcaklıkları, toplam (5 °C) ve kullanılmayan (2 °C) kızgınlık sıcaklık değişimleri ile buharlaştırıcıya ait hava üfleme sıcaklığı (12 °C) tanımları yapılmıştır. Üçüncü ve son adımda ise soğutma çevrimi basma tarafına ait tanımlamalar yoğuşturucu tipi (hava soğutmalı), yoğuşturucu kapasite kontrolü (T_a+9 °C), yoğuşturucu fanına ait hız kontrolü (var) ile aşırı soğutma (2 °C) ve minimum yoğuşma (20 °C) sıcaklıkları girilerek gerçekleştirilmiştir.

Isıtma fonksiyonu için ilk adımda 14 farklı sistem içerisinde kritik altı çalışan ısı pompası seçimi yapılmıştır. Kullanıcı tanımlı kompresör modeli için ısıtma kapasitesi (2,84 kW), soğutucu akışkan türü (R410A), kompresör adedi (1), kompresöre ait hız kontrolü (var), kompresör tipi (pistonlu) ile soğutucu akışkana ait buharlaşma (-8 °C) ve yoğuşma (40 °C) sıcaklıkları tanımlanmıştır. İkinci adımda ise ısıtma çevrimi emme tarafına ait ısı pompası tipi (hava soğutmalı), buharlaştırıcı kapasite kontrolü (T_a-9 °C), buharlaştırıcı fanına ait hız kontrolü (var) ile toplam kızgınlık (5 °C), kullanılmayan kızgınlık (2 °C) ve maksimum buharlaşma (15 °C) sıcaklıklarına ait değerler girilmiştir. Üçüncü ve son adımda ise ısıtma çevrimi basma tarafı için ısıtma profili (sabit), ısıtma kapasitesi (2,84 kW), dış ortam sıcaklığına karşı ısıtma profili değişimi (% 3/°C), ısıtma profilinin tasarlandığı (-12 °C) ve sabit kaldığı (13 °C) dış ortam sıcaklıkları ile yoğuşturucu üfleme sıcaklığı (40 °C) tanımları yapılmıştır. Şekil 6.9 ile uygulanan işlem adımlarına ait bazı görseller sunulmuştur.

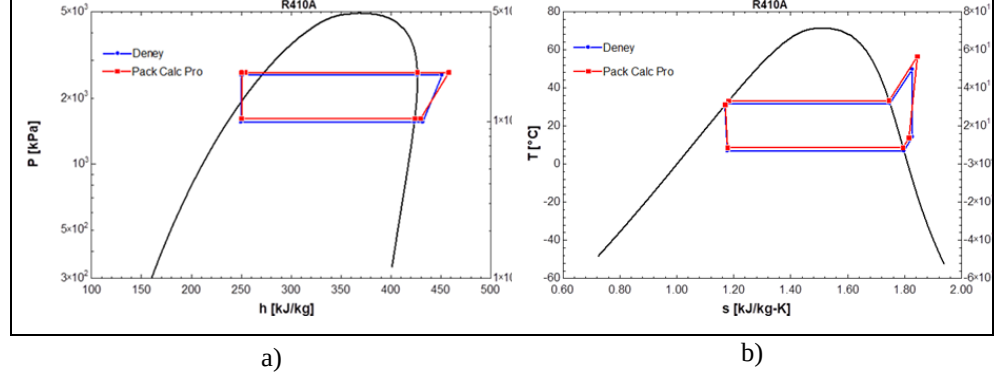


Şekil 6.9. Pack Calculation Pro programı işlem adımlarına ait bazı görseller.

6.3.2 Pack Calculation Pro bileşen modellerin deneysel çalışmalar ile test edilmesi

Pack Calculation Pro benzetim sonuçları, Şekil 5.2 ile verilen işlemlerin uygulanması sonucunda deneysel çalışmalar ile elde edilen veri grubu ile test edilmiştir. Programın kullanımı sırasında uygulanan işlem adımları incelendiğinde, ısı pompası ve soğutma sistemlerine ait modelleme çalışmalarının kompresör, yük profili, genleşme vanası, buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kısımlarına ait çalışma koşullarının ve kullanım tiplerinin tanımlanması ile gerçekleştirildiği görülmüştür. Benzetim çalışmaları sırasında farklı soğutucu akışkan kullanımı durumunun sistemin yıllık enerji/ekserji performansına etkisi kapsamında klimanın farklı soğutucu akışkan kullanımı altındaki enerji tüketim değerlerinin elde edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu tüketimi belirlemede etkili olan soğutucu akışkan çevrimine ait termodinamik özellikler klimanın soğutma modunda modellenmiştir. Bu kapsamda incelenen parametreler; soğutucu akışkana ait kütleli debi ($\dot{m}_{sa,soğ}$), klimaya ait güç tüketimi (P_{Klm}), çevrime ait emme ve basma basınçları (P_e , P_b) ile soğutucu akışkanının kompresör ($T_{sa,1}$), yoğuşturucu ($T_{sa,2}$) ve genleşme vanası ($T_{sa,3}$) giriş sıcaklıkları olmuştur. İlgili parametreler debimetrenin aktif olarak kullanılabildiği Eylül 2018 de deneysel çalışmalarla gerçekleştirilen 12 gün için (8, 9, 11, 12, 15, 16, 19, 20, 22, 23, 24 ve 25 Eylül) bir saat aralıklı veri grubu kullanılarak test edilmiştir. 12 günü kapsayan günlük ortalama değerler sırasıyla deneysel çalışmalar ve program tarafından P_{Klm} için 0,33 kW ve 0,35 kW, P_e için 990,8 kPa ve 1.042,6 kPa, P_b için 1.975,9 kPa ve 2.047,3 kPa, $\dot{m}_{sa,soğ}$ için ise 0,009 kg/s ve 0,008 kg/s bulunmuştur. $T_{sa,1}$, $T_{sa,2}$ ve $T_{sa,3}$ sıcaklıkları ise deneysel çalışmalar ile sırasıyla 14,3 °C, 49,8 °C ve 30,8 °C ölçülmüş olup program tarafından sırasıyla 13,7°C, 56,5 °C ve 31,1 °C olarak modellenmiştir. *RMSE* değeri ise P_{Klm} , P_e , P_b , $\dot{m}_{sa,soğ}$, $T_{sa,1}$, $T_{sa,2}$ ve $T_{sa,3}$ için sırasıyla 0,31 kW/kW, 368,7 kPa/kPa, 847,3 kPa/kPa, 0,006 kg/s/kg/s, 7,5 °C/°C, 28,3 °C/°C, 14,1 °C/°C olarak elde edilmiştir. Şekil 6.10 ile verilen soğutma çevrimine ait basınç-entalpi ve sıcaklık-entropi grafiklerden görüleceği üzere Pack Calculation Pro programı ile R410A kullanımı altında deneysel çalışmalarla elde edilen klimaya ait soğutma çevrimi başarılı bir şekilde modellenmiştir. Bu sebeple, saatlik değerler ile gerçekleştirilecek olan yıllık enerji, yıllık geleneksel/ileri ekserji, yaşam boyu

maliyet ve geleneksel/ileri eksergo-ekonomik analizler kapsamında ele alınacak olan farklı soğutucu akışkan kullanımı etkisini modellemede kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 6.10. Soğutma çevrimine ait a) basınç-entalpi, b) sıcaklık-entropi grafikleri (deney ve Pack Calculation Pro).

7. TERMODİNAMİK ANALİZLER

Bu tez çalışması kapsamında GEDKS'ye ait termodinamik performans nümerik çalışmalara dayalı olarak araştırılmıştır. Tüm sisteme ait yıllık enerji performansı PVSOL ve TRNSYS paket programları kullanılarak makro boyutta değerlendirilmiştir. Daha spesifik boyutta ele alınan bileşen temelli yıllık enerji analizinin incelenmesi sırasında ise TRNSYS ve Pack Calculation Pro paket programlarının bütünleşik kullanımına yer verilmiştir. Pack Calculation Pro paket programı ile farklı soğutucu akışkan kullanımı (R410A, R134a, R22) etkisi altında klimaya ait enerji tüketiminde meydana gelen değişim modellenmiştir ve belirlenen değişim miktarı TRNSYS klima modeline (tip 922c) aktarılmıştır. Diğer taraftan, bileşen temelli yıllık ekserji (geleneksel ve ileri) analizleri gerçekleştirilirken benzer şekilde TRNSYS ve Pack Calculation Pro programları bütünleşik olarak kullanılmıştır.

7.1 Yıllık Enerji Analizleri

Yıllık enerji analizleri tüm sistem ve sistemi meydana getiren bileşenler için gerçekleştirilmiştir. Tüm sistemin yıllık enerji performansının değerlendirilmesi kapsamında kendi kendine yeterlilik ve öz tüketim oranları, sistem bileşenlerine ait yıllık enerji performansının ortaya konulması kapsamında ise enerji verimi ile tesir katsayıları performans göstergesi olarak kullanılmıştır.

7.1.1 Tüm sistemin makro boyutta incelenmesi

Küresel enerji görünümündeki yeri, teknolojik detayları ve kullanım potansiyeline ait ayrıntılı bilgilerin Bölüm 2 ile verildiği güneş enerjisinin solar FV teknolojisi ile elektrik üretimi kapsamında kullanımı ilgi çekici konular arasında yer almaktadır (Wang et al., 2020). Bu kullanım sayesinde enerji verimliliği ve çevre duyarlılığı yüksek tasarımlar meydana getirilebilmektedir. Örneğin, dünya genelinde önde gelen tasarım yarışmaları arasında kabul edilen *Solar Dekatlon* kapsamında düzenlenen 13 farklı organizasyonda geliştirilmiş olan 212 farklı ev tasarımında solar enerjinin ısı pompası ile bütünleşik kullanımı ısıtma modunda % 84,9, soğutma modunda ise % 89,6 oranında tercih edilmiştir (Ma et al., 2019). Bu tez çalışması ile ise solar FV teknolojisi ile bütünleşik klima ve batarya grubu

kullanımı şebeke bağlantılı koşul altında yıllık enerji analizleri ile incelenmiştir. Sistemin gerçek zamanlı enerji performansı iklim koşulları, coğrafik özellikler, sistem seçimi, kurulum kısıtları ve bakım uygulamaları (soğutma, temizlik, vb.) gibi etkenlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bir başka ifade ile solar FV paneller için belirtilen standart test koşulları (standard test conditions, STC) ile klima için kullanılan tasarım koşulları gerçek zamanlı çalışma durumunda çoğu kez meydana gelmemektedir (Fouad et al., 2017; Njoku, 2016). Bu sebeple, öncelikle GEDKS kurulumunun gerçekleştiği Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü binasının bulunduğu konuma veya İzmir iline ait iklim koşulları deneysel ve nümerik çalışmalar ile belirlenmiştir (Meteonorm, 2020; PVSOL, 2020; TRNSYS, 2020). Bu kapsamda Bölüm 5 ve Bölüm 6 ile verilen işlem adımlarının uygulanması ile T_a (°C), RH_a (%), v_r (m/s), v_y (°K) ve POA/GHI (W/m^2) parametreleri saatlik veri grubu (toplam 8760 adet) olarak elde edilmiş olup aşağıdaki eşitlikler (19)-(20) kullanılarak aylık değerler hesaplanmıştır.

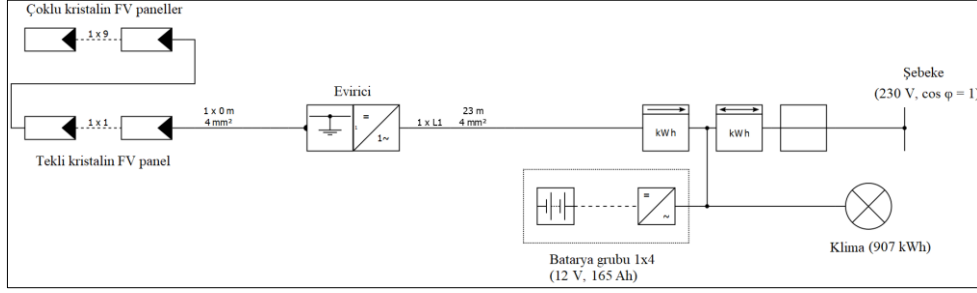
$$\bar{x} = \frac{\sum_{n=a}^b x_n}{n} \quad (19)$$

$$x = \frac{\sum_{n=a}^b x_n}{1000} \quad (20)$$

Eşitlik (19), T_a (°C), RH_a (%), v_r (m/s) ve v_y (°K) parametrelerine ait aylık ortalama değerleri belirlemek için, eşitlik (20) ise POA/GHI (W/m^2) parametresini aylık toplam değer (kWh) şeklinde hesaplamak için kullanılmıştır. Eşitliklerde yer alan n toplam örnek sayısını göstermekte olup a ve b sayıları incelenen ay kapsamındaki a . ve b . sıradaki saatleri göstermektedir. Bu sayılar sırasıyla ocak ayı için 1 ve 744, şubat ayı için 745 ve 1.416, mart ayı için 1.417 ve 2.160, nisan ayı için 2.161 ve 2.880, mayıs ayı için 2.881 ve 3.624, haziran ayı için 3.625 ve 4.344, temmuz ayı için 4.345 ve 5.088, ağustos ayı için 5.089 ve 5.832, eylül ayı için 5.833 ve 6.552, ekim ayı için 6.553 ve 7.296, kasım ayı için 7.297 ve 8.016, aralık ayı için ise 8.017 ve 8.760 alınmıştır.

Sistemin gerçek zamanlı çalışmasında itici güç olan iklim koşullarının deneysel ve nümerik çalışmalar ile belirlenmesinin ardından GEDKS'ye ait sistem bileşenleri arasında gerçekleşen yıllık enerji etkileşimi saatlik veri grubu şeklinde

elde edilmiştir. Bu kapsamda PVSOL paket programı kullanılarak oluşturulan GEDKS enerji modeli Şekil 7.1 de yer almaktadır.



Şekil 7.1. PVSOL ile kurulan GEDKS enerji modeli.

GEDKS bileşenleri arasında gerçekleşen yıllık enerji etkileşiminin TRNSYS paket programı kullanılarak belirlenmesi kapsamında kurulan enerji modeli ise Şekil 7.2 ile verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, TRNSYS enerji modeli yeni bina projesi çalışmaları sonunda oluşturulan iklim veri işleyici (tip 15-6) modelini, eşitlik modellerini (konumlandırma, ısıtım bileşenleri, aydınlatma eşik değerleri, gölge+aydınlatma), aydınlatma kontrol modelini ve bina modelini (tip 56) içermektedir. Ayrıca GEDKS bileşenleri kapsamında yer alan ve deneysel çalışmalar ile test edilerek belirlenen solar FV panel (tip 103b), evirici (tip 48b), batarya (tip 47a) ve klima (tip 922c) modellerine de yer verilmiştir. Klima modeli, 5 kademeli oda sıcaklık termostatu (tip 108) modeli ile haftalık çalışma profili (tip 14, tip 41) modellerini bir arada içeren bir eşitlik modeli (termostat + profil) ile kontrol edilmiştir. İlaveten, birim dönüştürücü (tip 57) modelleri, SOC dönüşüm eşitlik modeli ve çıktı (tip 65-a) modellerine de yer verilmiştir.

Her iki paket programına dayalı gerçekleştirilen yıllık enerji etkileşimi kapsamında solar FV panel grubu tarafından doğru akım ($P_{FV,DC}$) ve alternatif akım ($P_{FV,AC}$) taraflarında üretilen, şebekeye beslenen ($P_{FV-Şbk}$), batarya grubunu şarj eden ($P_{FV-Bat,şarj}$) ve klima ihtiyacını karşılayan (P_{FV-Klm}) güç değerleri (kW) hesaplanmıştır. Ayrıca, şebekenin batarya grubu şarjı ($P_{Şbk-Bat,şarj}$), klima ihtiyacı ($P_{Şbk-Klm}$) ve GEDKS ($P_{Şbk-GEDKS}$) için sağladığı güç değerleri (kW) de belirlenmiştir. Batarya grubu için ise klimaya sağlanan güç değeri ($P_{Bat-Klm}$ (kW)) ve SOC (%) değeri de ayrıca bulunmuştur. Deneysel çalışmalar ile $P_{FV,DC}$ (W), P_{Klm} (W) ve SOC (%) değerleri ölçülmüştür. Tüm değerler saatlik elde edildiğinden

Yön

Radyasyon

Aydınlatma kontrol

Gölgelenme+aydılatma

Tip15-6 (1)

Aydınlatma eşik değeri

Tip56

Tip65a (5)

Tip22c

Tip108

Tip57 (4)

Tip48b

Tip47a

Tip57 (3)

SOC

Tip103b

Tip57 (2)

Tip15-6 (2)

Tip57 (5)

Tip65a (2)

Tip65a (3)

Tip65a (4)

Tip14h (1)

Tip14h (2)

Termostat kontrol+çalışma profili

Tip15-6 (1) İklim veri işleyici modeli - Tip 56 ve Tip 922c ile ilişkili

Tip15-6 (2) İklim veri işleyici modeli - Tip 103b ile ilişkili

Tip56 Çoklu mahal bina modeli

Tip922c İki kademeli hava kaynaklı ısı pompası modeli

Tip103b Basit FV modeli

Tip48b Çevirici/regülatör modeli

Tip47a Basit enerji dengesi batarya modeli

Tip108 Beş kademeli termostat modeli

Tip14h (1) Hafta içi için zamana bağlı zorlayıcı fonksiyon modeli

Tip14h (2) Hafta sonu için zamana bağlı zorlayıcı fonksiyon modeli

Tip41a Yük profili sıralayıcısı modeli

Tip57 (1) - (4) Güç için birim dönüştürücü modelleri

Tip57 (5) Akı için birim dönüştürücü modeli

Tip65a (1) Bileşenler arası güç etkileşimi için çıktı modeli

Tip65a (2) İklim koşulları için çıktı modeli

Tip65a (3) Tip 48b ve 47a da gerçekleşen güç kayıpları için çıktı modeli

Tip65a (4) Bataryaya ait güç ve SOC için çıktı modeli

Tip65a (5) Klimanın ısıtma, soğutma ve güç tüketim enerjileri

GEDKS bileşenleri arasındaki yıllık enerji etkileşiminin belirlenmesinin yanı sıra literatür çalışmaları sırasında sıklıkla görülen (Bkz. Tablo 3.1) ve enerji verimliliği değerlendirmesi için kullanılan kendi kendine yeterlilik (self-sufficiency, SS) ve öz tüketim (self-consumption, SC) oranları sırasıyla eşitlik (21) ve (22) kullanılarak hesaplanmıştır (Jurasz et al., 2020).

$$SC = \frac{\sum_{n=a}^b (P_{FV,DC} - P_{FV-\$bk})_n}{\sum_{n=a}^b (P_{FV,DC})_n} \quad (22)$$

Eşitlik (21) ile klimaya ait enerji tüketiminin ne kadarının doğrudan ve dolaylı yollar ile solar FV paneller tarafından karşılandığı belirlenmektedir. Burada batarya grubunun sadece solar FV paneller ve solar FV paneller ile bütünleşik şebeke ile şarj edildiği iki durum birden sunulmuştur. Eşitlik (22) ile ise solar FV paneller

tarafından üretilen enerjinin ne kadarının sistem içinde kullanıldığı hesaplanmaktadır. Eşitlik (19) – (22) de yer alan a ve b sayılarının sırasıyla 1 h ve 8.760 h olarak göz önünde bulundurulmasıyla tüm sistem için yıllık enerji analizleri gerçekleştirilmiştir.

7.1.2 Bileşen temelli inceleme

Tüm sistemin enerji performansının kendi kendine yeterlilik ve öz tüketim oranları kullanılarak değerlendirilmesinin yanı sıra yıllık enerji analizleri sistem bileşenleri temelinde farklı soğutucu akışkan kullanımı durumunda gerçekleştirilmiştir. Bu sırada Şekil 7.2 ile verilen TRNSYS enerji modeli 24 saat kesintisiz olarak çalıştırılmıştır. TRNSYS enerji modeli içinde yer alan iki kademeli ısı pompası modeli (tip 922c) ile belirlenen klima enerji tüketimi değeri ise Pack Calculation Pro programı ile kurulan ısı pompası ve soğutma sistemlerine ait çevrim modelleri sonucunda elde edilen değerler ile farklı soğutucu akışkan kullanımı (R410A, R134a, R22) altında tekrar düzenlenmiştir. Bileşen temelli yıllık enerji analizlerinin gerçekleştirilmesi esnasında kullanılan eşitlikler (23)-(26) ile solar FV panel grubu (Gürtürk et al., 2018), evirici/düzenleyici (ED) (Ogbonnaya et al., 2019a), batarya grubu (Ogbonnaya et al., 2019a) ve klima (Li et al., 2014) için aşağıda sırasıyla verilmiştir.

$$\eta_{FV} = \frac{P_{FV,DC}}{POA \cdot A_{FV}} \quad (23)$$

$$\eta_{ED} = \frac{P_{Klm} + P_{FV-Bat,sarj} + P_{FV-\$bk}}{P_{FV,DC} + P_{Bat-Klm} + P_{\$bk-Klm}} \quad (24)$$

$$\eta_{Bat} = \frac{P_{FV-Bat,sarj} + P_{\$bk-Bat,sarj}}{P_{Bat-Klm} + P_{Bat-\$bk}} \quad (25)$$

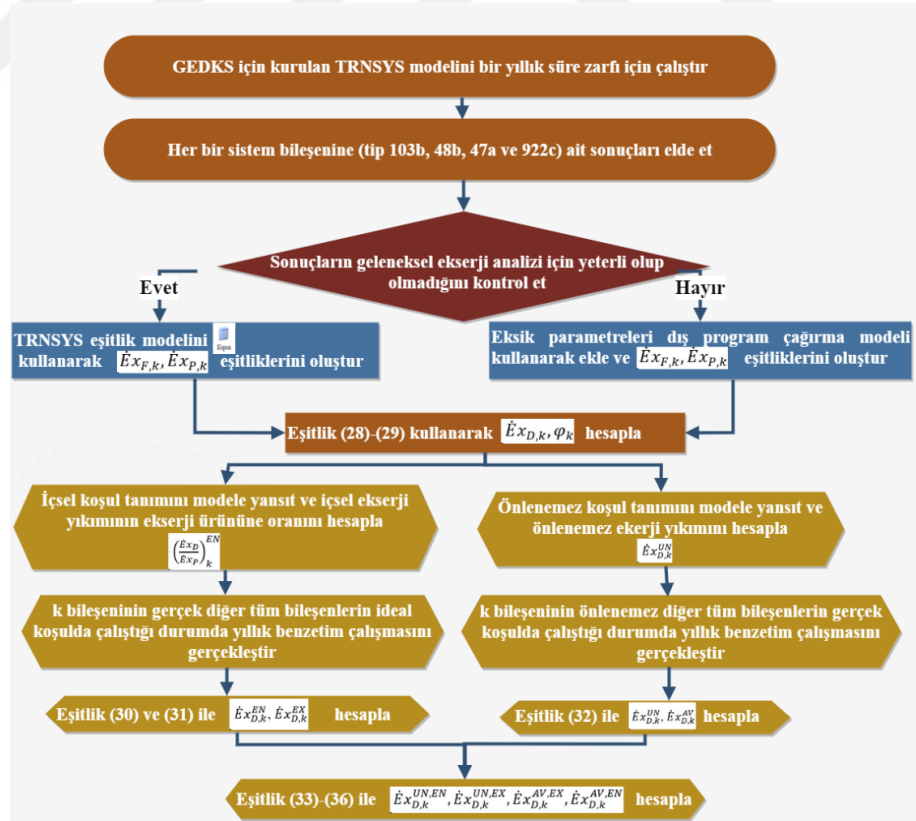
$$STK_{Klm} = \frac{\dot{Q}_{soğ}}{P_{Klm}} ; ITK_{Klm} = \frac{\dot{Q}_{ısı}}{P_{Klm}} \quad (26)$$

Eşitlik (23) ile solar FV paneller üzerine düşen solar ışınlam miktarına bağlı oluşan güç potansiyelinin ne kadarının doğru akım tarafında üretilen güce çevrildiği belirlenmektedir. Eşitlik (24) ile ise Ogbonnaya et al. (2019a) tarafından önerilen evirici/düzenleyici bileşenine ait denklem, GEDKS'nin aralıksız çalışması

koşulunda tekrar düzenlenerek evirici/düzenleyici çıkışında meydana gelen toplam gücün evirici/düzenleyici girişindeki toplam güce bölünmesiyle hesaplanmıştır. Benzer şekilde eşitlik (25) ile bataryaların çıkışındaki toplam güç (batarya deşarjı), batarya girişindeki toplam güce (batarya şarj) bölünerek bu bileşene ait enerji verimi değeri belirlenmiştir. Son olarak eşitlik (26) ile klimaların enerji verimi kapsamında kullanılan soğutma ve ısıtma tesir katsayıları sırasıyla soğutma ve ısıtma yükünün klimaya ait güç tüketimine bölünmesiyle hesaplanmıştır.

7.2 Yıllık Ekserji Analizleri

Yıllık ekserji analizleri, yıllık enerji analizlerinde olduğu gibi sistem bileşenleri temelinde ve farklı soğutucu akışkan (R410A, R134a, R22) kullanımı altında uygulanmıştır. Bu sırada TRNSYS enerji modeli (Bkz. Şekil 7.2) 24 saat kesintisiz olarak çalıştırılmıştır ve TRNSYS eşitlik modeli kullanılarak ekserji analizi için gerekli denklemler modele entegre edilmiştir. Şekil 7.3 ile yıllık ekserji analizleri kapsamında uygulanan işlem adımları verilmiştir. Geleneksel ve ileri ekserji analizlerine ait detaylı bilgiler ise aşağıda yer almaktadır.



Şekil 7.3. Ekserji analizleri işlem adımları.

7.2.1 Yıllık geleneksel ekserji analizleri

Enerji analizleri termodinamiğin birinci yasasını temel alır ve bu yöntem kullanılarak sistem bileşenlerine ait miktar (nicelik) odaklı bir değerlendirme gerçekleştirilir. Öte yandan, ekserji analizleri termodinamiğin ikinci yasası ile ilişkilidir ve bu analiz yöntemi ile sistem bileşenlerine ait kalite (nitelik) odaklı bir inceleme ölü hal koşullarını da dikkate alarak yapılır (Mehrpooya et al., 2018b). Geleneksel ekserji analizleri ile sistem bileşenlerinde meydana gelen geri dönüşümsüzlük (termodinamik zayıflık) hesaplanan ekserji yıkım akımları ile ortaya konulmaktadır. Bu sayede, dikkate alınan bileşenler için iş potansiyelindeki harcanışın veya iş yapma fırsatındaki kaybın kaynağı, miktarı ve yeri tespit edilebilmektedir (İbrahim et al., 2017; Rosen and Tank, 2007). İlaveten, geleneksel ekserji analizleri ile belirlenen ekserji yıkım akımları, incelenen bileşen içinde meydana gelen dahili tersinmezliklerden veya ekserji akımlarının çevreye yararlı bir iş yapılmaksızın verilmesi kaynaklı harici tersinmezliklerden meydana gelebilmektedir (Nguyen et al., 2013).

Her bir sistem bileşeninde meydana gelen ekserji yıkımını hesaplamak için kullanılan geleneksel ekserji dengesi eşitlik (27) ile, ekserji akımları için kullanılan yakıt-ürün konsepti ile birleştirilmiş ekserji dengesi ise eşitlik (28) ile verilmiştir (Mehrpooya et al., 2018b).

$$\sum_{giriş} \dot{E}x_k - \sum_{çıkış} \dot{E}x_k + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_k \cdot \dot{Q}_k - \dot{W}_k - \dot{E}x_{D,k} = 0 \quad (27)$$

$$\dot{E}x_{D,k} = \dot{E}x_{F,k} - \dot{E}x_{P,k} = \sum_{giriş} \dot{E}x_k + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_k \cdot \dot{Q}_k - \sum_{çıkış} \dot{E}x_k - \dot{W}_k \quad (28)$$

Eşitlik (27) de yer alan $\sum_{giriş} \dot{E}x_k$ ve $\sum_{çıkış} \dot{E}x_k$ ele alınan bileşenin kontrol hacmine sırasıyla giren ve çıkan ekserji akımlarını ifade etmektedir. $\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)_k$ ifadesi ise $\dot{Q}_k$ ısı transferine ait kalite faktörüdür ve ifadede yer alan T , T_0 sırasıyla ısı transferinin gerçekleştiği ve ölü hal sıcaklıklarıdır. $\dot{Q}_k$, bileşenden birim zamanda gerçekleşen ısı transfer miktarını, $\dot{W}_k$ ise bileşen tarafından birim zamanda tüketilen iş miktarını göstermektedir. Son olarak, $\dot{E}x_{D,k}$ ise bileşenin kontrol hacmi içinde oluşan ekserji yıkım akımıdır.

Eşitlik (28) de yer alan $\dot{E}x_{F,k}$ ve $\dot{E}x_{P,k}$ ifadeleri sırasıyla bileşenin kontrol hacmi içinde harcanan yakıt ve üretilen ürüne ait ekserji akımlarını göstermektedir. Eşitlik (28) ile verildiği gibi bu iki değer arasındaki fark bileşenin kontrol hacmi içinde meydana gelen ekserji yıkım akımına eşittir (Tsatsanoris, 2007). Eşitlik (29) ile verildiği gibi incelenen bileşene ait ekserji yıkım akımının yanında yakıt ve ürün ekserji akımlarının kullanılmasıyla bileşene ait ekserji verimi (φ_k) hesaplanabilmektedir (Mehrpooya et al., 2018b).

$$\varphi_k = \dot{E}x_{P,k} / \dot{E}x_{F,k} \quad (29)$$

Bileşen temelli yıllık ekserji analizlerinin gerçekleştirilmesi esnasında kullanılan eşitlikler solar FV panel grubu (Gürtürk et al., 2018), evirici/düzenleyici (Ogbonnaya et al., 2019a), batarya grubu (Ogbonnaya et al., 2019a) ve klima (Li et al., 2014) için yakıt-ürün ekserji konseptini temel alarak aşağıda Çizelge 7.1 ile verilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere, solar FV panel grubuna ait yakıt ekserji akımı Patela tarafından önerilen denklem ile belirlenmiştir (Petela, 1964). Denklemden yer alan T_{gun} , güneş yüzey sıcaklığıdır ve 5,600 K alınmıştır (Gürtürk et al., 2018). Solar FV panel grubuna ait ürün ekserji akımı için ise evirici/düzenleyici'ye beslenen maksimum elektrik miktarı göz önünde bulundurulmuştur (Gürtürk et al., 2018). Dikkat edileceği üzere, evirici/düzenleyici ve batarya grubu için kullanılan eşitlikler yıllık enerji analizi kapsamında yer verilen denklemlerle (Bkz. Eşitlik (24) ve (25)) özdeştir. Çünkü, elektrik için kalite faktörü “1” değerini alır. Kompresör ve fanlar (yoğuşturucu ve buharlaştırıcı) tarafından tüketilen toplam güç ise klimaya ait yakıt ekserji akımını oluşturmaktadır. Klima tarafından üretilen soğutma ve ısıtma yüklerine ait ürün ekserji akımının belirlenmesi sırasında ise ısı transferine ait kalite faktörü devreye girmektedir. Soğutma durumunda $\left(1 - \frac{T_0}{T_{soğ}}$), ısıtma durumunda ise $\left(1 - \frac{T_0}{T_{ısı}}$) ifadeleri kullanılmıştır (Li et al., 2014; Wang et al., 2015b). Burada, $T_{soğ}$ ve $T_{ısı}$ sırasıyla soğutma ve ısıtma modunda soğutucu akışkan ile iklimlendirilecek oda havası arasında gerçekleşen ısı transferine ait sıcaklıktır.

Çizelge 7.1. Sistem bileşenlerine ait yakıt-ürün ekserji akımları.

Bileşen	$\dot{E}x_{F,k}$	$\dot{E}x_{P,k}$
Solar FV panel grubu	$A_{FV} \cdot POA \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{T_a}{T_{gun}} \right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{T_a}{T_{gun}} \right)^4 \right]$	$P_{FV,DC}$
Evirici/ düzenleyici	$P_{FV,DC} + P_{Bat-Klm} + P_{\text{Şbk-Klm}}$	$P_{Klm} + P_{FV-Bat,\text{şarj}} + P_{FV-\text{Şbk}}$
Batarya grubu	$P_{FV-Bat,\text{şarj}} + P_{\text{Şbk-Bat,\text{şarj}}}$	$P_{Bat-Klm} + P_{Bat-\text{Şbk}}$
Klima	P_{Klm}	$-\dot{Q}_{soğ} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{soğ}} \right) ; \dot{Q}_{ısı} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{ısı}} \right)$

7.2.2 Yıllık ileri ekserji analizleri

Geleneksel ekserji analizleri ile sistem bileşenlerine ait iş potansiyelindeki harcanış veya geri dönüşümsüzlük belirlenebilmektedir (İbrahim et al., 2017). Fakat meydana gelen termodinamik verimsizliklerin kaynağı konusunda bu analiz yöntemi yetersiz kalmaktadır ve daha detaylı bir incelemenin yapılabilmesi için ileri ekserji analizlerine ihtiyaç vardır. İleri ekserji analizleri sayesinde her bir sistem bileşeninde meydana gelen ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,k}$), içsel/dışsal ve önlenabilir/önlenemez bölümlere ayrılarak sırasıyla bileşenler arasındaki etkileşim ve bileşene ait mümkün geliştirme potansiyeli belirlenebilmektedir (Morosuk and Tsatsaronis, 2019). İçsel/dışsal ekserji yıkım akımları kullanılarak incelenen bileşende meydana gelen iş potansiyelindeki kaybın bileşenin kendisinden mi (içsel ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,k}^{EN}$)) yoksa diğer bileşenlerin etkisinden mi (dışsal ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,k}^{EX}$)) kaynaklandığı ortaya konulabilmektedir (Montazerinejad et al., 2019). Önlenabilir/önlenemez ekserji yıkım akımları sayesinde ise incelenen bileşende meydana gelen iş potansiyelindeki kaybın teknolojik kısıtlama (bulunabilirlik, malzeme maliyeti, üretim prosesi) dolayısıyla kaçınılmaz mı (önlenemez ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,k}^{UN}$)), yoksa bileşene ait mümkün bir iyileştirme sayesinde kaçınılabilir mi (önlenabilir ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,k}^{AV}$)) olduğu hesaplanabilmektedir (Bagheri et al., 2019). Ekserji yıkım akımına ait bölümlerin hesaplanması kapsamında kullanılan denklemler aşağıda eşitlik (30)-(32) ile verilmiştir (Wu and Wang, 2020). Şekil 7.3 ile verildiği gibi, eşitlik (30) da yer alan $\left(\frac{\dot{E}x_D}{\dot{E}x_P} \right)_k^{EN}$ ifadesi içsel koşulda ortaya çıkan ekserji yıkım akımının yine içsel koşulda oluşan ekserji ürün akımına oranıdır (Wu and Wang, 2020). Bu ifadenin hesaplanması kapsamında GEDKS'ye ait TRNSYS modeli incelenen bileşenin

gerçek, diğer bileşenlerin ise ideal (farazi) koşulda olduğu durumda çalıştırılmıştır. Bu sayede, içsel ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,k}^{EN}$) ve dışsal ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,k}^{EX}$) sırasıyla eşitlik (30) ve eşitlik (31) kullanılarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan, Şekil 7.3 ile görüleceği üzere, GEDKS'ye ait TRNSYS modelinin incelenen bileşenin önlenemez, diğer bileşenlerin ise gerçek koşulda olduğu durumda çalıştırılmasıyla önlenemez ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,k}^{UN}$) belirlenmiştir. Ayrıca, eşitlik (32) kullanılarak önlenebilir ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,k}^{AV}$) elde edilmiştir (Bagheri et al., 2019; Morosuk and Tsatsaronis, 2019).

$$\dot{E}x_{D,k}^{EN} = \dot{E}x_{P,k} \cdot \left(\frac{\dot{E}x_D}{\dot{E}x_P} \right)_k^{EN} \quad (30)$$

$$\dot{E}x_{D,k}^{EX} = \dot{E}x_{D,k} - \dot{E}x_{D,k}^{EN} \quad (31)$$

$$\dot{E}x_{D,k}^{AV} = \dot{E}x_{D,k} - \dot{E}x_{D,k}^{UN} \quad (32)$$

Yukarıda verilen ekserji yıkım akımına ait bölümler, eşitlik (33) – (36) kullanılarak daha detaylı bölümlere ayrılabilir (Wang et al., 2016).

$$\dot{E}x_{D,k}^{UN,EN} = \dot{E}x_{P,k}^{EN} \cdot \left(\frac{\dot{E}x_D}{\dot{E}x_P} \right)_k^{UN} \quad (33)$$

$$\dot{E}x_{D,k}^{UN,EX} = \dot{E}x_{D,k}^{UN} - \dot{E}x_{D,k}^{UN,EN} \quad (34)$$

$$\dot{E}x_{D,k}^{AV,EN} = \dot{E}x_{D,k}^{EN} + \dot{E}x_{D,k}^{UN,EN} \quad (35)$$

$$\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX} = \dot{E}x_{D,k} - (\dot{E}x_{D,k}^{UN,EN} + \dot{E}x_{D,k}^{UN,EX} + \dot{E}x_{D,k}^{AV,EN}) \quad (36)$$

Burada, $\dot{E}x_{D,k}^{UN,EN}$ önlenemez/içsel ekserji yıkım akımıdır ve incelenen bileşen en yüksek iyileştirme potansiyelinde performans gösterse dahi bu değer düşürülemez. $\dot{E}x_{D,k}^{UN,EX}$ önlenemez/dışsal ekserji yıkım akımıdır ve diğer bileşenler ideal koşulda çalışsa dahi bu değer yine düşürülemez. $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}$ ise önlenebilir/dışsal ekserji yıkım akımıdır ve diğer bileşenlerin performanslarının artırılmasıyla bu değer düşürülebilir. Son olarak, $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EN}$ önlenebilir/içsel ekserji yıkım akımını ifade etmekte olup bileşenin kendi performansının artırılmasıyla bu değer yine düşürülebilir.

Geleneksel ve ileri ekserji analizlerinin gerçekleştirilmesi esnasında yapılan kabuller aşağıda maddeler halinde verilmiştir. Burada gerçek (nominal) koşullar için sistem bileşenlerine ait katalog değerleri kullanılmıştır.

- Kinetik, potansiyel ve kimyasal ekserjiler ihmal edilmiştir.
- Ölü hal sıcaklığının dinamik olarak değiştiği kabul edilmiştir ($T_0 = T_a$). Ayrıca, $T_{soğ}$ ve $T_{ısı}$ sıcaklıkları için buharlaştırıcıya giren havanın giriş ve çıkış sıcaklıkları ortalaması alınmıştır.
- Ekserji yıkımının tamamı dahili tersinmezliklerden meydana gelmiştir.
- Solar FV panel grubuna ait enerji verimi (η_{FV}) için gerçek ve ideal koşul sırasıyla % 15,7 ve % 100 kabul edilmiştir. Önlenemez koşul için ise η_{FV} değeri % 24,6 alınmıştır (Green et al., 2020). Bu durum basit solar FV panel TRNSYS modelinde (tip 103b) kısa devre akımı, maksimum güç noktası akımı, açık devre gerilimi ve maksimum güç noktası gerilimi değerlerinin sırasıyla 5,04 A, 4,74 A, 79,5 V ve 68 V alınmasıyla analizlere yansıtılmıştır.
- Evirici/düzenleyiciye ait güç çevrim ($P_{PV,DC}$ 'den $P_{PV,AC}$ 'ye) ve güç düzenleme ($P_{PV,DC}$ 'den $P_{PV,DC}$ 'ye) verimleri gerçek koşullarda sırasıyla % 92 ve % 94 alınmıştır. İdeal koşullarda ise her iki verim ifadesine ait değer % 100 kabul edilmiştir. Önlenemez koşul için aynı sırayla % 97 ve % 99 değerleri gözönünde bulundurulmuştur. Önlenemez koşuldaki güç çevrim verimi için transformatörsüz evirici/düzenleyici için günümüzde mümkün olan en yüksek değer ele alınmış (Zeb et al., 2018) olup benzer artış oranı güç düzenleme verimi için de kullanılmıştır.
- Bataryalar için döngü verimi (şarj-depolama-deşarj) gerçek ve ideal koşullarda sırasıyla % 80 ve % 100 kabul edilmiştir. Önlenemez koşulda ise bu değer kurşun asit teknolojisi için % 85 alınmıştır (Vega-Garita et al., 2019).
- Klimaya ait soğutma (STK_{Klm}) ve ısıtma (ITK_{Klm}) tesir katsayıları gerçek, ideal ve önlenemez koşul için sırasıyla 4, 10 ve 8 kabul edilmiştir (Byrne and Ghouali, 2019).

8. EKONOMİK ANALİZLER

GEDKS'ye ait ekonomik değerlendirme kapsamında enerji analizlerini temel alan yaşam boyu maliyet analizi ile ekserji analizlerini temel alan eksergo-ekonomik analizler sırasıyla gerçekleştirilmiştir. Her iki ekonomik analiz yöntemine ait detaylar ise aşağıda yer almaktadır.

8.1 Yaşam Boyu Maliyet Analizi

Yaşam boyu maliyet analizleri kapsamında GEDKS yaşam ömrünü temel alan ve aşağıda verilen eşitlikler (37)-(41) ile hesaplanan net bugünkü değer (NPV, net present value) ve indirgenmiş geri ödeme süresi (DPBP, discounted payback period) ekonomik performans göstergeleri olarak kullanılmıştır (Ellabban and Alassi, 2019, Ozcan et al., 2019). Eşitlik (37) de yer alan NPV sisteme ait net karlılık oranını belirlemektedir ve sistem ömrü boyunca meydana gelen toplam indirgenmiş giriş maliyet akımından (IC_t , inlet cash flow) toplam indirgenmiş çıkış maliyet akımının (OC_t , outlet cash flow) çıkarılması ile hesaplanmıştır. Eşitlik (38) ile verilen IC_t , ilk yatırım anındaki sübvansiyon tutarını (S_0 , subsidies), sistem ömrü boyunca yenilenebilir enerji kaynaklı kazançları ve değişime uğrayan sistem bileşenlerine ait hurda değerleri (SV_t , salvage value) içermektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklı kazançlar ise şebeke kullanımının yerini alan ve şebekeye beslenen enerji üretimleri toplamı ile ifade edilmektedir. Bu enerji üretimlerinin maliyet bileşenine dönüştürülmesi kapsamında ise sırasıyla şebekeden elektrik satın alma (C_r , retail cost) ve şebekeye elektrik satma (C_{FIT} , fit in tariff cost) maliyetleri kullanılmıştır. Diğer taraftan, eşitlik (39) ile belirlenen OC_t , ilk yatırım maliyetini (I_0 , investmet cost), ilk yatırım maliyeti ile ilişkili vergi ödemesini (T_0 , tax value), sistem ömrü boyunca meydana gelen bakım-onarım giderlerini (OM_t , operational-maintenance cost), sistem ömrü boyunca bileşenlere ait gerçekleşen değişim maliyetini (R_t , replacement cost) ve eğer kredi kullanılmış ise bu krediye bağlı borç tutarını (F_t , financing cost) ve bu tutarla ilişkilendirilmiş vergi ödemesini (T_t) içermektedir. Son olarak eşitlik (40) da yer alan d_a ve d_n sırasıyla fiili ve nominal faiz oranlarını, g ise yıllık enflasyon oranını göstermektedir.

$$NPV = \sum_{t=0}^{lt} (IC_t - OC_t) \quad (37)$$

$$IC_t = S_0 + \sum_{t=1}^{lt} \frac{(E_{FV-Klm} + E_{FV-Bat,şarj}) \cdot C_r + E_{FV-şbk} \cdot C_{FIT} + SV_t}{(1+d_a)^t} \quad (38)$$

$$OC_t = I_0 + T_0 + \sum_{t=1}^{lt} \frac{OM_t + R_t + F_t + T_t}{(1+d_a)^t} \quad (39)$$

$$d_a = (d_n - g)/(1 + g) \quad (40)$$

$$DPBP = \begin{cases} \sum_{t=0}^{lt} (IC_t - OC_t) = 0 \\ d_n > 0 \end{cases} \quad (41)$$

Yukarıda verilen eşitliklerin (37)-(41) çözülmesi sırasında GEDKS maliyeti ($I_0 + T_0$) için deney sistemi kurulumu sırasında ortaya çıkan maliyet kalemi olan 5.805€ değeri kullanılmıştır. Bu maliyeti oluşturan bileşenlere ait satın alma tutarları ise solar FV paneller, bataryalar, evirici/düzenleyici ve klima için sırasıyla 2.500€, 1.400€, 525€ ve 750€ şeklindedir. Geriye kalan 630€ kurulum ve devreye alma işlemleri sırasında meydana gelmiş olup bileşenler arasında eşit olarak paylaştırılmıştır. Herhangi bir sübvansiyon desteği (S_0) ile kredili para kullanımının ($F_t = T_t = 0$) olmadığı durum göz önünde bulundurulmuştur. Sistem ömrünün 25 yıl olduğu (Guerello et al., 2020; Oliva et al., 2019; Ellabban and Alassi, 2019; Aguilar et al., 2019; Li et al., 2018c; Chaianong et al., 2020) ve sistem bileşenleri içerisinde yer alan batarya, evirici/düzenleyici ve klimanın 13. yıl sonunda değiştiği kabul edilmiştir (SSB, 2019; Aguilar et al., 2019; Li et al., 2018c; Pena-Bello et al., 2019). Solar FV paneller ise ilk kurulumdaki hali ile sistem ömrü boyunca yer almıştır (Yingli Solar, 2019; CSUN, 2019). Her bir bileşene ait yıpranma payının solar FV panel grubu ile özdeş olduğu (% 1) durum incelenmiştir (Yingli Solar, 2019; CSUN, 2019). Ayrıca, OM_t ilk yatırım maliyetinin % 2'si (Ellabban and Alassi, 2019; Aguilar et al., 2019), SV_t ise bileşenlere ait satın alma maliyetlerinin % 10'u (Baldvinsson and Nakata, 2014; Ozcan et al., 2019) kabul edilmiştir. C_r ve C_{FIT} değerleri sırasıyla tek zamanlı mesken için 0,081€/kWh (Gazelektrik, 2020) ve 0,041€/kWh (EPDK, 2020) alınmıştır. Yıllık nominal faiz oranı % 10 (Ozcan et al., 2019), yıllık enflasyon oranı ise % 2,5 olarak gözönünde bulundurulmuştur (Ellabban and Alassi, 2019).

8.2 Eksergo-ekonomik Analizler

Yaşam boyu maliyet analizi ile tüm sisteme ait bir değerlendirmenin yapılmasının ardından herbir sistem bileşeni için eksergo-ekonomik değerlendirme

ekserji, maliyet, enerji ve kütle (exergy, cost, energy and mass, EXCEM) ile birim ekserji maliyetleme (specific exergy costing, SPECO) yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda solar FV panel grubu, batarya grubu, evirici/düzenleyici ve klima bileşenleri sırasıyla ele alınmıştır. Her iki eksergo-ekonomik metot ile ilgili ayrıntılı bilgiler ise aşağıda yer almaktadır.

EXCEM analiz yöntemi ile kütle, enerji ve ekserji analizleri her bir bileşen için uygulanmış ve böylece termodinamik kayıplar enerji (kayıp) ve ekserji (kayıp ve yıkım) açısından hesaplanmıştır. Ardından hesaplanan bu kayıplar ile bileşenlere ait toplam indirgenmiş maliyet (ana yatırım, bakım ve onarım, değiştirme, hurdaya ayırma, kazanç) ilişkilendirilmiştir. Son olarak aşağıda verilen eşitlikler (42) ve (43) kullanılarak hesaplanan eksergo-ekonomik performans göstergeleri ile sonuçlar irdelenmiştir (Abd Elbar et al., 2019; Caglayan and Caliskan, 2019; Saloux et al., 2019; Shahsavari and Rajabi, 2018).

$$\dot{R}_{en,k} = \frac{\dot{E}_{l,k}}{\dot{Z}_k^T} \quad (42)$$

$$\dot{R}_{ex,k} = \frac{\dot{Ex}_{l,k}}{\dot{Z}_k^T} \quad (43)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde yer alan $\dot{E}_{l,k}$, $\dot{Ex}_{l,k}$ ve $\dot{Z}_k^T$ sırasıyla k bileşeni için saatlik ortalama enerji kayıp akımını (kW), saatlik ortalama ekserji kayıp akımını (kW) ve toplam saatlik indirgenmiş maliyet akımını (€/h) göstermektedir. EXCEM analizlerinde kullanılan performans göstergeleri olan $\dot{R}_{en,k}$ ve $\dot{R}_{ex,k}$ ise sırasıyla termo-ekonomik ve eksergo-ekonomik parametrelerdir. Her iki performans göstergesinde yer alan $\dot{Z}_k^T$ değerinin belirlenmesi kapsamında ise aşağıda verilen denklemler (44)-(49) kullanılmıştır (Caglayan and Caliskan, 2019; Baldvinsson and Nakata, 2014).

$$\dot{Z}_k^T = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} + \dot{Z}_k^R - \dot{Z}_k^{SV} - \dot{Z}_k^G = \frac{AC_k + OM_k}{\tau} \quad (44)$$

$$AC_k = PW_k \cdot CRF(i, n) \quad (45)$$

$$CRF = \frac{i \cdot (i+1)^n}{(i+1)^{n+1} - 1} \quad (46)$$

$$PW_k = CI_k + \sum_{i=1}^n (R_k - SV_k - G_k) \cdot PWF(i, n) \quad (47)$$

$$PWF = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (48)$$

$$OM_k = OM_{sys} \cdot \frac{PEC_k}{PEC_{sys}} \quad (49)$$

Yukarıda verilen eşitlik (44) ile k bileşenine ait saatlik indirgenmiş toplam maliyet ($\dot{Z}_k^T$) hesaplanmıştır. Eşitlik (44) de yer alan $\dot{Z}_k^T$, saatlik indirgenmiş ilk yatırım ($\dot{Z}_k^{CI}$), bakım ve onarım ($\dot{Z}_k^{OM}$) ile yenileme ($\dot{Z}_k^R$) gider maliyetlerinden yine saatlik indirgenmiş hurda ($\dot{Z}_k^{SV}$) ve kazanç ($\dot{Z}_k^G$) gelir maliyetlerinin çıkarılması ile belirlenmiştir. Bölüm 8.1 ile görüleceği üzere $\dot{Z}_k^R$, solar FV paneller dışındaki tüm sistem bileşenleri için 13. yılsonunda bir kez, $\dot{Z}_k^G$ ise şebekeye elektrik satışı dolayısıyla sadece solar FV paneller için her yıl hesaplanmıştır. Benzer şekilde $\dot{Z}_k^{SV}$, 13. yılsonunda solar FV paneller dışındaki bileşenler için, sistem ömrünün tamamlandığı 25. yılın sonunda ise tüm bileşenler için dikkate alınmıştır. Eşitlik (44) da yer alan τ yıllık çalışma süresini göstermektedir ve sistemin sürekli çalıştığı durum için 8.760 saat alınmıştır. Eşitlik (45) ile verilen AC_k ise k bileşenine ait yıllık maliyettir. GEDKS içinde yer alan her bir bileşene ait bugünkü değer ile (PW_k , present worth) ile sermaye geri kazanım faktörünün (CRF , capital recovery factor) çarpılmasıyla elde edilmiştir. Eşitlik (46) ile verildiği gibi, faiz oranı (i) ve sistem ömrü (n) kullanılarak CRF hesaplanmıştır. Burada faiz oranı % 10 (Baldvinsson and Nakata, 2014; Ozcan et al., 2019), sistem ömrü ise 25 yıl (Guerello et al., 2020; Oliva et al., 2019; Ellabban and Alassi, 2019; Aguilar et al., 2019; Li et al., 2018c; Chaianong et al., 2020) kabul edilmiştir. Eşitlik (47) ise k bileşenine ait yıllık bugünkü değer (PW_k , present worth) hesabında kullanılmıştır. Bu eşitlikte maliyet giderleri (ilk yatırım ve değişim) pozitif, maliyet gelirleri (hurda ve kazanç) ise negatif alınmıştır. Eşitlik (48) ile bugünkü değer faktörü (PWF , present worth factor) yine faiz oranına bağlı olarak belirlenmiştir ve bu değer eşitlik (47) de kullanılmıştır. Son olarak, eşitlik (49) ile k bileşenine ait yıllık bakım ve onarım maliyeti tüm sistem için harcanan bakım ve onarım maliyetinin (tüm sistem maliyetinin % 2'si) sistem bileşenlerine ait satın alma maliyetleri oranında paylaştırılmasıyla elde edilmiştir.

SPECO analiz yönteminde ise bileşen temelli elde edilen ekserji eşitlikleri ile

işletme disiplinine ait temel prensipler bütünleştirilir (Lazzaretto and Tsatsaronis, 2006). Bu sırada eşitlikler (50)-(54) kullanılarak her bir k bileşeni için kütle, ısı transferi ve iş kaynaklı ekserji akımları ile ekonomik prensipler birleştirilmiştir (Akrami et al., 2018; Kianfard et al., 2018; Kiyaninia et al., 2019; Kowsari et al., 2020; Singh et al., 2020).

$$\dot{C}_i = c_i \dot{E}x_i = c_i \dot{m}_i ex_i \quad (50)$$

$$\dot{C}_o = c_o \dot{E}x_o = c_o \dot{m}_o ex_o \quad (51)$$

$$\dot{C}_w = c_w \dot{W} \quad (52)$$

$$\dot{C}_q = c_q \dot{E}x_q \quad (53)$$

$$\sum_o (c_o \dot{E}x_o)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_{q,k} \dot{E}x_{q,k} + \sum_i (c_i \dot{E}x_i)_k + \dot{Z}_k^T \quad (54)$$

Yukarıda verilen eşitliklerin GEDKS bileşenleri için uygulanması sonucunda oluşturulan maliyet dengesi denklemleri ve bu denklem takımının çözümü için gerekli yardımcı eşitlikler Çizelge 8.1 ile verilmiştir.

Çizelge 8.1. Sistem bileşenlerine ait eksergo-ekonomik eşitlikler.

Bileşen	Maliyet eşitliği; yardımcı denklem
Solar FV panel grubu	$\dot{C}_{gun} + \dot{Z}_{FV}^T = \dot{C}_{W,FV-DC}$ $\dot{C}_{gun} = 0$ (Akrami et al., 2018; Behzadi et al., 2018; Kiyaninia et al., 2019; Keshtkar and Khani, 2018)
Evirici/düzenleyici	$\dot{C}_{W,FV-DC} + \dot{C}_{W,Bat-Klm} + \dot{C}_{W,\$bk-Klm} + \dot{Z}_{ED}^T$ $= \dot{C}_{W,Klm} + \dot{C}_{W,FV-Bat,\$sarj} + \dot{C}_{W,FV-\$bk}$ $C_{w,FV-DC} = C_{w,Bat-Klm} = C_{w,FV-Bat,\$sarj} = C_{w,FV-\$bk}$ (Akrami et al., 2018) $C_{w,\$bk-Klm} = 0,081\text{€/kWh}$ (Gazelektrik, 2020)
Batarya grubu	$\dot{C}_{W,FV-Bat,\$sarj} + \dot{C}_{W,\$bk-Bat,\$sarj} + \dot{Z}_{Bat}^T = \dot{C}_{W,Bat-Klm} + \dot{C}_{W,Bat-\$bk}$ $C_{w,\$bk-Bat,\$sarj} = 0, C_{w,FV-Bat,\$sarj} = C_{w,Bat-Klm} = C_{w,Bat-\$bk}$ (Akrami et al., 2018)
Klima	$\dot{C}_{W,Klm} + \dot{Z}_{Klm}^T = \dot{C}_Q$

Yukarıdaki çizelgede yer alan maliyet eşitliklerinin çözülmesi ile her bir k bileşenine ait birim yakıt maliyeti ($c_{F,k}$) ve dolayısıyla ekserji yıkım akımına bağlı maliyet akımı ($\dot{C}_{D,k}$) eşitlik (55) ile gösterildiği gibi belirlenmiştir. Ardından eşitlik (56) ve (57) ile sırasıyla SPECO analizleri kapsamında performans göstergeleri olarak kullanılan eksergo-ekonomik faktör (f_k) ve bağıl maliyet farkı (r_k) hesaplanmıştır (Akbari, 2018; Ansarinasab and Mehrpooya, 2018; Jing et al., 2019;

Kanbur et al., 2018; Mehrpooya et al., 2018c; Rostamzadeh et al., 2018).

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \cdot \dot{E}x_{D,k} \quad (55)$$

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k^T}{\dot{Z}_k^T + \dot{C}_{D,k}} \quad (56)$$

$$r_k = (c_{P,k} - c_{F,k}) / c_{F,k} = \frac{1-\varphi_k}{\varphi_k} + \frac{\dot{Z}_k^T}{c_{F,k} \cdot \dot{E}x_{P,k}} \quad (57)$$

Yukarıda eşitlik (56) ile verilen k bileşenine ait eksergo-ekonomik faktör hesabında kullanılan k bileşenine ait ekserji yıkım akımına bağlı maliyet akımı eşitlik (55) ile gösterildiği gibi k bileşenine ait birim yakıt maliyeti ile ekserji yıkım akımının çarpılmasıyla belirlenmiştir. Eşitlik (57) ile her bir k bileşeni için bulunan bağıl maliyet farkı ise ekserji verimi, saatlik indirgenmiş maliyet akımı, birim yakıt maliyeti ve ürün ekserji akımlarına bağlı olarak hesaplanmıştır.

8.2.1 Geleneksel eksergo-ekonomik analizler

EXCEM eksergo-ekonomik analiz yöntemi sonucu belirlenen exergo-ekonomik parametre ($\dot{R}_{ex,k}$) ve SPECO eksergo-ekonomik analiz yöntemi sonucu hesaplanan eksergo-ekonomik faktör (f_k) ile bağıl maliyet farkı (r_k), geleneksel eksergo-ekonomik analizler kapsamında kullanılan performans göstergeleridir. Bu performans göstergelerinin belirlenmesi sırasında geleneksel ekserji analizleri ile hesaplanan ekserji yıkım ($\dot{E}x_{D,k}$) ve ürün ($\dot{E}x_{P,k}$) akımları dikkate alınmaktadır.

8.2.2 İleri eksergo-ekonomik analizler

EXCEM eksergo-ekonomik analiz yöntemi sonucu belirlenen exergo-ekonomik parametre ($\dot{R}_{ex,k}$) bu kısımda ileri ekserji analizlerinin uygulanması sonucunda ortaya çıkan ekserji yıkım akımları ($\dot{E}x_{D,k}^{UN,EN}$, $\dot{E}x_{D,k}^{UN,EX}$, $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EN}$, $\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}$) ile birleştirilerek tekrardan hesaplanmıştır. Eşitliklerden ((58)-(61)) görüleceği üzere geliştirilmiş eksergo-ekonomik parametreler eşitlik (43) de yer alan ifadenin pay kısmında ileri ekserji yıkım akımlarının kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır.

$$\dot{R}_{ex,k}^{UN,EN} = \frac{\dot{E}x_{D,k}^{UN,EN}}{\dot{Z}_k^T} \quad (58)$$

$$\dot{R}_{ex,k}^{UN,EX} = \frac{\dot{E}x_{D,k}^{UN,EX}}{\dot{Z}_k^T} \quad (59)$$

$$\dot{R}_{ex,k}^{AV,EN} = \frac{\dot{E}x_{D,k}^{AV,EN}}{\dot{Z}_k^T} \quad (60)$$

$$\dot{R}_{ex,k}^{AV,EX} = \frac{\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}}{\dot{Z}_k^T} \quad (61)$$

Yukarıda verilen eşitlikler ((58)-(61)) vasıtasıyla k bileşeni için sırasıyla önlenemez/içsel ($\dot{R}_{ex,k}^{UN,EN}$), önlenemez/dışsal ($\dot{R}_{ex,k}^{UN,EX}$), önlenebilir/içsel ($\dot{R}_{ex,k}^{AV,EN}$) ve önlenebilir/dışsal ($\dot{R}_{ex,k}^{AV,EX}$) ileri eksergo-ekonomik parametreler belirlenmiştir.

SPECO eksergo-ekonomik analiz yönteminin ileri ekserji analizleri ile birarada değerlendirilmesi sırasında ise geliştirilmiş eksergo-ekonomik faktör ($f_k^{AV,EN}$) performans göstergesi olarak kullanılmaktadır. Bu ifade aşağıda verilen eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır (Tan and Keçebaş, 2014; Ansarinasab and Mehrpooya, 2018; Mehrpooya et al., 2018a; Mehrpooya et al., 2018b).

$$f_k^{AV,EN} = \frac{\dot{Z}_k^{AV,EN}}{\dot{C}_k^{AV,EN} + \dot{Z}_k^{AV,EN}} \quad (62)$$

Yukarıda verilen geliştirilmiş eksergo-ekonomik faktör ifadesinde yer alan önlenebilir içsel indirgenmiş maliyet akımları, ilk yatırım maliyeti ($\dot{Z}_k^{AV,EN}$) ve ekserji yıkım akımı ($\dot{C}_k^{AV,EN}$) kaynaklı olup aşağıda verilen eşitlikler aracılığıyla belirlenmiştir (Tan and Keçebaş, 2014; Ansarinasab and Mehrpooya, 2018; Mehrpooya et al., 2018a; Mehrpooya et al., 2018b).

$$\dot{C}_k^{AV,EN} = c_{F,k} \cdot \dot{E}_{D,k}^{AV,EN} \quad (63)$$

$$\dot{Z}_k^{AV,EN} = \dot{Z}_k^{EN} - \dot{Z}_k^{UN,EN} \quad (64)$$

$$\dot{Z}_k^{EN} = \dot{E}x_{P,k}^{EN} \cdot \left(\frac{\dot{Z}}{\dot{E}x_P} \right)_k \quad (65)$$

$$\dot{Z}_k^{UN,EN} = \dot{E}x_{P,k}^{UN} \cdot \left(\frac{\dot{Z}}{\dot{E}x_P} \right)_k^{UN} \quad (66)$$

Eşitlik (63) de yer alan $\dot{C}_k^{AV,EN}$ (€/h) k bileşenine ait önlenebilir/içsel ekserji yıkım akımı kaynaklı maliyet akımıdır ve k bileşenine ait birim yakıt maliyet ile önlenebilir/içsel ekserji yıkım akımının çarpılması sonucu elde edilir. Eşitlik (64)

de yer alan $\dot{Z}_k^{AV,EN}$ (€/h) ise k bileşeni için toplam saatlik indirgenmiş önlenabilir/işsel maliyet akımıdır ve k bileşenine ait toplam saatlik indirgenmiş işsel maliyet akımından ($\dot{Z}_k^{EN}$) toplam saatlik indirgenmiş önlenemez/işsel maliyet akımının ($\dot{Z}_k^{UN,EN}$) çıkarılmasıyla bulunmuştur. Eşitlik (65) ile görüleceği üzere $\dot{Z}_k^{EN}$, k bileşeni için işsel koşuldaki ürün ekserji akımı ($\dot{E}x_{P,k}^{EN}$) ile geleneksel eksergo-ekonomik analizlerle belirlenen toplam saatlik indirgenmiş maliyetin ürün ekserji akımına oranının $\left(\frac{\dot{Z}}{\dot{E}x_P}\right)$ çarpılmasıyla elde edilir. Son olarak, eşitlik (66) da yer alan $\dot{Z}_k^{UN,EN}$ (€/h) k bileşeni için toplam saatlik indirgenmiş önlenemez/işsel maliyet akımıdır ve k bileşenine ait işsel koşulda oluşan ürün ekserji akımı ile önlenemez koşuldaki saatlik indirgenmiş maliyetin ürün ekserji akımına oranının $\left(\frac{\dot{Z}}{\dot{E}x_P}\right)_k^{UN}$ çarpılması sonucunda hesaplanmıştır.

9. BELİRSİZLİK ANALİZİ

Bölüm 5 ile detayları verilen deneysel çalışmalar ile (i) iklim koşulları, (ii) proje odasına ait sıcaklık ve bağıl nem değerleri (konfor koşulları), (iii) solar FV panellere ait yüzey sıcaklıkları, (iv) GEDKS bileşenleri arasındaki güç akımı, (v) klima tarafı soğutucu akışkan çevrimine ait kütleli debi, alçak ve yüksek basınçlar ile akışkan sıcaklıkları, (vi) klima tarafı hava akışına ait sıcaklıklar ölçülmüş ve kaydedilmiştir (Bkz. Şekil 5.2 ve 5.3). Tüm bu veri ölçümü ve kaydı yapılırken ise ölçüm aletlerinin seçimi, kalibrasyon durumu, bulunduğu çevre, deney planlaması, vb. nedenlerden ötürü elde edilen veri grubunda bazı belirsizlikler meydana gelmektedir. Bu veri grubunun doğruluğunu ve güvenilirliğini ortaya koymak için ise belirsizlik analizine ihtiyaç vardır. Bu analiz Holman tarafından açıklanan yöntem kullanılarak aşağıdaki eşitlik yardımıyla yapılabilir (Tan and Keleşbaşı, 2014).

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} \cdot w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \cdot w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (67)$$

Yukarıda yer alan eşitlik (67) de x bağımsız değişkenleri, w ise bu bağımsız değişkenlere ait belirsizlikleri ifade etmektedir. w_R ise bağımsız değişkenlere ait belirsizliklerin bir arada etkilediği toplam belirsizliği göstermektedir. Belirsizlik analizlerinin yapıldığı ölçüm sistemine ait temel bilgiler ise aşağıda Çizelge 9.1 ile verilmiştir.

Çizelge 9.1 Ölçüm sistemine ait teknik özellikler.

Parametre	Ekipman	Ölçüm aralığı	Belirsizlik
T_a	PT100	(-40 °C) - (+80 °C)	%0,1
RH_a	Kapasitif nem sensörü	%0 - %100	%1,5 – %2
v_r	Katı hal manyetik sensör	0,5 m/s - 89 m/s	%5
y_r	Rüzgâr gülü ve potansiyometre	0 ° - 360 °	%0,8
POA	Silikon fotodiyot piranometre	0 kW/m ² - 2 kW/m ²	%3
$T_{soğ}, T_{ısı}$	PT100	(-50 °C) - (+400 °C)	%0,1
$P_{FV,DC}$	Gerilim ve akım ölçer	0 kW – 3,2 kW	%1
P_{Klm}		0 kW – 3 kW	%1
SOC		%0 - %100	%1
Veri kayıt	Evirici ve düzenleyici	0 kW – 3.2 kW	%0,5
Veri kayıt	Kayıt ve kontrol cihazı	0 mA - 20 mA, 0 V - 10 V	%0,5

10. HASSASİYET ANALİZİ

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen hassasiyet analizleri ile GEDKS'nin klima kısmında farklı soğutucu akışkan kullanımı (R410A, R134a, R22) durumu ve soğutucu akışkan olarak R410A kullanıldığı koşuldaki farklı iklim bölgesi (İzmir, Berlin) ile farklı çalışma saatleri (sürekli, ofis saatleri-hafta içi 08:00-18:00) etkisi araştırılmıştır. Bulgular enerji, ekserji (geleneksel ve ileri), yaşam boyu maliyet ve eksergo-ekonomik (geleneksel ve ileri) performans göstergeleri temel alınarak tartışılmıştır. İklim bölgesi seçimi yapılırken Köppen-Geiger sınıflandırma metodu kullanılmıştır (Kottek et al., 2016). Bu sınıflandırma metodunda 3 karakterli (ana iklim, yağmur durumu ve sıcaklık) bir kodlama yapılmakta olup Avrupa'nın güneyinde (Portekiz, İspanya, Fransa, İtalya, Yunanistan, Türkiye) görülen ve İzmir ilini de içeren Csa (C:sıcak ılıman, s:bozkır, a:sıcak yaz) iklim tipi ile Balkanlarda ve Orta ve Batı Avrupada görülen (Bulgaristan, Romanya, Hırvatistan, Bosna Hersek, Polonya, almanya, Danimarka, Belçika, İngiltere) ve Berlin ilinide içeren Cfb (C:sıcak ılıman, f:tamamen nemli, a:ılık yaz) iklim tipi seçilmiştir (Kottek et al., 2016). GEDKS'ye ait çalışma saati seçimi sırasında ise güneşlenme süresinin temel alındığı ofis saatleri ile batarya bileşeninin aktif olarak kullanıldığı sürekli çalışma durumu dikkate alınmıştır.

11. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu kısımda GEDKS'ye ait modelleme ve benzetim çalışmalarına (nümerik çalışmalar) dayalı gerçekleştirilen termodinamik (enerji ve ekserji) ve ekonomik (yaşam boyu maliyet ve eksergo-ekonomik) analizler kapsamında elde edilen bulgular ve tartışma yer almaktadır.

11.1 Yıllık Enerji Analizleri

Bu bölümde yıllık enerji analizinin geliştirilen nümerik modele (TRNSYS ve Pack Calculation Pro) dayalı olarak GEDKS'ye uygulanması sonucunda elde edilen bulgular verilmiştir. Tüm sistem için kendi kendine yeterlilik ile öz tüketim oranları, sistemi oluşturan bileşenler için ise enerji verimi ile tesir katsayıları enerji performans göstergeleri olarak kullanılmıştır. Bölüm başında gerek tüm sistem gerekse sistem bileşenlerinin enerji performansları üzerinde etkili olan saha iklim veri grubu kapsamında elde edilen bulgular tartışılmıştır.

11.1.1 İklim veri grubu

Bu tez çalışması sırasında şebeke bağlantılı solar FV teknolojisinin klima ve batarya grubu ile bütünleşik kullanımı yıllık enerji analizleri ile incelenmiştir. Solar FV paneller için belirtilen standard test koşulları ile klima için kullanılan tasarım koşullarının gerçek zamanlı çalışma durumunda çoğu kez farklılık göstermesi dolayısıyla GEDKS kurulumunun gerçekleştiği konuma ait iklim özellikleri bu bölümde öncelikli olarak tartışılmıştır. Çizelge 11.1 ile deneysel ve nümerik çalışmalarla elde edilen bulgular verilmiştir. Çizelgede yer alan deneysel çalışma bulguları için 2019 yılı veri grubu kullanılmış olup 26 Mayıs-29 Haziran, 6-16 Eylül ve 11-17 Aralık günleri arasında kaydedilemeyen veri grubu bir önceki yıl ölçülen değerler ile tamamlanmıştır. Ayrıca, ocak ayında ölçülen küresel yatay ışıınım (GHI) değeri 2020 yılı için verilmiştir. Deneysel çalışmalar ile belirlenen T_a , RH_a , v_r , y_r ve POA/GHI parametrelerine ait belirsizlik kayıt cihazı belirsizliğinde göz önünde bulundurulmasıyla sırasıyla % 0,6, % 2,6, % 5,5, % 1,3 ve % 3,5 olarak bulunmuştur.

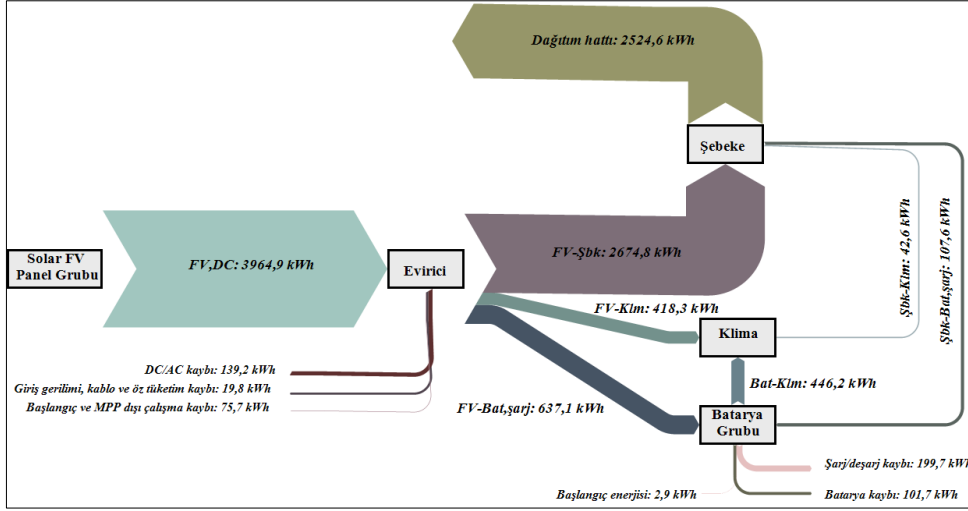
Çizelge 11.1. Deneyisel ve nümerik çalışmalarla elde edilen iklim koşulları.

Ay	Değerler sırasıyla deneyisel/TRNSYS/PVSOL/Meteonorm					
	T _a (°C)	RH _a (%)	v _r (m/s)	y _r (°K)	GHI (kWh/m ²)	POA (kWh/m ²)
Oca	9/7,8/6,9/6,9	73/72,8/-/73,1	2,8/3,3/-/2,7	130,7/220,9/-/181	74,8/68,4/64,6/67,8	-/103,9/94,7/106,4
Şub	10,2/8,2/7,5/8	64,1/70,2/-/68,1	3,9/3,7/-/3,2	117,2/223,6/-/187	-/73,1/73,5/77,7	124,7/93,7/94/100,4
Mar	13,4/11,1/10,8/11,9	54,1/62,6/-/60,1	3,4/3,8/-/3,2	142,7/216,9/-/181	-/111/123,9/130,2	191,1/126,8/144,6/156,7
Nis	16,2/15,6/14,3/15,6	52,3/61,8/-/56,8	3/3,4/-/2,7	154,3/238,4/-/224	-/143,5/163,4/167,6	177,8/147,9/167/174,4
May	21,6/20,4/20/21,3	51,9/54,5/-/49,6	2,9/3,4/-/2,7	156,9/236,4/-/181	-/198,7/203,9/211,4	190,9/192,4/189,8/199,7
Haz	26,5/24,7/25,1/26	46,4/47,2/-/40,7	3/3,8/-/3,4	149,5/258,2/-/181	-/214/221,7/230,1	215/197,1/200,8/207,7
Tem	28,4/27,4/28,6/28,5	41,4/45,5/-/41,3	3,4/4,2/-/3,8	128,6/251,6/-/181	-/223,4/236,1/242,3	235,6/211,9/213,5/224,8
Agu	29,5/26,2/28,2/27,7	40,1/50,6/-/45,1	4,2/4/-/3,5	121,5/261,8/-/181	-/204,7/211/217	237,7/209,8/215/221,6
Eyl	24,8/22,2/22,6/22,3	47/57,4/-/53,1	2,7/3,2/-/2,8	143,2/228,6/-/181	-/156,3/162,9/168,5	206,5/178,6/185,1/197,7
Eki	21,1/17,7/18,1/18,1	61,8/63,7/-/60,6	2,2/3/-/2,5	167,3/220,9/-/187	-/105/115,6/120,2	170/131,6/147/160,7
Kas	17,9/13/12/12,4	65/67,8/-/69,8	2/3,3/-/2,3	137,1//223,4/-/181	-/71,7/74,8/77,6	111,1/103,1/110/118,3
Ara	11/9,2/8,3/8,2	66,7/75,6/-/73,8	3,2/3,8/-/2,6	110,6/216,6/-/181	50,2/65,1/54,6/58,5	-/106,9/81,7/92,3
Yıl	19,2/17/16,9/17,2	55,4/60,8/-/57,6	3,1/3,6/-/3	138,3/233,1/-/185	-/136,2/142,2/147,4	-/150,3/153,6/163,4

Çizelge 11.1'den görüleceği üzere nümerik çalışmalar kapsamında TRNSYS, PVSOL ve Meteororm programlarına yer verilmiştir (Meteororm, 2020; PVSOL, 2020; TRNSYS, 2020). Çizelgede yer alan tüm değerler bir saat aralıklı veri grubu kullanılarak oluşturulmuştur. 2019 yılında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla elde edilen iklim koşullarından T_a tipik meteorolojik yılı temsilen kabul edilen değerlerin temmuz ayı dışında üzerinde, RH_a genel olarak altında, y_r ise sürekli bir şekilde altında ölçülmüştür. Deneysel çalışmalar v_r açısından tipik meteorolojik yıl ile benzerlik gösterse de POA ve GHI sekiz ay boyunca daha yüksek miktarlarda meydana gelmiştir. Ayrıca, solar FV panellere ait elektrik üretim miktarını etkileyen GHI (ocak ve aralık ayları) ve POA (diğer aylar) değerlerinin birlikte kullanılması durumunda *RMSE* değeri TRNSYS, PVSOL ve Meteororm programları için sırasıyla 406,2 kWh/m²/kWh/m², 405,4 kWh/m²/kWh/m² ve 288,5 kWh/m²/kWh/m² bulunmuştur. Solar FV panellere ait elektrik üretimi verimini etkileyen T_a için *RMSE* ise TRNSYS, PVSOL ve Meteororm programları kullanımı durumunda sırasıyla 11,3 °C/°C, 11,1 °C/°C ve 11,1 °C/°C şeklinde hesaplanmıştır. Bu durumda, deneysel çalışmalar ile elde edilen saatlik T_a değerlerinin her bir program tarafından üretilen değerlerden tüm yıl boyunca neredeyse aynı oranda saptığı söylenebilir. Fakat, deneysel çalışmalar ile saatlik bazda elde edilen POA/GHI değerleri Meteororm programı tarafından üretilen değerlere daha yakın gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, incelenen yıla bağlı olarak iklim koşullarının ve dolayısıyla sisteme ait enerji performansının değişiklik gösterebileceği belirlenmiştir. Bu sebeple, yıllık enerji analizleri kapsamında kullanılan iklim koşulları için yazılım programı tarafından üretilen tipik meteorolojik yıl değerleri göz önünde bulundurulmuştur.

11.1.2 Tüm sisteme ait makro boyutta inceleme

İklim koşullarının elde edilmesinin ardından PVSOL ve TRNSYS paket programları kullanımını temel alan yıllık enerji analizleri tüm sistem için makro boyutta gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda Bölüm 6.1 ile verilen işlem adımlarının uygulanması ve Şekil 7.1 ile verilen enerji modelinin kullanılması ile PVSOL paket programı çalıştırılmıştır. Bunun sonucunda elde edilen yıllık enerji benzetimi değerleri Şekil 11.1 ile Sankey enerji akış diyagramı kullanılarak, Çizelge 11.2 ile ise aylık değerler temel alınarak verilmiştir.



Şekil 11.1. PVSOL programı benzetim sonuçlarına göre Sankey enerji akış diyagramı.

Şekil 11.1 ile görüleceği üzere solar FV panel grubu tarafından DC kısımda üretilen yıllık enerji toplamı 3.964,9 kWh'dir. Evirici sonrasında % 5,9 oranında enerji kaybı ile 3.730,2 kWh enerji üretimi gerçekleşmiştir. Bu enerjinin % 71,7'si (2.674,8 kWh) şebekeyi, % 17,1'i (637,1 kWh) batarya grubunu ve % 11,2'si (418,3 kWh) klimayı beslemek için kullanılmıştır. Diğer taraftan, batarya grubu % 85,6'sı solar FV panel grubu (637,1 kWh) ve % 14,4'ü şebeke (107,6 kWh) olmak üzere yıl boyunca 744,7 kWh tutarındaki bir enerji ile beslenmiştir. Klimanın yıl boyunca tükettiği 907 kWh tutarındaki enerjinin kaynak dağılımı ise % 49,2 batarya grubu (446,2 kWh), % 46,1 solar FV panel grubu (418,3 kWh) ve % 4,7 şebeke (42,6 kWh) şeklindedir. Ayrıca, batarya grubunda şarj/deşarj sırasındaki meydana gelen enerji kaybının (199,7 kWh) klimaya ait yıllık tüketimin (907 kWh) neredeyse dörtte birine karşılık geldiği görülmüştür. Yıllık kendi kendine yeterlilik (SS) ve öz tüketim oranları (SC) ise sırasıyla 0,93 ve 0,39 şeklinde elde edilmiştir.

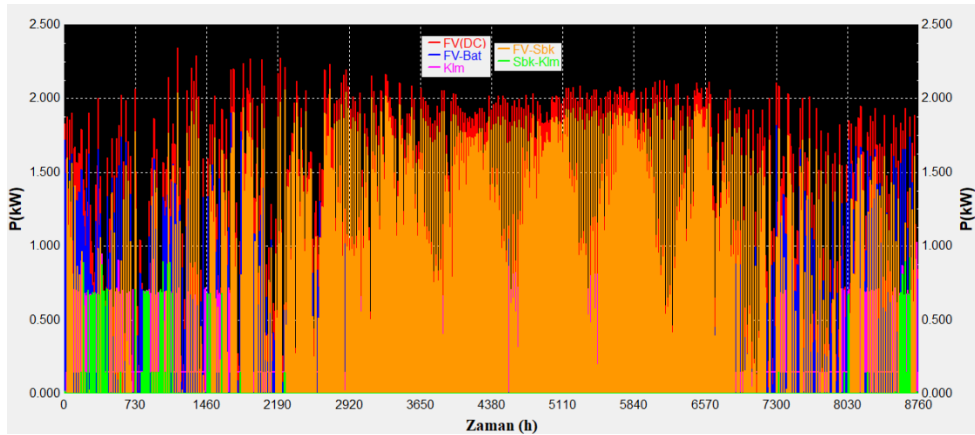
Çizelge 11.2 ile solar FV panel grubu tarafından doğru akımda ($E_{FV,DC}$) gerçekleştirilen en yüksek ve en düşük enerji üretimi değerlerinin ağustos (446,1 kWh) ve aralık (174,8 kWh) aylarına ait olduğu görülmüştür. Ayrıca, solar FV panellerin ocak ayında çok düşük mertebede olmak üzere (0,01 kWh) tüm aylarda şebekeyi beslediği belirlenmiştir.

Çizelge 11.2. PVSOL yıllık enerji benzetimi sonuçları.

Aylar/ Yıllık	$E_{FV,DC}/E_{FV,AC}$ (kWh)	$E_{FV-Şbk}/E_{Şbk-GEDKS}$ (kWh)	$E_{FV-Bat,sarj}/E_{Şbk-Bat,sarj}$ (kWh)	$E_{FV-Klm}/E_{Şbk-Klm}$ $/E_{Bat-Klm}$ (kWh)	SOC (%)	SS/SC (-)
Oca	204,9/175,4	0,0/11,4	118,9/0,0	56,5/11,4/82,1	50,13	0,92/1,00
Şub	213,4/200,8	72,3/70,3	83,7/54,9	44,9/15,4/75,2	82,37	0,67/0,66
Mar	329,6/315,9	213,4/56,2	54,7/44,4	47,8/11,8/55,5	89,61	0,68/0,35
Nis	374,9/359,5	292,7/0,0	37,9/0,0	28,9/0,0/21,0	95,19	1,00/0,22
May	408,4/391,3	324,7/0,0	33,8/0,0	32,9/0,0/18,7	95,42	1,00/0,21
Haz	423,7/406,8	323,8/0,0	40,5/0,0	42,4/0,0/22,4	95,09	1,00/0,24
Tem	439,6/421,4	331,5/0,0	45,4/0,0	44,6/0,0/25,6	95,03	1,00/0,25
Ağu	446,1/428,8	343,5/0,0	45,4/0,0	39,9/0,0/25,4	95,06	1,00/0,23
Eyl	393,3/377,2	353,3/0,0	15,1/0,0	8,8/0,0/7,8	95,75	1,00/0,10
Eki	317,5/302,3	229,7/0,0	47,8/0,0	24,8/0,0/26,7	94,89	1,00/0,28
Kas	238,7/211,3	142,2/2,9	48,3/2,1	20,6/0,7/28,6	94,76	0,96/0,44
Ara	174,8/139,5	47,8/9,4	65,6/6,2	26,1/3,3/57,1	84,51	0,91/0,73
Yıllık	3.964,9/3.730,2	2.674,8/150,2	637,1/107,6	418,3/42,6/446,2	88,98	0,93/0,39

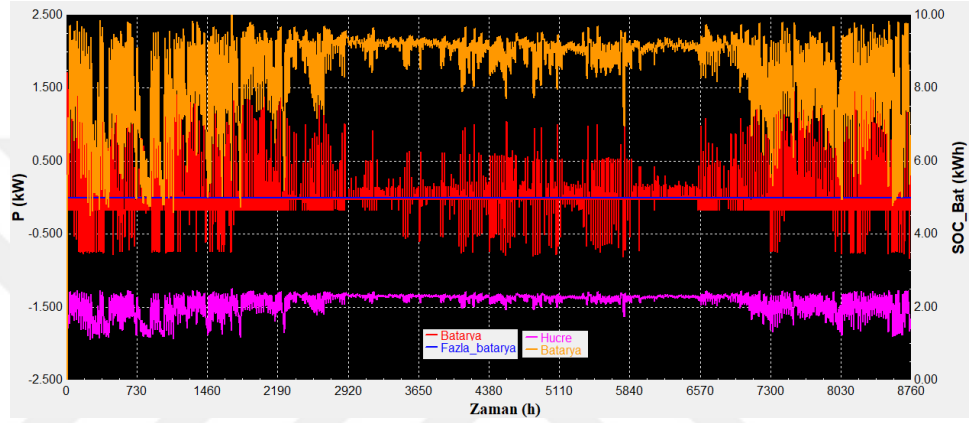
Buna karşın, sistemin şebekeden aldığı enerjiye ($E_{\text{Şbk-GEDKS}}$) ait en yüksek değer şubat ayında (70,3 kWh) olmak üzere tamamı kış aylarında gerçekleşmiştir. Şebekenin batarya grubunu şarj ettiği ($E_{\text{Şbk-Bat,şarj}}$) ve klimayı beslediği ($E_{\text{Şbk-Klm}}$) durumlar için de benzer aylık dağılımlar söz konusudur. Bu enerji etkileşimi bulgularının sonucu olarak ise nisan-ekim ayları arasında SS “1” değerini almıştır. Bu aylarda klima enerji ihtiyacının tamamı doğrudan solar FV paneller ile ve/veya dolaylı olarak solar FV panel grubu tarafından şarj edilen batarya grubu ile sağlanmıştır. Şubat ve mart aylarında ise şebekeden alınan enerji miktarının yüksek olmasına bağlı olarak en düşük SS değerleri sırasıyla 0,67 ve 0,68 şeklinde belirlenmiştir. SC değerinin ise yaz aylarında düşük (0,21-0,25), geçiş aylarında değişken (0,10-0,35) ve kış aylarında yüksek (0,4-1,0) değerlere sahip olduğu bulunmuştur. Bu durum solar FV paneller tarafından üretilen enerjinin ($E_{\text{FV,DC}}$) kış aylarında azalmasına karşın klima tarafından tüketilen enerjinin (E_{Klm}) artış göstermesinden kaynaklanmıştır. Ocak ayında “1” değerini alması ise bataryalara ait SOC değerinin düşük mertebelerde olması dolayısıyla solar FV paneller tarafından üretilen enerjinin batarya grubu şarjı için kullanılmasına bağlıdır.

PVSOL paket programı ile gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının ardından Bölüm 6.2 ile işlem adımları ve bileşen modellerine ait test çalışmaları verilen TRNSYS paket programı yıllık enerji analizleri kapsamında kullanılmıştır. Bu sırada kurulan TRNSYS enerji modelinin (Bkz. Şekil 7.2) bir saat aralıklı benzetim zamanı altında bir yıl boyunca çalıştırılması sonucunda GEDKS bileşenleri arasında ortaya çıkan yıllık güç etkileşimi Şekil 11.2 ile verilmiştir.



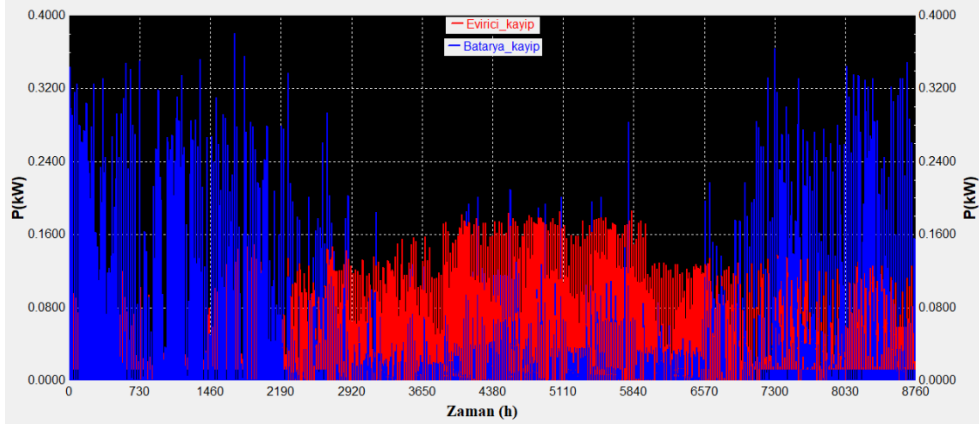
Şekil 11.2. TRNSYS programı benzetim sonuçlarına göre bileşenler arası güç etkileşimi.

Şekil 11.2 ile görüleceği üzere solar FV panel grubu tarafından üretilen güç tüm aylarda şebekeyi beslemiştir. Klima tarafından tüketilen gücün şebeke tarafından sağlandığı durum tamamen kış aylarında gerçekleşmiş olup en yüksek değerler şubat ve ocak aylarına ait bulunmuştur. Ayrıca, en yüksek değerler ocak ve aralık aylarında olmak üzere solar FV panel grubu tüm aylarda batarya grubuna güç aktarımı sağlamıştır. GEDKS bileşenleri arasında meydana gelen güç etkileşimi sırasında batarya grubu özelinde meydana gelen güç ve enerji etkileşimi ise aşağıda Şekil 11.3 ile verilmiştir.



Şekil 11.3. TRNSYS programı benzetim sonuçlarına göre batarya güç etkileşimi.

Şekil 11.3'den elde edilen ilk sonuç batarya grubunda tüm yıl boyunca bir enerji fazlasının meydana gelmemesi olarak belirlenmiştir. Bu durum Bölüm 6.2 de tanımlanan oransal yüksek SOC limiti (0,97) değerinin tanımlanması sayesinde gerçekleşmiştir. Diğer taraftan batarya grubuna ait güç değerinin zamanla pozitif ve negatif değer alması sırasıyla batarya şarjı ve deşarjı sırasındaki güç akışını göstermektedir. Bu akış tüm yıl boyunca batarya şarjı için daha yüksek gerçekleşmiştir ve kış aylarında bu değer batarya deşarjına göre oldukça yüksektir. Tekli batarya ve batarya grubuna ait doluluk değerlerinde kış aylarında daha büyük, yaz aylarında ise daha küçük dalgalanmalar yaşanmıştır. Bu durum klimanın daha yüksek güç gereksinime karşın solar FV panel grubu tarafından üretilen gücün daha düşük mertebelerde kalmasından kaynaklanmıştır. Batarya grubu için elde edilen güç-enerji etkileşimi sırasında meydana gelen doğru akımdan alternatif akıma güç dönüşümü (evirici) ve batarya şarjı sırasında meydana gelen güç kayıpları ise Şekil 11.4 de yer almaktadır.



Şekil 11.4. TRNSYS programı benzetim sonuçlarına göre eviricide meydana gelen güç kayıpları.

Şekil 11.4'den görüleceği üzere kış aylarında güç etkileşiminin daha fazla olmasından ötürü batarya şarjı sırasında, yaz aylarında ise daha yüksek güç üretimi değerleri gerçekleşmesinden dolayı doğru akımdan alternarif akıma güç dönüşümü (DC/AC) ve doğru akımdan yine doğru akıma güç düzenlenmesi (DC/DC) sırasında daha yüksek güç kayıpları meydana gelmiştir. Tüm bu sonuçların ardından ise TRNSYS paket programı benzetim çalışmaları ile elde edilen yıllık ve aylık bazda enerji etkileşimi değerleri Çizelge 11.3 ile verilmiştir. Bu çizelge ile verilen değerler göz önünde bulundurulduğunda solar FV panel grubu tarafından doğru akım tarafında üretilen enerjinin ($E_{FV,DC}$) en yüksek ve en düşük değerinin sırasıyla temmuz (450,7 kWh) ve şubat (218,7 kWh) aylarında gerçekleştiği ve yıllık enerji toplamının ise 4.011,0 kWh olduğu belirlenmiştir. Evirici sonrasında solar FV paneller tarafından üretilen enerjide % 8,2 oranında bir enerji kaybının meydana gelmesiyle alternatif akım tarafında ($E_{FV,AC}$) 3.683,8 kWh enerji üretimi gerçekleşmiştir. Bu enerjinin % 68,9'u şebekeyi, % 20,4'ü batarya grubunu ve % 10,7'si klimayı beslemek için kullanılmıştır. Solar FV paneller tarafından tüm aylarda şebekeye enerji beslemesi ($E_{FV-Şbk}$) yapılmıştır. Diğer taraftan sistemin şebekeden aldığı enerjiye ($E_{Şbk-GEDKS}$) ait maksimum değerler ocak (24,6 kWh) ve şubat (26,1 kWh) aylarında olmak üzere tamamı kışın gerçekleşmiştir. Batarya grubu GEDKS gerçek çalışma koşullarında olduğu gibi tamamıyla solar FV panel grubu tarafından olmak üzere yıl boyunca 752,9 kWh tutarındaki bir enerji ($E_{FV-Bat,şarj}$) ile beslenmiştir. Klimanın yıl boyunca tükettiği 1.060,1 kWh tutarındaki enerjinin (E_{Klm}) kaynak dağılımı ise % 56,3 batarya grubu, % 37,2 solar FV panel grubu ve % 6,5 şebeke şeklindedir.

Çizelge 11.3. TRNSYS yıllık enerji benzetim sonuçları.

Aylar/ Yıllık	$E_{FV,DC}/E_{FV,AC}$ (kWh)	$E_{FV-Şbk}/E_{Şbk-GEDKS}$ (kWh)	$E_{FV-Bat,sarj}/E_{Şbk-Bat,sarj}$ (kWh)	$E_{FV-Klm}/E_{Şbk-Klm}/E_{Bat-Klm}$ (kWh)	SOC (%)	SS/SC (-)
Oca	244,2/218,2	51,5/24,6	134,3/0,0	32,4/24,6/99,3	76,72	0,84/0,79
Şub	218,7/195,7	65,1/26,1	96,8/0,0	33,8/26,1/77,4	76,00	0,81/0,70
Mar	291,5/264,0	130,7/3,8	95,8/0,0	37,5/3,8/77,2	84,78	0,97/0,55
Nis	332,3/306,4	226,0/0,3	50,6/0,0	29,8/0,3/38,7	90,25	0,99/0,32
May	424,0/395,5	357,4/0,0	15,2/0,0	22,9/0,0/12,2	93,78	1,00/0,16
Haz	424,8/394,6	336,7/0,0	19,9/0,0	38,0/0,0/16,0	92,74	1,00/0,21
Tem	450,7/417,3	339,4/0,0	28,6/0,0	49,2/0,0/23,9	91,72	1,00/0,25
Ağu	449,7/416,9	343,8/0,0	27,6/0,0	45,5/0,0/21,3	91,79	1,00/0,24
Eyl	390,6/365,2	340,6/0,0	11,4/0,0	13,2/0,0/8,8	93,80	1,00/0,13
Eki	293,6/270,3	196,8/0,0	49,3/0,0	24,2/0,0/41,1	90,88	1,00/0,33
Kas	236,1/212,2	81,8/0,5	97,8/0,0	32,6/0,5/79,1	84,39	0,99/0,65
Ara	254,9/227,5	66,5/13,2	125,7/0,0	35,4/13,2/101,6	81,47	0,91/0,74
Yıllık	4.011,0/3.683,8	2.536,4/68,5	752,9/0,0	394,4/68,5/596,8	87,36	0,96/0,42

SS değeri bu enerji etkileşimi bulgularının sonucu olarak mayıs-ekim ayları arasında “1” değerini almıştır. Ocak ve şubat aylarında ise şebekeden alınan enerji miktarının yüksek olmasına bağlı olarak en düşük SS değerleri sırasıyla 0,84 ve 0,81 şeklinde belirlenmiştir. SC değerinin yaz aylarında düşük (0,21-0,24), geçiş aylarında değişken (0,13-0,55) ve kış aylarında yüksek (0,65-0,79) değerlere sahip olduğu bulunmuştur. Bu durum solar FV paneller tarafından üretilen enerjinin ($E_{FV,DC}$) kış aylarında azalmasına karşın klima tarafından tüketilen enerjinin (E_{Klm}) artış göstermesinden kaynaklanmıştır.

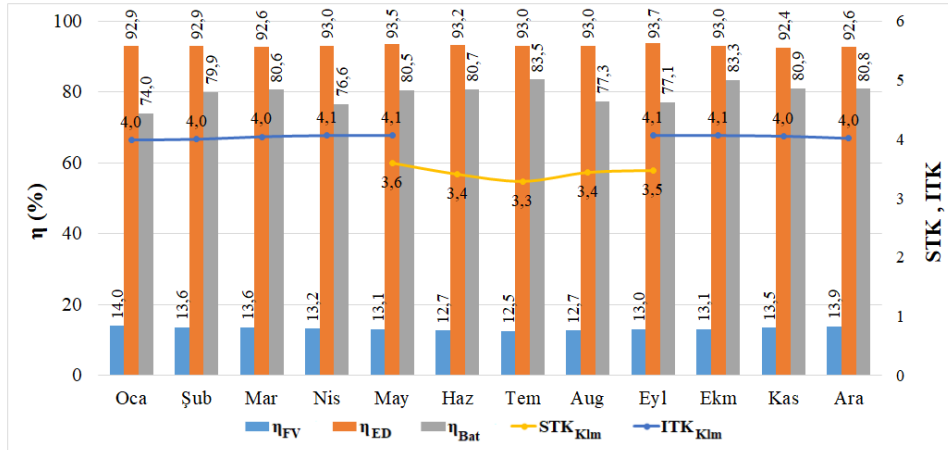
Her iki paket programının kullanılması ile elde edilen benzetim sonuçları ve Ağustos 2019 da gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları kullanılarak bir kıyaslama gerçekleştirilmiştir. Buna göre, solar FV panel grubu tarafından doğru akım kısmında üretilen yıllık enerji miktarı PVSOL ve TRNSYS programları tarafından sırasıyla 3.964,9 kWh ve 4.011,0 kWh bulunmuştur. Ağustos ayında ise PVSOL tarafından 446,1 kWh, TRNSYS tarafından ise 449,7 kWh enerji üretimi değeri modellenmiştir. Buna karşın Bölüm 5 ile detayları verilmiş olan gerçek zamanlı deneysel çalışmalarla ağustos ayında solar FV elektrik üretimi $415,2 \pm \%1,5$ kWh şeklinde ölçülmüştür. Bu değerler ışığında PVSOL ve TRNSYS programının deneysel çalışmalara göre sırasıyla % 7,4 ve % 8,3 oranında daha yüksek üretim değerlerini modellediği belirlenmiştir. Bununla birlikte, GEDKS'nin yaklaşık dört yıldan fazla bir süredir çalıştığı (% 4 oranında bozunma) bilinmelidir (Jurasz et al., 2020). Ayrıca, panel yüzeylerinde tozlanma, kirlenme, vb. leri durumlarının da etkili olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Bu enerji üretiminin eviricide meydana gelen kayıplar sonrası dağılımı ise PVSOL programı tarafından % 71,7 şebeke (2.674,8 kWh), % 17,1 batarya grubu (637,1 kWh) ve % 11,2 klima (418,3 kWh) şeklinde bulunmuştur. TRNSYS programı ise aynı dağılımı % 68,9 şebeke (2.536,4 kWh), % 20,4 batarya grubu (752,9 kWh) ve % 10,7 klima (394,4 kWh) olarak belirlemiştir. Her iki model kapsamında belirlenen enerji üretimi dağılımında oldukça benzer paylar elde edilmiştir. Klimaya ait yıllık enerji tüketim değerleri ise PVSOL ve TRNSYS programları tarafından sırasıyla 907 kWh ve 1.060,1 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu tüketim değerlerinin enerji kaynağı dağılımı ise PVSOL tarafından % 49,2 batarya grubu (446,2 kWh), % 46,1 FV panel grubu (418,3 kWh) ve % 4,7 şebeke (42,6 kWh) olarak hesaplanmıştır. TRNSYS

programı ile ise % 56,3 batarya grubu (596,8 kWh), % 37,2 solar FV panel grubu (394,2 kWh) ve % 6,5 şebeke (68,5 kWh) şeklinde bir dağılım elde edilmiştir. TRNSYS tarafından enerji tüketimi ve şebekeden enerji kullanımı sadece klima için gerçekleştirildiğinden ötürü batarya grubunun bu enerji tüketimini karşılama payı daha fazla bulunmuştur. Diğer taraftan, klima enerji tüketimini karşılamada solar FV paneller daha az oranda kullanılmıştır. 2019 yılı Aralık ayında klimanın çalıştığı 10 örnek gün için bir dakika aralıklarla kaydedilen veri grubu kullanılarak gerçekleştirilmiş olan gerçek zamanlı deneysel çalışmalarla $57,6 \text{ kWh} \pm \% 1,5$ (aylık $178,6 \text{ kWh} \pm \% 1,5$) tutarında enerji tüketimi ölçülmüştür. PVSOL ve TRNSYS programları ile ilgili tüketimi 86,5 kWh ve 150,3 kWh olarak hesaplamıştır. TRNSYS klima bileşeni modeli (tip 922c) ile bütünleşik kullanılan bina modeli (tip 56) ve termostat modeli (tip 108) aralık ayı için % 15,8 oranında daha düşük bir tüketim değeri belirlenmiştir. Bir başka ifade ile üretici firma tarafından tasarım koşulları için verilen yıllık enerji tüketimi değerini kullanılarak kurulan PVSOL klima modeli ile elde edilen sonuç, gerçek koşullarda çok daha fazla miktarlarda gerçekleşmiştir. GEDKS içinde enerji depolama kısmında yer alan batarya grubuna ait yıllık şarj ve deşarj enerjisi miktarları PVSOL programı tarafından 744,6 kWh ve 446,2 kWh, TRNSYS programı tarafından ise 752,9 kWh ve 596,8 kWh olarak modellenmiştir. TRNSYS programı ile gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında batarya grubunun daha etkin bir biçimde kullanıldığı görülmüştür. Ayrıca, PVSOL programında batarya % 85,6 oranında şebeke (637,1 kWh) ve % 14,4 oranında solar FV panel grubu (107,6 kWh) tarafından şarj edilirken TRNSYS programında % 100 oranında solar FV panel grubu (752,9 kWh) tarafından şarj edilmiştir. GEDKS'nin gerçek zamanlı çalışma koşulu da TRNSYS programında olduğu gibidir. Bataryalara ait SOC değeri temmuz ayı için ele alındığında PVSOL programı tarafından % 92,8 ile % 96,6 oranında istikrarlı bir şekilde değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Buna karşın TRNSYS programı tarafından alt eşik değerinin % 78 mertebelerine kadar düştüğü görülmüştür. Deneysel çalışmalarla ise bu alt eşik değer tüm ay boyunca farklı mertebelerde ($0,55 \pm \% 1,5$, $0,7 \pm \% 1,5$ ve $0,8 \pm \% 1,5$) ölçülmüştür. Bu sebeple TRNSYS programı ile kurulan batarya modelin deneysel çalışmaları daha iyi yansıttığı bulunmuştur.

Yukarıda PVSOL ve TRNSYS paket programları kullanımı temel alan ve tüm sistem için makro boyutta gerçekleştirilen enerji analizleri sonucunda TRNSYS programının daha başarılı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bu sebeple, bu kısımdan sonra yer alacak nümerik çalışmalara dayalı gerçekleştirilen bileşen temelli yıllık enerji ve ekserji (geleneksel ve ileri) analizleri kapsamında kullanılmasına karar verilmiştir.

11.1.3 Bileşen temelli inceleme

GEDKS bileşenleri içerisinde yer alan solar FV panel grubu, evirici/düzenleyici ve batarya grubuna ait olan enerji verimleri ile klima için belirlenen tesir katsayıları nümerik çalışmalar ile dinamik olarak belirlenmiştir. Bu kapsamında TRNSYS paket programı ile kurulan enerji modeli (Bkz. Şekil 7.2) bir yıl boyunca çalıştırılmıştır ve TRNSYS eşitlik modeli kullanılarak bileşenlere ait enerji verimi ile klimaya ait tesir katsayıları denklemleri oluşturulmuştur (eşitlikler (23)-(26)). Aşağıda Şekil 11.5 ile sistem bileşenlerine ait enerji analizi sonucunda elde edilen enerji performans göstergelerine ait aylık değerler verilmiştir.

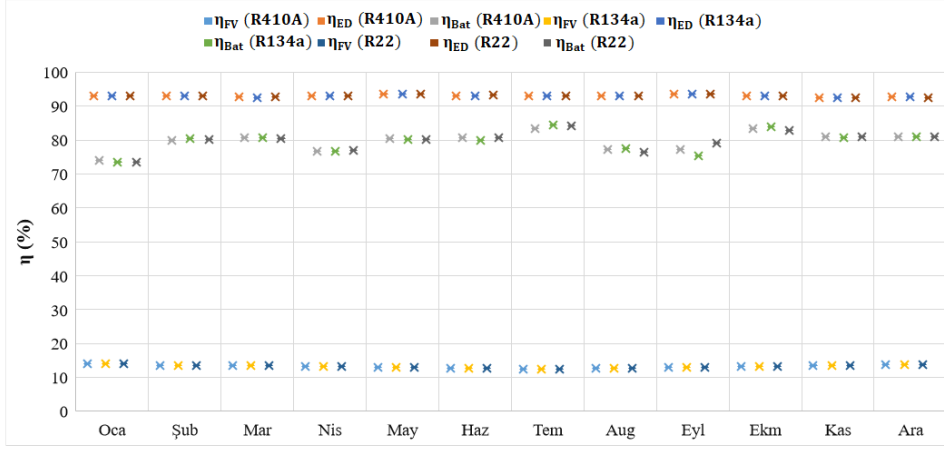


Şekil 11.5. Bileşen temelli enerji analiz sonuçları.

Şekil 11.5 ile görüleceği üzere, en yüksek enerji verimine sahip olan bileşen evirici/düzenleyicidir. Bu bileşene ait enerji verimi, sistem bileşenleri arasındaki güç etkileşimine bağlı olarak doğru akımdan alternatif akıma dönüşüm verimi değeri olan 0,92 ile doğru akımdan doğru akıma düzenleme verim değeri olan 0,94 arasında değişmektedir. Evirici/düzenleyici sonrasında en yüksek enerji verimi batarya grubu için % 74,0 ile % 83,5 aralığında elde edilmiştir. Bataryanın enerji

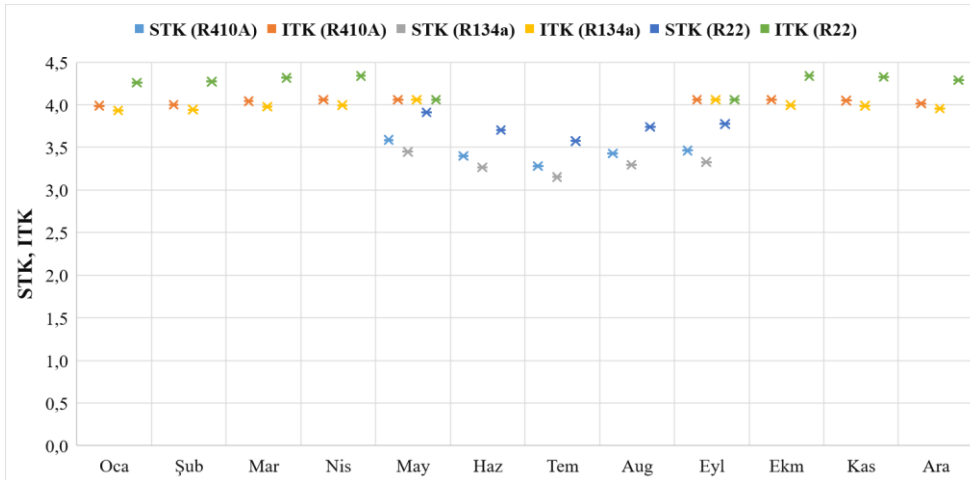
depolama miktarının yüksek olduğu aylarda daha düşük enerji verimi değerleri bulunmuştur. Enerji verimi en düşük bileşen ise solar FV panel grubudur ve ilgili değerler sıcaklığın olumsuz etkisi ile yaz aylarında daha düşük görülmüş olup % 12,5 ile % 14,0 arasında değişmektedir. Son olarak tesir katsayısı ısıtma modunda (4,0-4,1) soğutma moduna (3,3-3,6) göre daha yüksek mertebelerde elde edilmiştir. Bir başka ifade ile aynı güç tüketimi altında klimanın ortam havasına ısıtma modunda daha fazla ısı yükü aktardığı belirlenmiştir.

TRNSYS enerji modelini temel alan nümerik çalışmalar sırasında farklı soğutucu akışkan kullanımı Pack Calculation Pro paket programı ile modellenmiş ve klima enerji tüketiminde meydana gelen değişim TRNSYS enerji modeline aktarılmıştır. Bu sırada klima modelinin ısıtma ve soğutma modunda tükettiği güç miktarları TRNSYS klima modeline (tip 922c) ait proformada tekrardan düzenlenmiştir. Pack Calculation Pro programından alınan sonuçlara göre, Bölüm 6.3 ile belirtilen ısı pompası ve soğutma sistemine ait tanımlanan parametrelerin özdeş olması durumunda R134a soğutucu akışkan kullanımı ısıtma modunda % 2 daha az, soğutma modunda ise %4 daha fazla olmak üzere toplamda % 2,2 oranında yıllık enerji tüketimi artışına sebep olmuştur. Aynı koşullar altında R22 soğutucu akışkan kullanımı ise ısıtma ve soğutma modlarında sırasıyla % 6,6 ve % 8,2 daha az olmak üzere yıllık % 7,5 oranında daha az enerji tüketimi ortaya çıkmıştır. Enerji tüketiminde meydana gelen bu değişimlerin bileşen temelli gerçekleştirilen enerji analiz sonuçlarına etkisi solar FV paneller, evirici/düzenleyici ve bataryalar için Şekil 11.6 ile verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, farklı soğutucu akışkan kullanımı solar FV panellerin, evirici/düzenleyicinin ve batarya grubunun enerji verimleri üzerinde kayda değer bir değişime neden olmamıştır. Solar FV panellere ait yıllık enerji verimi her durumda sabit olmak üzere ortalama % 13,33 olarak belirlenmiştir. Evirici/düzenleyiciye ait yıllık enerji verimine ait ortalama değer ise R410A ve R134a kullanımı durumunda % 92,99, R22 kullanımı durumunda ise % 92,96 bulunmuştur. Son olarak batarya grubuna ait yıllık ortalama enerji verimi R410A, R134a ve R22 kullanımı için sırasıyla % 79,61, % 79,51 ve % 79,62 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 11.6. Farklı soğutucu akışkan kullanımının solar FV panel grubu, evirici/düzenleyici ve batarya grubu enerji verimine etkisi.

Farklı soğutucu akışkan kullanımının klima enerji performansına etkisi ise Şekil 11.7 de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, R22 soğutucu akışkanı kullanımı durumunda klimaya ait ısıtma ve soğutma tesir katsayıları en yüksek değerleri almıştır. Yıllık ortalama değerler her iki performans katsayısı için ısıtma ve soğutma modlarında sırasıyla 4,25 ve 3,74 olarak belirlenmiştir. Pack Calculation Pro paket programı ile R22 kullanımı durumunda daha az enerji tüketiminin hesaplanmış olması bu sonuçları doğrulamaktadır. Öte yandan, en düşük ısıtma ve soğutma tesir katsayıları R134a soğutucu akışkanı için sırasıyla yıllık ortalama değerler cinsinden 3,99 ve 3,30 şeklinde hesaplanmıştır. Bu sonuçların ardından farklı soğutucu akışkan kullanımının klima bileşenine ait enerji performansı üzerinde oldukça etkili bir parametre olduğu ortaya konulmuştur.



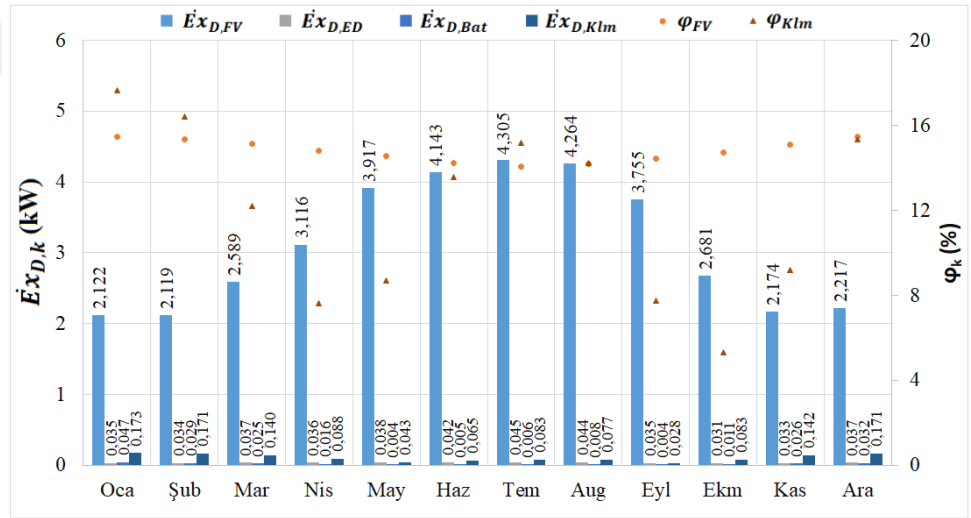
Şekil 11.7. Farklı soğutucu akışkan kullanımının klima enerji performansına etkisi.

11.2 Yıllık Ekserji Analizleri

GEDKS bileşenlerinin yıllık ekserji performansı geleneksel ve ileri ekserji analizlerinin uygulanmasıyla belirlenmiştir. Aşağıda her iki analiz yönteminin tek tek ve birlikte değerlendirilmesi kapsamında elde edilen bulgular sırasıyla tartışılmıştır.

11.2.1 Geleneksel ekserji analizleri

GEDKS bileşenleri içerisinde yer alan solar FV panel grubu, evirici/düzenleyici, batarya grubu ve klimaya ait ekserji verimleri ile ekserji yıkım akımları nümerik çalışmalarla dinamik olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda TRNSYS paket programı ile kurulan enerji modeli (Bkz. Şekil 7.2) bir yıl boyunca çalıştırılmıştır. Bu sırada TRNSYS eşitlik modeli kullanılarak bileşenlere ait ekserji eşitlikleri oluşturulmuştur (eşitlik (27)-(29) ve Çizelge 7.1) ve TRNSYS bileşen modelleri ile bütünleşik kullanılarak ekserji verimleri ile ekserji yıkım akımları her bir bileşen için hesaplanmıştır. Aşağıda Şekil 11.8 ile GEDKS bileşenlerine ait geleneksel ekserji performans sonuçları sunulmuştur.

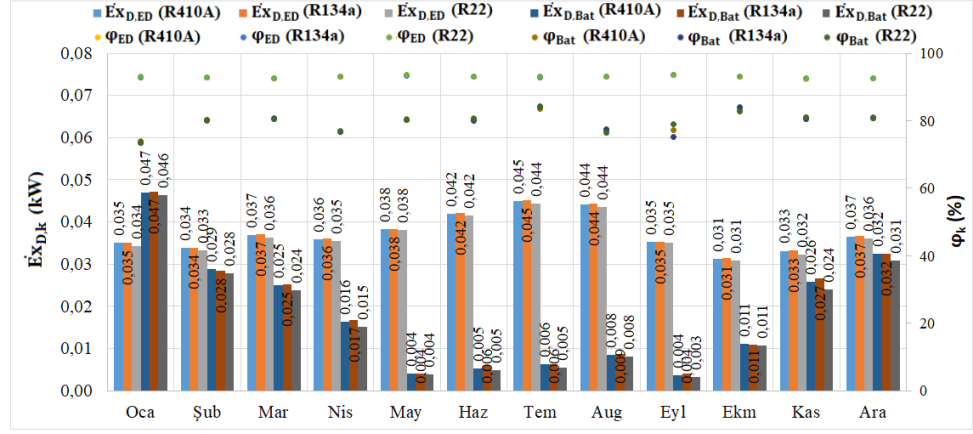


Şekil 11.8. Bileşen temelli ekserji analiz sonuçları.

Şekil 11.8 ile görüldüğü gibi solar FV panellerde meydana gelen ortalama ekserji yıkım akımına ait değerler tüm aylarda diğer sistem bileşenlerinden çok daha fazla miktarlarda meydana gelmiştir. Yüksek solar radyasyon potansiyeline bağlı olarak yaz aylarında (maksimum 4,264 kW ile ağustos ayı) kış aylarına (minimum 2,119 kW ile şubat ayı) göre daha büyük ekserji yıkım akımları ortaya

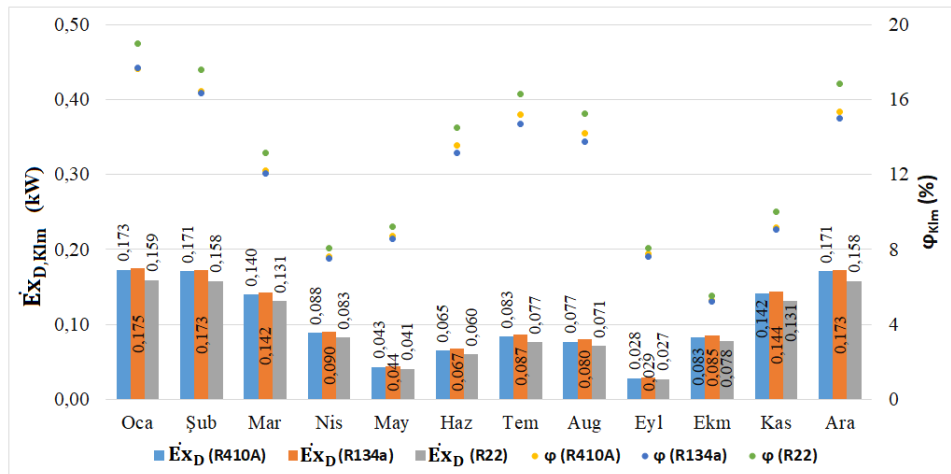
çıkmiştir. Solar FV panellerden sonra en yüksek ekserji yıkım akımları klima bileşenine ait bulunmuştur. Sadece eylül ayında çevirici/düzenleyici bileşeninde klimaya göre daha yüksek ekserji yıkım akımı ortaya çıkmıştır. Bu ay geçiş ayı olduğundan ötürü klima ya çalışmamıştır ya da düşük kademede çalışmıştır. Diğer taraftan en düşük ekserji yıkım akımı ocak ayı dışındaki tüm aylarda bataryaya ait bulunmuştur. Ocak ayında bataryalarda enerjinin depolanmasına bağlı olarak batarya enerji deşarjının az olması nedeniyle bu ay için ekserji yıkım akımı evirici/düzenleyici bileşenine göre daha yüksek hesaplanmıştır. Elektriğin kalite faktörünün “1” olmasından ötürü evirici/düzenleyici ve batarya grubu için enerji ve ekserji verimleri birbirine eşit bulunmuştur. Bu sebeple, Şekil 11.5 ile verilen enerji verim değeri aynı zamanda evirici/düzenleyici ve batarya grubuna ait ekserji verimini göstermektedir ve tekrardan Şekil 11.8 ile verilen grafikte yer almamıştır. Solar FV panel grubuna ait ekserji verimi yıl boyunca neredeyse doğrusal olarak % 14,1 ile % 15,5 arasında değişiklik göstermiştir. Sıcaklığın negatif etkisi sebebiyle yaz aylarında kış aylarına göre daha düşük ekserji verim değerleri ortaya çıkmıştır. Klimaya ait ekserji verimi yıl boyunca farklı kademelerde çalışma koşullarındaki tesir katsayılarına ve ısı transferinin kalite faktörüne bağlı olarak oldukça değişken bulunmuştur. Genel olarak geçiş aylarında daha düşük ekserji verim değerleri batarya grubu için elde edilmiştir.

Farklı soğutucu akışkan kullanımı sonucunda sistem bileşenlerinin ekserji performanslarında meydana gelen değişimler ise Şekil 11.9 ile verilmiştir. Solar FV panel grubu her koşulda aynı yakıt ve ürün ekserji akımlarına sahip olacağından ötürü dikkate alınmamıştır. Şekilden görüleceği üzere, R134a kullanımı durumunda yıl boyunca genel olarak hem evirici/düzenleyici hem de batarya bileşenleri için daha yüksek ekserji yıkım akımları ve dolayısıyla daha düşük ekserji verimi değerleri meydana gelmiştir. Evirici/düzenleyiciye ait yıllık ortalama ekserji yıkım akımı R134a, R410A ve R22 kullanımı durumunda sırasıyla 0,0374 kW, 0,0373 kW ve 0,0368 kW şeklindedir. Ekserji verimleri ise aynı sırayla % 92,987, % 92,989 ve % 93,015 olarak hesaplanmıştır. Batarya grubuna ait yıllık ortalama ekserji yıkım akımı ise R134a, R410A ve R22 kullanımı durumunda sırasıyla 0,0180 kW, 0,0179 kW ve 0,0170 kW şeklindedir. Ekserji verimleri ise aynı sırayla % 79,51, % 79,61 ve % 79,67 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 11.9. Farklı soğutucu akışkan kullanımının evirici/düzenleyici ve batarya grubu ekserji performansı üzerine etkisi.

Farklı soğutucu akışkan kullanımının klima ekserji performansına etkisi ise Şekil 11.10 ile gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, R22 soğutucu akışkanı kullanımı durumunda yıl boyunca en düşük ekserji yıkım akımları ve dolayısıyla en yüksek ekserji verimi değerleri ortaya çıkmıştır. Öte yandan, R134a soğutucu akışkanı kullanımı durumunda ise yıl boyunca en yüksek ekserji yıkım akımları ve dolayısıyla en düşük ekserji verimi değerleri meydana gelmiştir. Yıllık ortalama ekserji yıkım akımları R134a, R410A ve R22 soğutucu akışkanları için sırasıyla 0,107 kW, 0,105 kW ve 0,98 kW; yıllık ortalama ekserji verimleri ise yine aynı sırayla % 11,73, % 11,93 ve % 12,79 olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, farklı soğutucu akışkan kullanımı durumunda klima ekserji performansı, ısıtma ve soğutma yüklerine ait kalite faktörünün devreye girmesinden ötürü enerji performansına nazaran daha az etkili olmuştur (Bkz. Şekil 11.7).

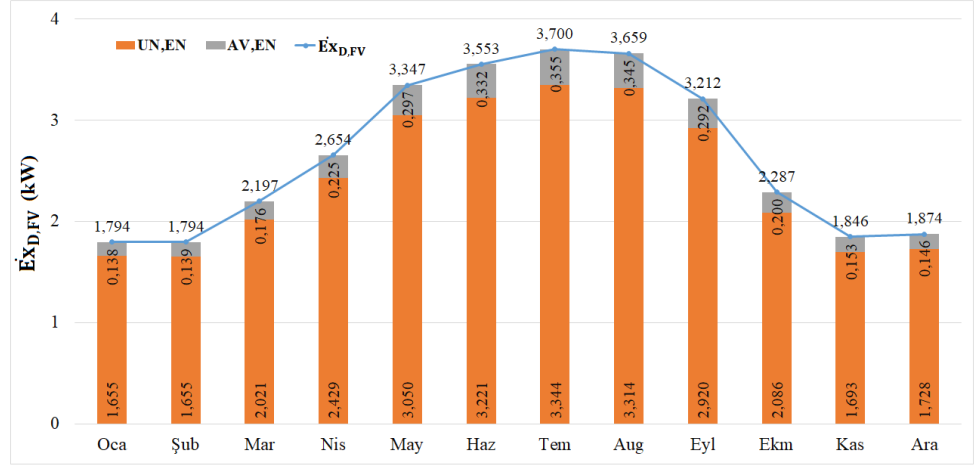


Şekil 11.10. Farklı soğutucu akışkan kullanımının klima ekserji performansına etkisi.

11.2.2 İleri ekserji analizleri

GEDKS bileşenleri içerisinde yer alan solar FV panel grubu, evirici/düzenleyici, batarya grubu ve klimaya ait bir önceki bölümde verilen ekserji yıkım akımlarının belirlenmesinin ardından bu yıkım akımlarına ait daha detaylı inceleme ileri ekserji analizleri ile yapılmıştır. Bu kapsamda, önlenemez/içsel ($\dot{E}x_{D,k}^{UN,EN}$), önlenemez/dışsal ($\dot{E}x_{D,k}^{UN,EX}$), önlenebilir/dışsal ($\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}$) ve önlenebilir/içsel ($\dot{E}x_{D,k}^{AV,EN}$) ekserji yıkım akımları hesaplanmıştır. Bu esnada, Şekil 7.3 ile görüleceği üzere her bir bileşene ait Bölüm 7.2.2 de verilen önlenemez ve ideal koşullar nümerik çalışmalar aracılığıyla tanımlanmıştır ve geliştirilen model bu koşullar altında tekrar çalıştırılmıştır. Benzetim çalışmalarına ait sonuçlar ise eşitlik (30)-(36) aracılığıyla yorumlanmıştır.

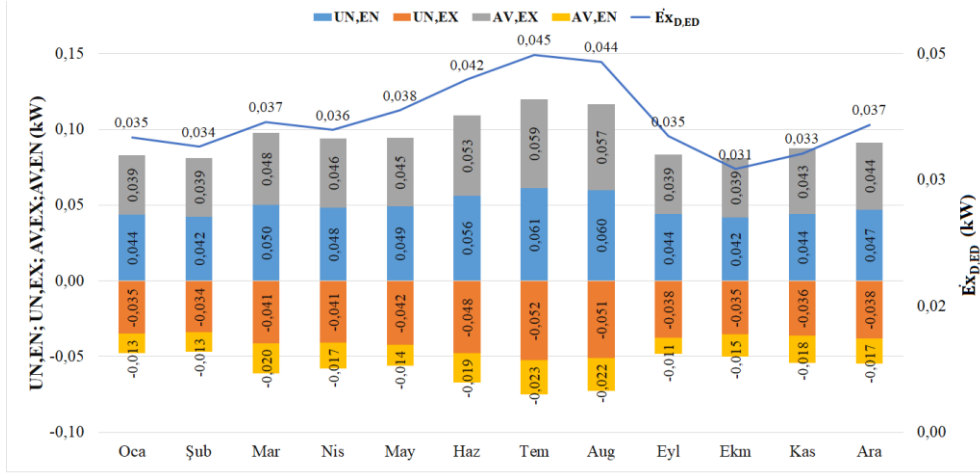
Solar FV panel grubu için elde edilen ileri ekserji analiz sonuçları Şekil 11.11 de yer almaktadır. Şekilden görüleceği üzere, solar FV panel grubunda meydana gelen ekserji yıkımına ait dışsal bileşen bulunmamaktadır ($\dot{E}x_{D,FV}^{AV,EX} = \dot{E}x_{D,FV}^{UN,EX} = 0$). Çünkü, solar FV panel grubu dışındaki tüm sistem bileşenlerinin kurulumu bu bileşen sonrasında gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple, ilgili bileşenlerin solar FV panel grubunun ekserji performansı üzerinde herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Ayrıca, tamamı içsel olan ekserji yıkım akımının çok büyük bir kısmının önlenemez ($\dot{E}x_{D,FV}^{UN,EN}$) olduğu ve yıl boyunca ortalama 1,655 kW (ocak, şubat) ile 3,344 kW (temmuz) arasında değiştiği bulunmuştur. Bu ekserji yıkım akımı bileşenine ait yıllık ortalama değer ise 2,426 kW olarak hesaplanmıştır. Tam aksine, solar FV panel grubu şu anki teknolojik gelişme ile mümkün olan en iyi koşullarda çalışsa dahi çok cüzi bir iyileştirmenin yapılabileceği belirlenmiştir ($\dot{E}x_{D,FV}^{AV,EN}$). Bu iyileştirme yıl boyunca ortalama 0,138 kW (ocak) ile 0,355 kW (temmuz) arasında değişmektedir ve tüm yıla ait hesaplanan ortama değer 0,233 kW'dır. Dikkat edileceği üzere, gerek önlenemez/içsel ($\dot{E}x_{D,FV}^{UN,EN}$) gerekse önlenebilir/içsel ($\dot{E}x_{D,FV}^{AV,EN}$) ekserji yıkım akımları yaz aylarında yüksek güneş enerjisi potansiyeline bağlı olarak daha büyük değerler almıştır.



Şekil 11.11. Solar FV panel grubuna ait ileri ekserji analizi sonuçları.

Solar FV panel grubunun ardından evirici/düzenleyici için ileri ekserji analizleri açısından bir değerlendirme yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar Şekil 11.12 ile verilmiştir. Şekilden açıkça görüleceği üzere, önlenabilir/içsel ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,ED}^{AV,EN}$) dışındaki tüm ekserji yıkım akımı bileşenleri geleneksel ekserji analizleri ile belirlenen ekserji yıkım akımından daha yüksek değerler almıştır. Çünkü, evirici/düzenleyiciye ait içsel koşullar (evirici/düzenleyicinin gerçek, diğer tüm bileşenlerin ise ideal koşullarda çalışması) uygulandığında, bu bileşene ait ürün ekserji akımı ($\dot{E}x_{P,ED}^{EN}$) geleneksel ekserji analizi ile belirlenen ürün ekserji akımından ($\dot{E}x_{P,ED}$) çok daha yüksek mertebelerde hesaplanmıştır. Ayrıca, evirici/düzenleyiciye ait önlenemez/içsel ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,ED}^{UN,EN}$) ve önlenabilir/dışsal ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,ED}^{AV,EX}$) sırasıyla 0,042 kW ile 0,061 kW ve 0,039 kW ile 0,059 kW arasında değişiklik göstermiş olup tüm yıl boyunca pozitif değerler almıştır. Tam aksine, önlenemez/dışsal ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,ED}^{UN,EX}$) ve önlenabilir/içsel ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,ED}^{AV,EN}$) ise sırasıyla -0,052 kW ile -0,034 kW ve -0,023kW ile -0,011 kW arasında değişiklik göstermiş olup tüm yıl boyunca negatif değerler almıştır. Bu sonuçların ardından evirici/düzenleyici dışındaki sistem bileşenlerine ait ekserji yıkım akımının düşürülmesi (evirici/düzenleyicinin gerçek koşullarda çalışması) ile $\dot{E}x_{D,ED}^{AV,EX}$ ekserji yıkım akımında düşüş, $\dot{E}x_{D,ED}^{UN,EX}$ ekserji yıkım akımında ise artış elde edilmiştir. Aynı bakış açısıyla, evirici/düzenleyiciye ait ekserji yıkım akımının düşürülmesi (diğer bileşenlerin ideal koşullarda çalışması) ile $\dot{E}x_{D,ED}^{UN,EN}$ ekserji

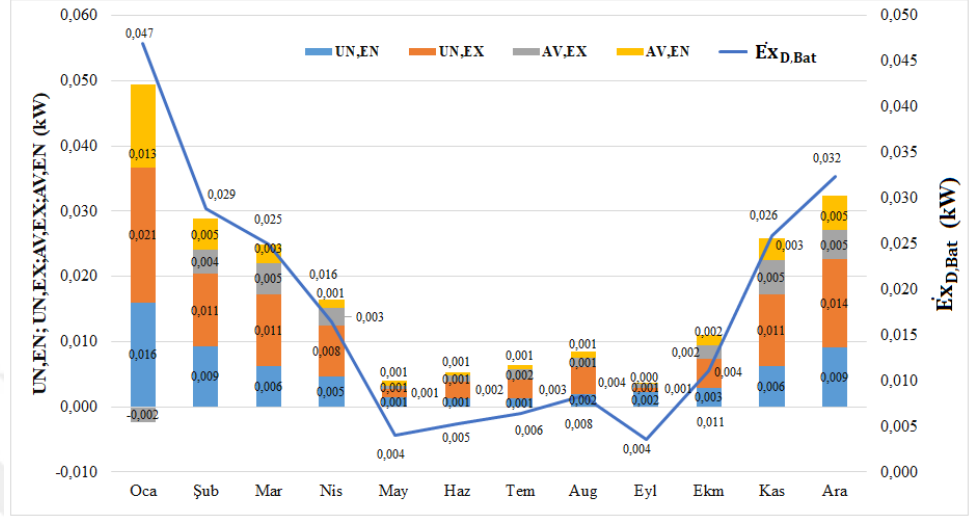
yıkım akımında düşüş, $\dot{E}x_{D,ED}^{UN,EX}$ ekserji yıkım akımında ise artış meydana gelmiştir. Son olarak, yaz aylarında daha yüksek $\dot{E}x_{P,ED}^{EN}$ değerlerinin elde edilmesine bağlı olarak ekserji yıkım akım bileşenlerine ait değerler daha yüksek mertebelerde ortaya çıkmıştır.



Şekil 11.12. Evirici/düzenleyiciye ait ileri ekserji analizi sonuçları.

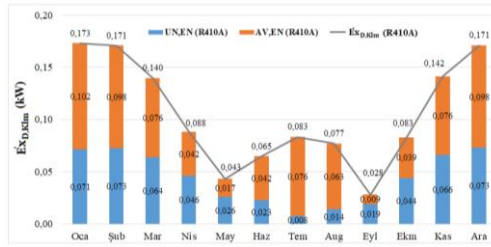
İleri ekserji analizlerinin batarya grubuna uygulanması ile elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 11.13 de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, tüm yıl boyunca negatif değer sadece ocak ayında önlenebilir/dışsal ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,Bat}^{AV,EX}$) için belirlenmiştir. Bu durumda, batarya grubu dışındaki tüm sistem bileşenlerinin ekserji yıkım akımlarının düşürülmesi (batarya grubunun gerçek koşullarda çalışması) ile sadece ocak ayı için $\dot{E}x_{D,Bat}^{AV,EX}$ değerinin arttırılabileceği görülmüştür. Bunun temel sebebi, batarya grubuna ait yakıt ekserji akımının, ürün ekserji akımı yerine düşük batarya doluluk oranı dolayısıyla enerji depolamada kullanılmasıdır. Öte yandan, diğer ekserji yıkım akımı bileşenleri tüm yıl boyunca pozitif değerler almıştır. Bu sebeple diğer sistem bileşenlerinin ekserji yıkım akımının düşürülmesi (batarya grubunun gerçek koşullarda çalışması) veya batarya grubuna ait ekserji yıkım akımının düşürülmesi (diğer bileşenlerin ideal koşullarda çalışması) ile ekserji yıkım akımı düşecektir. Kış aylarında batarya grubunun daha aktif kullanılmasına bağlı olarak tüm ekserji yıkım akımı bileşenleri daha yüksek değerler almıştır. Batarya grubuna ait ekserji yıkım akımı üzerinde en etkili olan bileşen önlenemez/dışsal ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,Bat}^{UN,EX}$) olarak belirlenmiştir ve aylık ortalama değeri 0,001 kW (mayıs) ile 0,021 kW (ocak) arasında değişiklik

göstermiştir. Öte yandan, batarya grubunda meydana gelen ekserji yıkımı üzerinde en az etkisi olan bileşenin ise önlenebilir/dışsal ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,Bat}^{AV,EX}$) olduğu bulunmuştur. Bu bileşen yıl boyunca -0,002 kW (ocak) ile 0,005 kW (mart) arasında değişen ortalama değerlere sahip olmuştur.

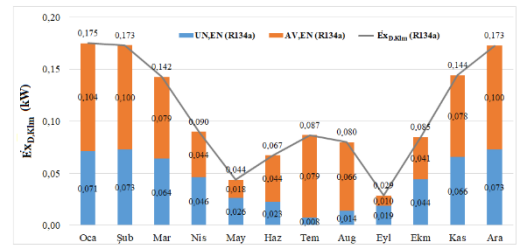


Şekil 11.13. Batarya grubuna ait ileri ekserji analizi sonuçları.

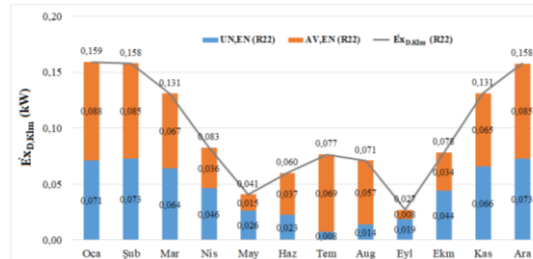
TRNSYS ve Pack Calculation Pro programlarının bütünleşik kullanılmasıyla klimaya ait ileri ekserji analizleri farklı soğutucu akışkan durumu dikkate alınarak incelenmiştir. Şekil 11.14 ile aylık sonuçlar R410A, R134a ve R22 soğutucu akışkanları için sırasıyla verilmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 11.14. Soğutucu akışkan a) R410A, b) R134a, c) R22 kullanımının klima ileri ekserji performansına etkisi.

Yukarıdaki şekilden görüleceği üzere, klima bileşeninde meydana gelen ekserji yıkım akımına ait dışsal bileşen solar FV panel grubunda olduğu gibi bulunmamaktadır ($\dot{E}x_{D,Klm}^{AV,EX} = \dot{E}x_{D,Klm}^{UN,EX} = 0$). Çünkü, klima bileşenine ait yakıt ve ürün ekserji akımları diğer bileşenlerin ekserji yıkım akımları azaltılsa dahi sabit kalacaktır. Aslında sistem bileşenlerinin klimaya ait yakıt ekserji akımını karşılama payları değişiklik gösterecektir fakat bu durumun klima ekserji performansı üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Bu sebeple, Şekil 11.14 ile klimanın mümkün olan en iyi koşulda çalışması durumunda (diğer tüm bileşenlerin gerçek koşullarda çalışması) ekserji yıkım akımının nasıl etkilendiği verilmiştir. Bu koşul sağlandığında dahi önlenemeyen miktar ($\dot{E}x_{D,Klm}^{UN,EN}$) tüm soğutucu akışkan kullanımı için aynıdır. Çünkü, klima için tanımlanan önlenemez koşul farklı soğutucu akışkan kullanılması durumunda değişmemektedir. Fakat, geleneksel ekserji analizleri ile belirlenen ekserji yıkım akımının soğutucu akışkan kullanımına bağlı olarak farklılık göstermesinden ötürü önlenebilir ekserji akımı ($\dot{E}x_{D,Klm}^{AV,EN}$) farklı değerler almıştır. Yıllık ortalama değerler göz önünde bulundurulduğunda R134a, R410A ve R22 soğutucu akışkanları için sırasıyla 0,063 kW, 0,061 kW ve 0,054 kW değerleri bulunmuştur. Aynı termal yükleri karşılamada ısıtma modunda daha fazla elektrik tüketimi gerçekleşmesine bağlı olarak kış aylarında daha yüksek ekserji yıkım akım bileşenleri (önlenebilir ve önlenemez içsel) meydana gelmiştir.

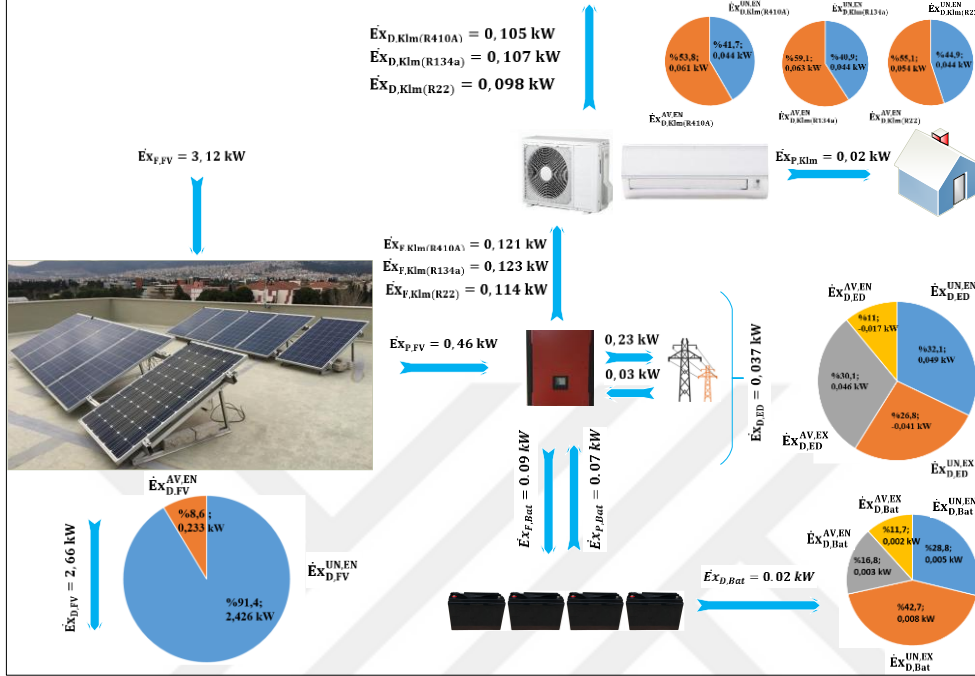
11.2.3 Geleneksel ve ileri ekserji analizlerinin birlikte değerlendirilmesi

Geleneksel ve ileri ekserji analizleri bir arada değerlendirildiğinde ileri ekserji analizleri ile daha anlamlı ve daha detaylı bir inceleme fırsatının sunulduğu görülmüştür. Geleneksel ekserji analizleri ile sistem bileşenlerine ait ekserji yıkım akımları hesaplanabilmektedir. Fakat bu ekserji yıkım akımlarının kaynağı (bileşenin kendisinden mi yoksa diğer bileşenlerden mi, önlenebilir mi yoksa önlenemez mi) konusunda geleneksel ekserji analizleri yetersiz kalmaktadır ve bu noktada devreye ileri ekserji analizleri girmektedir. Her bir ekserji analiz yöntemini kullanarak sistem bileşenleri için gerçekleştirilen yıllık ekserji performans sonuçları sistemin sürekli çalıştığı durum için ortalama değerler kullanılarak Şekil 11.15 ile verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, ekserji yıkım akımı en yüksek değerini solar FV panel grubunda almaktadır (2,66 kW) ve bu bileşeni sırasıyla

klima (soğutucu akışkan tipine göre 0,098 kW-0,107 kW), evirici/düzenleyici (0,037 kW) ve batarya grubu (0,02 kW) takip etmektedir. Bu durumda, geleneksel ekserji analizlerinin uygulanması sonucunda önceliğin solar FV panel grubuna, ardından klimaya, daha sonrasında evirici/düzenleyiciye ve son olarak batarya grubuna verilmesi gerektiği belirlenmiştir. Fakat, Şekil 11.15 ile gösterildiği gibi ileri ekserji analizleri sonuçları temel alındığında ise önceliğin ilk olarak klimaya verilmesi gerektiği görülmüştür. Çünkü, farklı soğutucu akışkan kullanımına bağlı olarak klimada % 53,8 ile % 59,1 oranında değişiklik gösteren içsel önlenebilir ekserji yıkım akımı mevcuttur. Klima sonrasında ise ileri ekserji analiz sonuçları önceliğin evirici/düzenleyiciye verilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Bu bileşen için toplam % 41,1 oranında önlenebilir ekserji yıkım akımı mevcuttur. Bu bileşende ortaya çıkan ekserji yıkım akımına ait negatif değer, ekserji yıkım akım bileşeninin ekserji yıkım akımı ile ters orantılı olduğunu göstermektedir. İleri ekserji analizi sonucunda üçüncü öncelik ise toplam % 28,5 oranında önlenebilir ekserji yıkım akımı potansiyeli olan batarya grubu için ortaya çıkmıştır. Son olarak en düşük önlenebilir ekserji yıkım akımının olduğu bileşen solar FV panel grubu olarak belirlenmiştir. Bu bileşene ait önlenebilir pay sadece % 8,9 dur. Bu değer Shaygan et al. (2019) tarafından her biri 188 W kapasiteye sahip olan 64 adet panelin yer aldığı solar FV panel grubu için % 4,8 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 11.15 ile verilen yakıt ve ürün ekserji akımları kullanılarak solar FV grubuna, evirici/düzenleyiciye, batarya grubuna ve klimaya ait ekserji verimleri sırasıyla % 14,7, % 92,9, % 79,6 ve farklı soğutucu kullanımı için % 11,7 ile % 12,8 arasında belirlenmiştir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde ise solar FV panel grubuna ait ekserji veriminin farklı solar radyasyon potansiyeline bağlı olarak % 13,6 ile % 16,0 arasında değişiklik gösterdiği raporlanmıştır (Gürtürk et al., 2018). Stanek et al. (2019) tarafından ise ortalama elektrik üretimi 0,5 kW olan 15 adet solar FV panel grubu için ekserji verimi % 12,9 hesaplanmıştır. Diğer taraftan, Sundaram ve Babu (2015) Tamilnadu, Hindistanda yer alan 5MWp kapasiteli solar FV enerji santralinde kullanılan eviricinin ekserji verimini % 88,2 olarak kaydetmiştir. Ogbonnaya et al. (2019a) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise solar FV sistemlerde kullanılan evirici ve batarya bileşenine ait verim değerleri % 85 gösterilmiştir. Wang et al. (2015b) ise solar FV destekli hava kaynaklı ısı pompasında yer alan evirici ve batarya grubuna ait ekserji verimini sırasıyla % 90

ve % 80 hesaplamıştır. Son olarak Li et al. (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada toprak ve hava kaynaklı ısı pompasına ait ekserji veriminin % 9 ile % 20 arasında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Literatürden elde edilen tüm bu sonuçlar tez çalışması ile belirlenen değerlerle oldukça uyumlu bulunmuştur.



11.3 Ekonomik Analizler

GEDKS'nin ekonomik analizlerle değerlendirilmesi kapsamında tüm sistemin makro boyutta ele alındığı yaşam boyu maliyet analizi ile sistem bileşenlerini temel alan eksergo-ekonomik (geleneksel ve ileri) analizler kullanılmıştır. Aşağıda her iki analiz yöntemine ait detaylı bilgiler yer almaktadır.

11.3.1 Yaşam boyu maliyet analizi

Bölüm 8.1 ile verilen kabuller ve ekonomik koşullar altında net bugünkü değer (NPV), GEDKS'in İzmirde kurulumu ve R410A soğutucu akışkanının kullanılması durumunda -5.766,1€ olarak hesaplanmıştır. R134a ve R22 soğutucu akışkanının kullanılması durumunda ise NPV sırasıyla -5.759,2€ ve -5.792,9€ değerlerini almıştır. Görüldüğü gibi klimaya ait enerji tüketiminin artması (R134a kullanımı) NPV değerini arttırmaktadır çünkü şebekeden alınan elektriğin maliyeti, şebekeye satılan elektriğin maliyetinden daha yüksektir. Hesaplanan NPV negatif değer aldığından ötürü indirgenmiş geri dönüş süresi (DPBP) 25 yıldan daha uzun bulunmuştur. Sonuç olarak, 2,5 kWp kapasiteli solar FV paneller, 3 kW kapasiteli

evirici/düzenleyici, 2,52 kW soğutma ile 2,84 kW ısıtma kapasitesine sahip klima ve 9,6 kWh kapasiteli bataryaların kullanıldığı GEDKS'nin günümüz ekonomik koşulları ile İzmir'e ait iklim özellikleri atında ekonomik olarak elverişli olmadığı belirlenmiştir. Bu durumda, faiz oranı ile enflasyon oranının azaltılması, ilk yatırım esnasında sübvansiyonun arttırılması, solar FV teknolojisi ile üretilen elektriğin daha yüksek fiyatlarla satın alınması gibi ekonomik yaptırımların gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, avro kurunun yükselmesi dolayısıyla sistem bileşenlerinin millileştirilmesi ya da Türk lirasının değer kaybının azaltılması da diğer önlemler arasında sayılabilir. Örneğin, R410A akışkanı kullanımı koşulunda faiz oranı ile enflasyon oranı % 1, sübvansiyon desteği % 25 ve solar FV panel grubu tarafından üretilen elektriğin satın alma maliyeti su anki değer iki katı olduğunda net bugünkü değer 655,24€, indirgenmiş geri ödeme süresi ise 24 yıl olarak hesaplanmıştır.

11.3.2 Eksergo-ekonomik analizler

Eksergo-ekonomik analizler kapsamında sırasıyla ekserji, maliyet, enerji ve kütle (EXCEM) ile birim ekserji maliyetleme (SPECO) yöntemleri kullanılmıştır. Eşitlik (42), (43), (56) ve (57) ile verildiği gibi öncelikli olarak ortak ifade olan toplam saatlik indirgenmiş maliyet akımı ($\dot{Z}_k^T$) her bir bileşen için hesaplanmıştır. Solar FV panel grubu, evirici/düzenleyici, batarya grubu ve klima için $\dot{Z}_k^T$ sırasıyla 0,019 €/h, 0,011 €/h, 0,028 €/h ve 0,015 €/h bulunmuştur. Ardından EXCEM analiz yöntemi ile elde edilen $\dot{Z}_k^T$ değerleri ile enerji, ekserji ve ileri ekserji analiz sonuçları birleştirilip Çizelge 11.4 ile verildiği gibi termo-ekonomik ve geleneksel/ileri eksergo-ekonomik parametreler elde edilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere klima bileşeni için termo-ekonomik parametre ($\dot{R}_{en,k}$) hesaplanmamıştır. Çünkü bu bileşen için enerji verimi yerine soğutma (STK_{Klm}) ve ısıtma (ITK_{Klm}) tesir katsayıları kullanılmaktadır ve dolayısıyla enerji kaybı ($\dot{E}_{l,k}$) bu bileşen için söz konusu değildir. Ayrıca termo-ekonomik parametre ve geleneksel eksergo-ekonomik parametre ($\dot{R}_{ex,k}$) değerleri evirici/düzenleyici ile batarya grubu bileşenleri için özdeş değerler almıştır. Bunun nedeni ise elektriğe ait kalite faktörünün “1” olmasına bağlı olarak enerji ve ekserji verimleri ile enerji kaybı ($\dot{E}_{l,k}$) ve ekserji kaybının ($\dot{E}_{x,l,k}$) eşit olmasına dayanmaktadır. Bunun

yanısıra, ileri eksergo-ekonomik parametreler göz önünde bulundurulduğunda solar FV panel grubu ve klima bileşeni için sadece içsel ifadelerin yer aldığı görülmüştür ($\dot{R}_{ex,k}^{UN,EN}$, $\dot{R}_{ex,k}^{AV,EN}$). Çünkü, bu iki bileşen için ekserji yıkım akımlarına ait dışsal bileşen bulunmamaktadır.

Çizelge 11.4 ile görüleceği üzere en yüksek termo-ekonomik ve geleneksel eksergo-ekonomik parametreler solar FV panel grubunda meydana gelmiştir. Bu sebeple, indirgenmiş saatlik maliyet akımına karşılık en yüksek enerji ve ekserji kayıp akımlarının bu bileşene ait olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, solar FV panel grubuna ait enerji kayıp akımlarının ekserji kayıp akımlarına göre tüm aylarda daha yüksek oranda gerçekleştiği ve dolayısıyla yıl boyunca termo-ekonomik parametrenin geleneksel eksergo-ekonomik parametreden daha büyük olduğu bulunmuştur. Termo-ekonomik ve geleneksel eksergo-ekonomik parametrelere ait yıllık ortalama değerler solar FV panel grubu için sırasıyla 312,2 kWh/€ ve 138,7 kWh/€ hesaplanmıştır. Ayrıca, solar FV panel grubu için yüksek enerji girişi ve yüksek yakıt ekserji akımı sonucu ortaya çıkan daha düşük enerji ve ekserji verimleri dolayısıyla yaz aylarında daha yüksek termo-ekonomik ve geleneksel eksergo-ekonomik parametre değerleri ortaya çıkmıştır. Yıllık ortalama değeri 138,7 kWh/€ olan geleneksel eksergo-ekonomik parametre büyük oranda önlenemez/içsel ileri eksergo-ekonomik parametreden meydana gelmiştir (126,5 kWh/€). Solar FV panel grubu sonrasında ise en yüksek geleneksel eksergo-ekonomik parametre değerleri klima bileşenine ait bulunmuştur. Isıtma modunda meydana gelen ekserji kayıp akımının soğutma moduna göre daha yüksek olmasına bağlı olarak kış aylarında daha yüksek olmak üzere yıllık ortalama geleneksel eksergo-ekonomik parametre değeri 6,9 kWh/€ bulunmuştur. Bu değer büyük çoğunluğunun önlenemez/içsel ileri eksergo-ekonomik parametreye ait olduğu belirlenmiştir (4,1 kWh/€). Diğer taraftan, gerek termo-ekonomik gerekse eksergo-ekonomik parametrelere ait en düşük değerler batarya grubu için belirlenmiştir. Bir başka ifade ile indirgenmiş maliyet akımına karşılık en düşük enerji ve ekserji kayıp akımları bu bileşende ortaya çıkmıştır. Termo-ekonomik ve geleneksel eksergo-ekonomik parametrelere ait yıllık ortalama değer batarya grubu için 0,6 kWh/€ hesaplanmıştır. En yüksek ileri eksergo-ekonomik parametre değerlerinin ise önlenemez/dışsal bileşene ait olduğu görülmüştür (yıllık ortalama değer 0,3 kWh).

Çizelge 11.4. EXCEM analiz sonucunda solar FV panel grubu/evirici-düzenleyici/batarya grubu/klima için elde edilen eksergo-ekonomik parametrelere ait ortalama değerler (kWh/€).

Ay	$\dot{R}_{en,k}$	$\dot{R}_{ex,k}$	$\dot{R}_{ex,k}^{UN,EN}$	$\dot{R}_{ex,k}^{UN,EX}$	$\dot{R}_{ex,k}^{AV,EX}$	$\dot{R}_{ex,k}^{AV,EN}$
Oca	275,4/3,3/1,7/-	93,5/3,3/1,7/11,4	86,3/4,1/0,6/4,7	0,0/-3,3/0,7/0,0	0,0/3,7/-0,1/0,0	7,2/-1,3/0,5/6,7
Şub	238,9/3,2/1,0/-	93,5/3,2/1,0/11,3	86,3/4,0/0,3/4,8	0,0/-3,2/0,4/0,0	0,0/3,6/0,1/0,0	7,2/-1,2/0,2/6,5
Mar	270,8/3,5/0,9/-	114,5/3,5/0,9/9,2	105,4/4,7/0,2/4,2	0,0/-3,9/0,4/0,0	0,0/4,5/0,2/0,0	9,2/-1,9/0,1/5,0
Nis	290,4/3,4/0,6/-	138,4/3,4/0,6/5,8	126,6/4,6/0,2/3,0	0,0/-3,8/0,3/0,0	0,0/4,3/0,1/0,0	11,8/-1,6/0,0/2,8
May	339,3/3,6/0,1/-	174,5/3,6/0,1/2,8	159,0/4,6/0,1/1,7	0,0/-4,0/0,0/0,0	0,0/4,2/0,0/0,0	15,5/-1,3/0,0/1,1
Haz	352,0/3,9/0,2/-	185,3/3,9/0,2/4,3	168,0/5,3/0,0/1,5	0,0/-4,5/0,1/0,0	0,0/5,0/0,0/0,0	17,3/-1,8/0,0/2,8
Tem	370,3/4,2/0,2/-	192,9/4,2/0,2/5,5	174,4/5,8/0,0/0,5	0,0/-4,9/0,1/0,0	0,0/5,5/0,1/0,0	18,5/-2,2/0,0/5,8
Ağu	389,6/4,2/0,3/-	190,8/4,2/0,3/5,1	172,8/5,6/0,1/0,9	0,0/-4,8/0,1/0,0	0,0/5,4/0,0/0,0	18,0/-2,0/0,0/4,1
Eyl	374,7/3,3/0,1/-	167,5/3,3/0,1/1,9	152,3/4,1/0,1/1,2	0,0/-3,5/0,0/0,0	0,0/3,7/0,0/0,0	15,2/-1,0/0,0/0,6
Eki	299,5/2,9/0,4/-	119,2/2,9/0,4/5,5	108,8/3,9/0,1/2,9	0,0/-3,3/0,2/0,0	0,0/3,7/0,1/0,0	10,4/-1,4/0,1/2,6
Kas	263,4/3,1/0,9/-	96,2/3,1/0,9/9,3	88,3/4,2/0,2/4,3	0,0/-3,4/0,4/0,0	0,0/4,0/0,2/0,0	8,0/-1,7/0,1/5,0
Ara	282,7/3,4/1,1/-	97,7/3,4/1,1/11,3	90,1/4,4/0,3/4,8	0,0/-3,6/0,5/0,0	0,0/4,2/0,2/0,0	7,6/-1,6/0,2/6,5
Yıl	312,2/3,5/0,6/-	138,7/3,5/0,6/6,9	126,5/4,6/0,2/2,9	0,0/-3,9/0,3/0,0	0,0/4,3/0,1/0,0	12,2/-1,6/0,1/4,1

SPECO analiz yöntemi kapsamında EXCEM analiz yöntemi ile belirlenen $\dot{Z}_k^T$ değerleri, her bir k bileşenine ait hesaplanan birim yakıt maliyeti ($c_{F,k}$) ile kullanılarak eksergo-ekonomik faktör (f_k) ve bağıl maliyet farkı (r_k) performans göstergeleri hesaplanmıştır. Çizelge 11.5 ile görüleceği üzere solar FV panel grubu analizlere dâhil edilmemiştir. Çünkü solar FV panel grubuna ait birim yakıt maliyeti güneş enerjisi kaynağının bedava olmasından ötürü “0” dır (Akrami et al., 2018; Behzadi et al., 2018; Kiyania et al., 2019; Keshtkar and Khani, 2018). Bu durumda eksergo-ekonomik faktör ve bağıl maliyet farkı sırasıyla “1” ve “tanımsız” bulunmuştur (Bkz. Eşitlik (56) ve (57)). İlavaten batarya grubu sadece solar FV panel grubu tarafından şarj edilmektedir. Dolayısıyla solar FV panel grubu için oluşturulan maliyet eşitliği ile belirlenen birim yakıt maliyeti ($c_{w,FV-DC}$) bu bileşen için birim yakıt maliyeti olarak kullanılmıştır (Bkz. Çizelge 8.1). Klima bileşenine ait birim yakıt maliyeti değeri ise evirici/düzenleyici bileşeni için oluşturulan maliyet eşitliği denkleminin tüm aylar için çözülmesiyle elde edilmiştir (Bkz. Çizelge 8.1). Son olarak evirici/düzenleyici bileşenine ait birim yakıt maliyeti için yine aynı eşitlikte yer alan ve bu bileşenin aynı anda solar FV panel grubu ($c_{w,FV-DC}$), batarya grubu ($c_{w,Bat-Klm}$) ve şebekeden ($c_{w,Şbk-Klm}$) beslendiği durumu dikkate alan bir hesaplama yapılmıştır. Çizelge 11.5 ile görüleceği üzere, en düşük birim yakıt maliyeti sadece güneş enerjisi kaynağı kullanımı dolayısıyla batarya grubu için 0,0045 €/kWh (temmuz) ile 0,0091 €/kWh (şubat) arasında belirlenmiştir. Aynı sistem bileşenlerinin kullanıldığı durumda yaz aylarında daha yüksek yakıt ekserji akımı elde edildiğinden ötürü birim yakıt maliyeti bu aylar için batarya grubunda daha düşük hesaplanmıştır. Bu düşük maliyet akım değerlerine ek olarak en düşük ekserji yıkım akımları ile ürün ekserji akımlarının bu bileşene ait olması dolayısıyla en yüksek eksergo-ekonomik faktör ve en yüksek bağıl maliyet farkı bu bileşende ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan, en yüksek birim yakıt maliyeti değerleri klima bileşeninde 0,0691 €/kWh (aralık) ile 0,3587 €/kWh (eylül) arasında meydana gelmiştir. Bunun sonucunda en düşük eksergo-ekonomik faktör değerleri klima bileşeninde 0,538 (şubat) ile 0,614 (temmuz) arasında oluşmuştur. Birim yakıt maliyetin yanısıra ekserji verimi, indirgenmiş saatlik maliyeti ve ekserji yakıt akımını bir arada içeren bağıl maliyet farkı ise klima için 10,307 (ocak) ile 42,851 (eylül) aralığında hesaplanmıştır.

SPECO analiz yönteminin ileri ekserji analizleriyle birlikte değerlendirilmesi sırasında kullanılan performans göstergesi geliştirilmiş eksergo-ekonomik faktördür ($f_k^{AV,EN}$). Çizelge 11.5 ile görüleceği üzere solar FV panel grubu geleneksel yaklaşımda olduğu gibi yine analizlere dâhil edilmemiştir. Çünkü solar FV panel grubuna ait birim yakıt maliyeti güneş enerjisi kaynağının bedava olmasından ötürü “0” dır (Akrami et al., 2018; Behzadi et al., 2018; Kiyaninia et al., 2019; Keshtkar and Khani, 2018). Bu durumda geliştirilmiş eksergo-ekonomik faktör “1” değerini alacaktır (Bkz. eşitlik (62)). Evirici/düzenleyici ile batarya grubuna ait geliştirilmiş eksergo-ekonomik faktör önlenebilir/içsel ekserji yıkım akımı kaynaklı maliyet akımının toplam saatlik indirgenmiş önlenebilir/içsel maliyet akımına kıyasla çok düşük mertebelerde olmasından ötürü bire yakın hesaplanmıştır. Diğer taraftan klima için geliştirilmiş eksergo-ekonomik faktör önlenebilir/içsel ekserji yıkım akımı kaynaklı maliyet akımının toplam saatlik indirgenmiş önlenebilir/içsel maliyet akımına yakın değerler almasından ötürü 0,5658 (ocak) ile 0,7603 (eylül) arasında hesaplanmıştır.

Çizelge 11.5. SPECO analizi sonucunda evirici-düzenleyici/batarya grubu/klima için elde edilen exergo-ekonomik performans göstergelerine ait ortalama değerler.

Ay	c_f (€/kWh)	$f_k(-)$	$r_k(-)$	$f_k^{AV,EN}(-)$
Oca	0,0185/0,0090/0,0724	0,942/0,985/0,548	1,323/23,807/10,307	0,9940/0,9588/0,5658
Şub	0,0191/0,0091/0,0761	0,942/0,991/0,538	1,324/27,394/11,012	0,9940/0,9892/0,5636
Mar	0,0121/0,0074/0,0781	0,960/0,994/0,581	1,977/37,052/17,173	0,9951/0,9932/0,6079
Nis	0,0100/0,0062/0,1198	0,967/0,996/0,589	2,296/85,743/29,445	0,9970/0,9971/0,6236
May	0,0092/0,0049/0,2334	0,968/0,999/0,601	2,186/352,333/26,242	0,9980/0,9992/0,7034
Haz	0,0092/0,0046/0,1487	0,965/0,999/0,611	2,088/274,563/16,389	0,9971/0,9991/0,6718
Tem	0,0094/0,0045/0,1145	0,962/0,999/0,614	1,984/198,058/14,455	0,9965/0,9991/0,6300
Ağu	0,0093/0,0045/0,1249	0,963/0,999/0,612	2,007/219,746/15,537	0,9967/0,9983/0,6448
Eyl	0,0091/0,0051/0,3587	0,971/0,999/0,600	2,316/454,705/29,782	0,9985/0,9999/0,7603
Eki	0,0101/0,0072/0,1307	0,971/0,997/0,583	2,592/71,820/42,851	0,9973/0,9969/0,6506
Kas	0,0119/0,0088/0,0791	0,964/0,992/0,575	2,288/29,424/23,291	0,9955/0,9914/0,6197
Ara	0,0156/0,0087/0,0691	0,949/0,990/0,562	1,556/24,185/12,583	0,9938/0,9868/0,5879
Yıl	0,0114/0,0062/0,1004	0,960/0,995/0,584	1,995/149,903/20,757	0,9961/0,9924/0,6357

11.4 Hassasiyet Analizi

Bu tez çalışma sırasında GEDKS'ye ait termodinamik (yıllık enerji, yıllık geleneksel ekserji, yıllık ileri ekserji) ve ekonomik (yaşam boyu maliyet, geleneksel eksergo-ekonomi, ileri eksergo-ekonomi) performans dinamik olarak incelenmiştir. Bu sırada gerçekleştirilen hassasiyet analizi ile klima tarafında farklı soğutucu akışkan (R410A, R134a, R22) kullanımı ile sistemin farklı iklim koşulları (İzmir-Csa, Berlin-Cfb) ve çalışma profilleri (sürekli, ofis saatleri) altındaki davranışı termodinamik ve ekonomik performans göstergeleri kullanılarak araştırılmıştır. Elde edilen bulgular yıllık ortalama değerler kullanılarak Çizelge 11.6 ile verilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere, kendi kendine yeterlilik oranı özdeş GEDKS konfigürasyonu için İzmir iklim koşulları altında daha yüksek değerler almıştır. Ofis saatleri çalışma profilinde bu oran İzmir için neredeyse "1" değerine ulaşmıştır. Diğer taraftan, Berlin iklim koşulları altında bu orana ait maksimum değer R22 soğutucu akışkanı kullanımı durumunda ve ofis saatleri çalışma profilinde 0,73'tür. Öz tüketim oranı ise gerek sürekli gerekse ofis saatleri çalışma profilleri altında Berlin iklim koşullarında daha yüksek değerler almıştır. Çünkü, Berlin iklim koşulları altında solar FV panel grubu daha az enerji üretmiştir ve klima daha fazla enerji tüketmiştir. Berlin için gerçekleştirilen yaşam boyu maliyet analizi kapsamında GEDKS maliyeti 1,78 €/Wp (IEA, 2017), nominal faiz oranı % 1,8 (EC, 2017), şebekeden elektrik satın alma maliyeti 0,31 €/kWh (EEP, 2019), şebekeye elektrik satış maliyeti 0,12 €/kWh (IEA, 2019), enflasyon oranı ise % 0,6 (Trading Economics, 2020) alınmıştır. Bu ekonomik koşullar altında gerek sürekli gerekse ofis saatleri çalışma profillerinde İzmire göre daha ekonomik sonuçlar elde edilmiştir. Böylece, iklim koşullarının yanısıra solar FV sistem yatırımları kapsamında ekonomik koşulların ne kadar önemli olduğu görülmüştür. Hassasiyet analizi sonucunda en ekonomik durumun R134a soğutucu akışkanının kullanıldığı Berlin iklim koşullarında sürekli çalışma profilinde meydana geldiği belirlenmiştir. Bu durumda net şimdiki değer 1.389,09€, indirgenmiş geri ödeme süresi ise 21 yıl bulunmuştur.

Çizelge 11.6 Tüm sisteme ait hassasiyet analizi sonuçlarının performans göstergeleri ile değerlendirilmesi.

Soğutucu akışkan	İklim	Çalışma profili	SS	SC	NPV (€)	DPBP (yıl)
R410A	İzmir	Sürekli	0,93	0,36	-5766,09	>25
R134a	İzmir	Sürekli	0,93	0,37	-5759,70	>25
R22	İzmir	Sürekli	0,94	0,35	-5792,91	>25
R410A	Berlin	Sürekli	0,47	0,48	1350,30	21
R134a	Berlin	Sürekli	0,47	0,48	1389,09	21
R22	Berlin	Sürekli	0,49	0,47	1245,54	22
R410A	İzmir	Ofis saatleri	0,99	0,21	-6054,53	>25
R134a	İzmir	Ofis saatleri	0,99	0,21	-6053,42	>25
R22	İzmir	Ofis saatleri	0,99	0,20	-6070,70	>25
R410A	Berlin	Ofis saatleri	0,71	0,32	-183,49	>25
R134a	Berlin	Ofis saatleri	0,72	0,32	-164,07	>25
R22	Berlin	Ofis saatleri	0,73	0,31	-257,18	>25

Tüm sistem için gerçekleştirilen hassasiyet analizinin yanısıra Çizelge 11.7 de verildiği gibi bileşen temelli hassasiyet analizi klima tarafında R410A soğutucu akışkanı kullanımı durumunda benzer parametreler altında yapılmıştır. Ekserji verimi dikkate alındığında sistemin farklı iklim koşulları ve çalışma profilleri altında çalıştırılmasının solar FV panel grubu, evirici/düzenleyici ve batarya grubunda çok büyük bir değişiklik meydana getirmediği görülmüştür. Klima için ise yakıt ekserji akımı sırasında kullanılan ısı transferine ait kalite faktörünün dış ortam ve buharlaştırıcı emiş ile üfleme sıcaklıklarına bağlı değişiklik göstermesinden ötürü % 11,9 ile % 16,0 arasında değişen değerlere sahip olduğu belirlenmiştir. Klima bileşeninin Berlin iklim koşullarında sürekli çalıştırılması sırasında en yüksek ekserji verimi ortaya çıkmıştır. Eksergo-ekonomik analizler kapsamında performans göstergesi olarak kullanılan eksergo-ekonomik ve geliştirilmiş eksergo-ekonomik faktörler Berlin'e ait iklim ve ekonomik koşullar altında hem sürekli hemde ofis saatleri çalışma profillerinde İzmir'e kıyasla daha düşük değerler almıştır. Bunun temel sebebi ise bileşenlerde meydana gelen benzer ekserji yıkım akımlarına karşın saatlik indirgenmiş toplam maliyetin Berlin koşullarında daha düşük mertebelerde olmasıdır.

Çizelge 11.7 Sistem bileşenlerine ait hassasiyet analizi sonuçlarının performans göstergeleri ile değerlendirilmesi.

İklim	Çalışma profili	φ_{FV} (%)	φ_{ED} (%)	φ_{Bat} (%)	φ_{Klm} (%)	f_{ED} (%)	$f_{ED}^{AV,EN}$ (%)	f_{Bat} (%)	$f_{Bat}^{AV,EN}$ (%)	f_{Klm} (%)	$f_{Klm}^{AV,EN}$ (%)
İzmir	Sürekli	14,8	93,0	79,6	11,9	96,03	99,61	99,50	99,24	58,45	63,57
Berlin	Sürekli	14,9	94,4	79,2	16,0	77,18	88,06	96,78	98,39	40,83	58,61
İzmir	Ofis saatleri	14,8	93,0	78,8	12,2	96,54	99,98	99,82	99,36	58,80	66,66
Berlin	Ofis saatleri	14,9	93,5	78,5	15,5	84,84	83,05	98,30	97,05	52,44	38,37

12. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının temel amaçları (i) şebeke destekli batarya grubu ile bütünleşik solar FV panel teknolojisi ile çalışan klima sistemine ait tasarım, kurulum ve test adımlarının gerçekleştirilmesiyle deneysel çalışmaların yapılması, (ii) deneysel çalışmalar ile test edilerek geliştirilen nümerik modelin kurulması ve (iii) yıllık enerji, yıllık ekserji, yaşam boyu maliyet ve eksergo-ekonomik analizlerin geliştirilen bu model aracılığıyla uygulanması olarak belirlenmiştir. Bu esnada tüm sisteme ait yıllık enerji performansı kendi kendine yeterlilik (SS) ve öz tüketim (SC) oranları ile araştırılmıştır. Yine tüm sistemi kapsayan yaşam boyu maliyet analizleri sırasında ise net bugünkü değer (NPV) ve indirgenmiş geri ödeme süresi (DPBP) ekonomik performans göstergeleri olarak kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, sistem bileşenleri içinde yer alan solar FV panel grubu, evirici/düzenleyici ve batarya grubuna ait yıllık enerji performansı enerji verimi (η_{FV} , η_{ED} , η_{Bat}), klimaya ait yıllık enerji performansı ise soğutma (STK_{Klm}) ve ısıtma (ITK_{Klm}) tesir katsayıları kullanılarak belirlenmiştir. Aynı sistem bileşenleri için yıllık geleneksel ekserji performansının ortaya konulması esnasında ekserji verimi (ϕ_k) ile ekserji yıkım akımı ($\dot{E}x_{D,k}$) kullanılmıştır. Yıllık ileri ekserji performansının belirlenmesi sırasında ise ekserji yıkım akımına ait alt bileşenler olan önlenemez/içsel ($\dot{E}x_{D,k}^{UN,EN}$), önlenemez/dışsal ($\dot{E}x_{D,k}^{UN,EX}$), önlenebilir/dışsal ($\dot{E}x_{D,k}^{AV,EX}$) ve önlenebilir/içsel ($\dot{E}x_{D,k}^{AV,EN}$) ekserji yıkım akımlarına yer verilmiştir. Ayrıca, sistem bileşenleri için gerçekleştirilen yıllık enerji, yıllık ekserji ve yıllık ileri ekserji analizlerinin ekonomik analizlerle birlikte değerlendirilmesi kapsamında ekserji, maliyet, enerji, kütle (EXCEM) ve birim ekserji maliyetleme (SPECO) yöntemlerine baş vurulmuştur. EXCEM analizleri kapsamında termo-ekonomik ($\dot{R}_{en,k}$), eksergo-ekonomik ($\dot{R}_{en,k}$), önlenemez/içsel ileri eksergo-ekonomik ($\dot{R}_{ex,k}^{UN,EN}$), önlenemez/dışsal ileri eksergo-ekonomik ($\dot{R}_{ex,k}^{UN,EX}$), önlenebilir/içsel ileri eksergo-ekonomik ($\dot{R}_{ex,k}^{AV,EN}$) ve önlenebilir/dışsal ileri eksergo-ekonomik ($\dot{R}_{ex,k}^{AV,EX}$) parametreler kullanılmıştır. SPECO analizleri kapsamında ise eksergo-ekonomik faktör (f_k), bağıl maliyet farkı (r_k) ve geliştirilmiş eksergo-ekonomik faktör ($f_k^{AV,EN}$) performans göstergesi olarak yer almıştır. Bu analizlerin gerçekleştirilmesi ile elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda listelenmiştir.

- PVSOL paket programı ile tüm sistemin makro boyutta ele alınması sonucunda yıllık kendi kendine yeterlilik ve öz tüketim oranları sırasıyla 0,93 ve 0,39 bulunmuştur. TRNSYS paket programı kullanımı ile ise aynı değerler sırasıyla 0,96 ve 0,42 olarak hesaplanmıştır.
- TRNSYS modeli ile belirlenen bileşenler arasında gerçekleşen güç etkileşimleri deneysel çalışmalar ile başarılı bir şekilde doğrulanmıştır (Bkz. Şekil 6.8). İklim koşulları açısından en düşük karekök hatanın meydana geldiği 26 Eylül 2019 da gerçekleştirilen test çalışmasında solar FV paneller tarafından üretilen enerji gerek nümerik gerekse deneysel çalışmalar ile 13,7 kWh olarak belirlenmiştir. Bataryalara ait doluluk oranı gün boyunca ortalama % 70,2 (nümerik) ve % 66,1 (deneysel) bulunmuş olup klimaya ait ortalama enerji tüketimi ise nümerik çalışmalar ile 504,1 W, deneysel çalışmalarla ise 512,2 W olarak hesaplanmıştır.
- Yıllık enerji analizlerine göre en düşük aylık ortalama enerji verimi solar FV panel grubu için % 12,5 (temmuz) ile % 14,0 (ocak) arasında bulunmuştur. Solar FV panel grubuna ait yıllık ortalama enerji verimi değeri ise % 13,2'dir. Solar FV panel grubunu aylık ortalama enerji verimi değeri dikkate alındığında sırasıyla batarya grubu (% 74,0-% 83,5) ve evirici/düzenleyici (% 92,4-% 93,7) takip etmiştir. Bu iki bileşene ait yıllık ortalama enerji verimleri sırasıyla % 79,6 ve % 93,0 hesaplanmıştır.
- Yıllık enerji analiz sonuçlarına göre klimaya ait aylık ortalama soğutma ve ısıtma tesir katsayıları sırasıyla 3,3-3,6 ve 4,0-4,1 arasında değişiklik göstermiştir. Klima tesir katsayılarına ait yıllık ortalama değerler ise soğutma modunda 3,4 ve ısıtma modunda ise 4,0 bulunmuştur.
- Yıllık enerji analizlerinin farklı soğutucu akışkan kullanımı altında ele alınması sonucunda solar FV panel grubu, evirici/düzenleyici ve batarya grubuna ait enerji verimlerinde kayda değer bir değişiklik

gözlemlenmemiştir (Bkz. Şekil 11.6). Fakat, klimaya ait yıllık ortalama ısıtma ve soğutma tesir katsayıları en yüksek değerlerine (sırasıyla 4,25 ve 4,74) R22 soğutucu akışkanı kullanımında sahip olmuştur. Öte yandan, en düşük soğutma ve ısıtma tesir katsayıları R134a soğutucu akışkanı için sırasıyla yıllık ortalama değerler cinsinden 3,99 ve 3,30 şeklinde hesaplanmıştır.

- Yıllık ekserji analizlerine göre en yüksek aylık ortalama ekserji yıkım akımı değerleri solar FV panel grubu için 2,119 kW (şubat) ile 4,264 kW (ağustos) arasında bulunmuştur. Solar FV panel grubunu sırasıyla klima (0,028 kW-0,173 kW), evirici/düzenleyici (0,031 kW-0,045 kW) ve batarya grubu (0,004 kW-0,047 kW) takip etmiştir. Yıllık ortalama ekserji verimi ise evirici/düzenleyici, batarya grubu, klima ve solar FV panel grubu için sırasıyla % 93,0, % 79,6, % 11,9 ve % 14,8 olarak belirlenmiştir.
- Yıllık ekserji analizlerinin farklı soğutucu akışkan kullanımı altında ele alınması sonucunda solar FV panel grubu, evirici/düzenleyici ve batarya grubuna ait ekserji verimlerinde kayda değer bir değişiklik meydana gelmemiştir (Bkz. Şekil 11.9). Fakat, klimaya ait en yüksek yıllık ortalama ekserji verimi ile en düşük yıllık ortalama ekserji yıkım akımı R22 soğutucu akışkanı kullanımı durumunda sırasıyla % 12,8 ve 0,098 kW olarak ortaya çıkmıştır. Öte yandan, en düşük ekserji verimi ile en yüksek ekserji yıkım akımı R134a soğutucu akışkanı için sırasıyla yıllık ortalama değerler cinsinden % 11,7 ve 0,107 kW şeklinde hesaplanmıştır.
- Yıllık ileri ekserji analizlerine göre hem solar FV panel grubu hemde klima bileşeninde meydana gelen ekserji yıkım akımının tamamının içsel olduğu görülmüştür. Solar FV panel grubu için bu içsel ekserji yıkımının sadece % 8,6'sı önlenabilir iken klima için bu oran % 53,8 olarak belirlenmiştir.
- Yıllık ileri ekserji analizlerine göre evirici/düzenleyici ile batarya grubu için önlenemez/içsel, önlenemez/dışsal, önlenabilir/içsel ve önlenebilir/dışsal ekserji yıkım akımlarının tamamı görülmüştür.

Evirici/düzenleyici için ekserji yıkım akımları payları yukarıda verilen sırayla % 32,1, % 26,8, % 11,0 ve % 30,1 iken batarya grubunda bu paylar % 28,8, % 42,7, % 16,8 ve % 11,7 olarak hesaplanmıştır.

- Yıllık ileri ekserji analizlerine göre evirici/düzenleyiciye ait önlenemez/dışsal ve önlenebilir/içsel ekserji yıkım akımlarının negatif değer aldığı görülmüştür. Bu sebeple, bu ekserji yıkım akımlarının arttırılması veya azaltılması ile geleneksel ekserji analizleri ile belirlenen evirici/düzenleyici'ye ait ekserji yıkım akımının ters orantılı bir şekilde değiştiği belirlenmiştir.
- Yıllık ekserji analizlerinin farklı soğutucu akışkan kullanımı altında ele alınması sonucunda tamamı içsel olan klimaya ait ekserji yıkım akımına ait önlenebilir paylar R410A, R134a ve R22 soğutucu akışkanı için sırasıyla % 53,8, % 59,1 ve % 55,1 olarak hesaplanmıştır.
- Yaşam boyu maliyet analizleri sonucunda İzmir'e ait iklim ve Türkiye'ye ait ekonomik koşullar altında GEDKS için net bugünkü değer -5.766,1 €, indirgenmiş geri ödeme süresi ise 25 yılın üzerinde bulunmuştur.
- EXCEM analiz yöntemi sonucunda en yüksek yıllık ortalama termo-ekonomik ve eksergo-ekonomik parametre değerleri solar FV panel grubu için sırasıyla 312,2 kWh/€ ve 138,7 kWh/€ olarak hesaplanmıştır. Bu sebeple, indirgenmiş saatlik maliyet akımına karşılık en yüksek enerji ve ekserji kayıp akımlarının bu bileşene ait olduğu belirlenmiştir. Bu bileşeni sırasıyla klima, evirici/düzenleyici ve batarya grubu takip etmiştir. İleri eksergo-ekonomik parametreler için de benzer sonuçlar elde edilmiştir (Bkz. Çizelge 11.4).
- SPECO analiz yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen geleneksel ve eksergo-ekonomik analizlere birim yakıt maliyetinin "0" olmasından ötürü solar FV panel grubu dahil edilmemiştir. Analizler kapsamında kullanılan eksergo-ekonomik ve ileri eksergo-ekonomik faktörler en düşük değerlere klima bileşeninde sahip olmuştur.

- Hassasiyet analizi sonucunda İzmir için gerek sürekli gerekse ofis saatleri çalışma profilleri altında ekonomik olarak elverişsiz bulunan sistem, Berlin koşullarında sürekli çalışma profilinde elverişli hale geçmiştir. Ayrıca, Berlin'e ait iklim ve ekonomik koşullar altında eksergo-ekonomik ve geliştirilmiş eksergo-ekonomik faktörlere ait değerler daha düşük mertebelerde hesaplanmıştır.

Yukarıda verilen sonuçlar ile görüleceği üzere, geleneksel ekserji analizlerinin uygulanması ile önceliğin solar FV panel grubuna, ardından klimaya, daha sonrasında batarya grubuna ve son olarak evirici/düzenleyiciye verilmesi gerektiği belirlenmiştir. Fakat ileri ekserji analizleri sonuçları temel alındığında önceliğin ilk olarak klimaya verilmesi gerektiği görülmüştür. Çünkü, farklı soğutucu akışkan kullanımına bağlı olarak klimada % 53,8 ile % 59,1 oranında değişiklik gösteren önlenebilir ekserji yıkım akımı mevcuttur. Klima sonrasında ise ileri ekserji analiz sonuçları önceliğin evirici/düzenleyiciye verilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Bu bileşen için toplam % 41,1 oranında önlenebilir ekserji yıkım akımı mevcuttur. İleri ekserji analizi sonucunda üçüncü öncelik ise toplam % 28,5 oranında önlenebilir ekserji yıkım akımı potansiyeli olan batarya grubu için ortaya çıkmıştır. Son olarak en düşük önlenebilir ekserji yıkım akımının olduğu bileşen solar FV panel grubu olarak belirlenmiştir. Bu bileşene ait önlenebilir payın sadece % 8,9 olduğu görülmüştür.

Ekonomik analizler içinde yer alan yaşam boyu maliyet analiz sonuçlarına göre sistem ekonomik olarak elverişsiz bulunmuştur. Fakat, faiz oranı ile enflasyon oranı % 1, sübvansiyon desteği % 25 ve solar FV panel grubu tarafından üretilen elektriğin satın alma maliyeti şu anki değer iki katı olduğunda net bugünkü değer 655,24€, indirgenmiş geri ödeme süresi ise 24 yıl olarak hesaplanmış ve sistem ekonomik açıdan elverişli hale gelmiştir. Son olarak eksergo-ekonomik ve ileri eksergo-ekonomik faktörlerin en düşük değerlerinin klima bileşeninde görülmesi ilk yatırım önceliğinin bu bileşene verilmesi gerektiğini göstermiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abax**, “Trigen 3kW Plus - Eviriciye Ait Teknik Özellikler”,
<http://www.mppsolar.com/manual/MPI%203K%20HYBRID%20PLUS/3k%20hybrid%20inverter%20manual.pdf> (Erişim tarihi: 9 Şubat 2019)
- Abbasi, Y., Baniasadi, E. and Ahmadikia, H.**, 2016, Performance assessment of a hybrid solar-geothermal air conditioning system for residential application: energy, exergy, and sustainability analysis, *International Journal of Chemical Engineering*, 5710560.
- Abd Elbar, A.R., Yousef, M.S. and Hassan, H.**, 2019, Energy, exergy, exergoeconomic and enviroeconomic (4E) evaluation of a new integration of solar still with photovoltaic panel, *Journal of Cleaner Production*, 233:665-680 pp.
- Aguilar, F., Crespí-Llorens, D. and Quiles, P.V.**, 2019, Techno-economic analysis of an air conditioning heat pump powered by photovoltaic panels and the grid, *Solar Energy*, 180:169-179 pp.
- Akbari, N.**, 2018, Introducing and 3E (energy, exergy, economic) analysis of an integrated transcritical CO₂ Rankine cycle, Stirling power cycle and LNG regasification process, *Applied Thermal Engineering*, 140:442-454 pp.
- Akrami, E., Gholami, A., Ameri, M. and Zandi, M.**, 2018, Integrated an innovative energy system assessment by assisting solar energy for day and night time power generation: Exergetic and Exergo-economic investigation, *Energy Conversion and Management*, 175:21-32 pp.
- Allouhi, A., Kousksou, T., Jamil, A., Bruel, P., Mourad, Y. and Zeraouli, Y.**, 2015, Solar driven cooling systems: An updated review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44:159-181 pp.
- Ansarinasab, H. and Mehrpooya, M.**, 2018, Investigation of a combined molten carbonate fuel cell, gas turbine and Stirling engine combined cooling heating and power (CCHP) process by exergy cost sensitivity analysis, *Energy Conversion and Management*, 165:291-303 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

ASHRAE Handbook Series, 2009, Chapter 1: Psychrometrics, American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 16p.

ASHRAE Handbook Series, 2012, Chapter 6: HVAC Systems and Equipment (SI), American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 21p.

ASHRAE Handbook Series, 2013a, Chapter 17: Residential Cooling And Heating Load Calculations, American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 16p.

ASHRAE Handbook Series, 2013b, Chapter 14: Climatic Design Information, American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 46p.

ASHRAE Handbook Series, 2013c, Chapter 26: Heat, Air, And Moisture Control In Building Assemblies - Material Properties, American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 22p.

ASHRAE Handbook Series, 2013d, Chapter 25: Heat, Air, And Moisture Control In Building Assemblies - Fundamentals, American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 19p.

ASHRAE Handbook Series, 2013e, Chapter 15: Fenestration, American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 45p.

ASHRAE, 2001. “ANSI/ASHRAE Standard 62-2001 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality”
<http://www.ce.utexas.edu/prof/Novoselac/classes/ARE389H/Handouts/Std62-2001.pdf> (Erişim tarihi: 5 Nisan 2020)

Ayala-Gilardón, A., Sidrach-de-Cardona, M. and Mora-López, L., 2018, Influence of time resolution in the estimation of self-consumption and self-sufficiency of photovoltaic facilities, *Applied Energy*, 229:990-997 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Badescu, V.**, 2002, First and second law analysis of a solar assisted heat pump based heating system, *Energy Conversion and Management*, 43(18):2539-2552 pp.
- Bagheri, B.S., Shirmohammadi, R., Mahmoudi, S.M.S. and Rosen, M.A.**, 2019, Optimization and comprehensive exergy-based analyses of a parallel flow double-effect water-lithium bromide absorption refrigeration system, *Applied Thermal Engineering*, 152:643-653 pp.
- Baldvinsson, I. and Nakata, T.**, 2014, A comparative exergy and exergoeconomic analysis of a residential heat supply system paradigm of Japan and local source based district heating system using SPECO (specific exergy cost) method, *Energy*, 74:537-554 pp.
- Bayrak, F., Ertürk, G. and Oztop, H.F.**, 2017, Effects of partial shading on energy and exergy efficiencies for photovoltaic panels, *Journal of Cleaner Production*, 164:58-69 pp.
- Behzadi, A., Gholamian, E., Ahmadi, P., Habibollahzade, A. and Ashjaee, M.**, 2018, Energy, exergy and exergoeconomic (3E) analyses and multi-objective optimization of a solar and geothermal based integrated energy system, *Applied Thermal Engineering*, 143:1011-1022 pp.
- Bonforte, G., Buchgeister, J., Manfrida, G. and Petela, K.**, 2018, Exergoeconomic and exergoenvironmental analysis of an integrated solar gas turbine/combined cycle power plant, *Energy*, 156:352-359 pp.
- Byrne, P. and Ghouali, R.**, 2019, Exergy analysis of heat pumps for simultaneous heating and cooling, *Applied Thermal Engineering*, 149:414-424 pp.
- Caglayan, H. and Caliskan, H.**, (2019), Thermodynamic based economic and environmental analyses of an industrial cogeneration system, *Applied Thermal Engineering*, 158:113792 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chaianong, A., Bangviwat, A., Menke, C., Breitschopf, B. and Eichhammer, W.,** 2020, Customer economics of residential PV–battery systems in Thailand, *Renewable Energy*, 146:297-308 pp.
- Chen, Y., Liu, Y., Liu, J., Luo, X., Wang, D., Wang, Y. and Liu, J.,** 2020, Design and adaptability of photovoltaic air conditioning system based on office buildings. *Solar Energy*, 202:17-24 pp.
- Choudhary, P. and Srivastava, R.K.,** 2019, Sustainability perspectives-a review for solar photovoltaic trends and growth opportunities, *Journal of Cleaner Production*, 227:589-612 pp.
- CSUN,** “QSAR 255-60-P – Tekli Kristalin SFV Panele Ait Teknik Özellikler” https://www.zonnepanelen.net/nl/pdf/panels/CSUN270-60M_QSAR_ENG.pdf (Erişim tarihi: 9 Şubat 2019)
- Dai, B., Qi, H., Liu, S., Ma, M., Zhong, Z., Li, H., et al.,** 2019, Evaluation of transcritical CO₂ heat pump system integrated with mechanical subcooling by utilizing energy, exergy and economic methodologies for residential heating, *Energy Conversion and Management*, 192:202-220 pp.
- Daikin,** 2019. “FTXN25L9 - Duvar Tipi Split Klimaya Ait Teknik Özellikler”, http://czm.com.tr/daikin/index.php?route=product/product&product_id=59 (Erişim tarihi: 9 Şubat 2019)
- Daikin,** 2020. “Split klimalara ait Montaj Talimatı”, <https://www.basaranisi.com/dosya/dokuman/07c0f41eb52b4559c60915f45ae47bd9.pdf> (Erişim tarihi: 15 Mart 2020)
- Davis,** “Technical Specification of Anemometer”, https://www.davisinstruments.com/product_documents/weather/spec_sheets/6410_SS.pdf (Erişim tarihi: 13 Şubat 2019)
- Dehwah, A.H. and Asif, M.,** 2019, Assessment of net energy contribution to buildings by rooftop photovoltaic systems in hot-humid climates, *Renewable Energy*, 131:1288-1299 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Deltaohm, 2019a.** “Technical Specification of Ambient Temperature and Relative Humidity Microprocessor Transmitters”,
http://www.deltaohm.com/ver2012/download/HD9008TRR_uk.pdf (Erişim tarihi: 10 Şubat 2019)
- Deltaohm, 2019b.** “Technical Specification of Pyranometer”,
http://www.deltaohm.com/ver2012/download/LP_Silicon_PYRA04_M_uk.pdf (Erişim tarihi: 13 Şubat 2019)
- Dondariya, C., Porwal, D., Awasthi, A., Shukla, A. K., Sudhakar, K., SR, M. M. and Bhimte, A., 2018,** Performance simulation of grid-connected rooftop solar PV system for small households: A case study of Ujjain, India, *Energy Reports*, 4:546-553 pp.
- Elimko, 2019b.** “Klima Hava Tarafı Sıcaklık Sensörüne Ait Teknik Özellikler”,
<https://www.elimko.com.tr/files/RezistansTermometreler.pdf> (Erişim tarihi: 14 Şubat 2019)
- Elimko. 2019a.** “Elimko E-PR-110 Veri Kaydediciye Ait Teknik Özellikler”,
<http://www.elimko.com.tr/files/KY-PR110-0416-0.pdf> (Erişim tarihi: 14 Şubat 2019)
- Ellabban, O. and Alassi, A., 2019,** Integrated Economic Adoption Model for residential grid-connected photovoltaic systems: An Australian case study, *Energy Reports*, 5:310–326 pp.
- Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM), 2019.** “2017 yılı ulusal enerji denge tablosu (bin tep)”, <https://www.eigm.gov.tr/tr-TR/Denge-Tablolari/Denge-Tablolari> (Erişim tarihi: 7 Ekim 2019)
- Enerji Piyasaları Düzenleme Kurulu (EPDK), 2020.** “Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları”, <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-1/tarifeler> (Erişim tarihi: 14 Ağustos 2020)
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), 2017.** “2015-2019 Stratejik Planı”, https://sp.enerji.gov.tr/ETKB_2015_2019_Stratejik_Planı.pdf (Erişim tarihi: 21 Ocak 2019)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Enongene, K.E., Abanda, F.H., Otene, I.J.J., Obi, S.I. and Okafor, C.,** 2019, The potential of solar photovoltaic systems for residential homes in Lagos city of Nigeria, *Journal of Environmental Management*, 244:247-256 pp.
- Erbay, Z. and Hepbasli, A.,** 2014, Application of conventional and advanced exergy analyses to evaluate the performance of a ground-source heat pump (GSHP) dryer used in food drying, *Energy Conversion and Management*, 78:499-507 pp.
- Europe's Energy Portal (EEP),** 2019. "Data for EU energy prices - July 2019", https://www.energy.eu/electricity_natural-gas_prices_european_union (Erişim tarihi: 27 Eylül 2020)
- European Commission (EC),** 2017. "Residential prosumers in the European Energy Union (prepared by GfK Belgium consortium in 2017)", https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/study-residential-prosumers-energy-union_en.pdf. (Erişim tarihi: 27 Eylül 2020)
- Fouad, M.M., Shihata, L.A. and Morgan, E.I.,** 2017, An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80:1499-1511 pp.
- Gazelektrik.** 2020. "Mesken Tarifelerine göre Elektrik kWh Fiyatları", <https://gazelektrik.com/faydali-bilgiler/1-kwh-elektrik-kac-tl> (Erişim tarihi: 14 Ağustos 2020).
- Global Solar Atlas (GSA),** 2019. "Küresel güneş enerjisi potansiyeli", <https://globalsolaratlas.info/downloads/world?c=1.757537,114.960938,2> (Erişim tarihi: 14 Ekim 2019)
- Green, M.A., Dunlop, E.D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N. and Ho-Baillie, A.W.Y.,** 2020, Solar cell efficiency tables (Version 55), *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28:3-15 pp.
- Guerello, A., Page, S., Holburn, G., and Balzarova, M.,** 2020, Energy for off-grid homes: Reducing costs through joint hybrid system and energy efficiency optimization, *Energy and Buildings*, 207:109478 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gungor, A., Tsatsaronis, G., Gunerhan, H. and Hepbasli, A.,** 2015, Advanced exergoeconomic analysis of a gas engine heat pump (GEHP) for food drying processes, *Energy Conversion and Management*, 91:132-139 pp.
- Gürtürk, M., Benli, H., and Ertürk, N.K.,** 2018, Effects of different parameters on energy–Exergy and power conversion efficiency of PV modules, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92:426-439 pp.
- He, Q., Liu, H., Hao, Y., Liu, Y. and Liu, W.,** 2018, Thermodynamic analysis of a novel supercritical compressed carbon dioxide energy storage system through advanced exergy analysis, *Renewable Energy*, 127:835–849 pp.
- Ibrahim, T.K., Basrawi, F., Awad, O.I., Abdullah, A.N., Najafi, G., Mamat, R., and Hagos, F.Y.,** 2017, Thermal performance of gas turbine power plant based on exergy analysis, *Applied thermal engineering*, 115:977-985 pp.
- Ibrahim, T.K., Mohammed, M.K., Awad, O.I., Abdalla, A.N., Basrawi, F., Mohammed, M.N. et al.,** 2018, A comprehensive review on the exergy analysis of combined cycle power plants, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90:835–850 pp.
- International Energy Agency (IEA),** 2014. “Technology Roadmap - Solar Photovoltaic Energy”, <https://webstore.iea.org/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy-2014> (Erişim tarihi: 13 Ekim 2019)
- International Energy Agency (IEA),** 2017. “National survey report of photovoltaic applications in Germany (Prepared by G. Altenhöfer-Pflaum, R. Horbelt)”, https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/National_Survey_Report_of_PV_Power_Applications_in_Germany_-_2017.pdf. Accessed 12 June 2020 (Erişim tarihi: 27 Eylül 2020)
- International Energy Agency (IEA),** 2019. “Photovoltaic Power Systems Programme: Trends in photovoltaic applications (ISBN 978-3-906042-91-6)” <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/02/5319-iea-pvps-report-2019-08-lr.pdf> (Erişim tarihi: 27 Eylül 2020)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- İZODER**, “TS 825 Hesap Programı”, https://www.izoder.org.tr/hesap-makinesi/ts_825_yardim.pdf (Erişim tarihi: 4 Şubat 2019)
- Jing, Y., Li, Z., Chen, H., Lu, S. and Lv, S.**, 2019, Exergoeconomic design criterion of solar absorption-subcooled compression hybrid cooling system based on the variable working conditions, *Energy Conversion and Management*, 180:889-903 pp.
- Jurasz, J. and Campana, P. E.**, 2019, The potential of photovoltaic systems to reduce energy costs for office buildings in time-dependent and peak-load-dependent tariffs, *Sustainable Cities and Society*, 44:871-879 pp.
- Jurasz, J.K., Dabek P.D. and Campana, P.E.**, 2020, Can a city reach energy self-sufficiency by means of rooftop photovoltaics? Case study from Poland, *Journal of Cleaner Production*, 245:118813 pp.
- Kael**, “DC Güçölçer Teknik Özellik Dokümanı”, <https://www.kael.com.tr/pdfler/MULTISER-LED-PC.pdf> (Erişim tarihi: 14 Şubat 2019)
- Kanbur, B.B., Xiang, L., Dubey, S., Choo, F.H. and Duan, F.**, 2018, Finite sum based thermoeconomic and sustainable analyses of the small scale LNG cold utilized power generation systems, *Applied Energy*, 220:944-961 pp.
- Karthick, K., Suresh, S., Hussain, M.M.M., Ali, H.M. and Kumar, C.S.**, 2019. Evaluation of solar thermal system configurations for thermoelectric generator applications: A critical review, *Solar Energy*, 188:111-142 pp.
- Keshtkar, M. M. and Khani, A.G.**, 2018, Exergoeconomic analysis and optimization of a hybrid system based on multi-objective generation system in Iran: a case study, *Renewable Energy Focus*, 27:1-13 pp.
- Kianfard, H., Khalilarya, S. and Jafarmadar, S.**, 2018, Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC, *Energy Conversion and Management*, 177:339-349 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kim, D., Cho, H., Koh, J. and Im, P.,** 2020, Net-zero energy building design and life-cycle cost analysis with air-source variable refrigerant flow and distributed photovoltaic systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118:109508 pp.
- Kiyaninia, A., Karimi, H. and Avargani, V.M.,** 2019, Exergoeconomic analysis of a solar photovoltaic-based direct evaporative air-cooling system, *Solar Energy*, 193:253-266 pp.
- Klimes, J.,** 2011, Sustainability in the Process Industry: Integration and Optimization. McGraw-Hill Companies Inc., New York, USA.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. and Rubel, F.,** 2006, World map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3):259-263 pp.
- Kowsari, S., Deymi-Dashtebayaz, M., Karbasi, K. and Sheikhani, H.,** 2020, Optimal working conditions of various city gate stations for power and hydrogen production based on energy and eco-exergy analysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45:22513-22533 pp.
- Kumar, L., Hasanuzzaman, M. and Rahim, N.A.,** 2019, Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review, *Energy Conversion and Management*, 195:885-908 pp.
- Kumar, N.M., Subramaniam, U., Mathew, M., Ajitha, A. and Almakhlles, D.J.,** 2020, Exergy analysis of thin-film solar PV module in ground-mount, floating and submerged installation methods, *Case Studies in Thermal Engineering*, 100686.
- Laib, I., Hamidat, A., Haddadi, M., Ramzan, N. and Olabi, A.G.,** 2018, Study and simulation of the energy performances of a grid-connected PV system supplying a residential house in north of Algeria, *Energy*, 152:445-454 pp.
- Lazzaretto, A. and Tsatsaronis, G.,** 2006, SPECO: a systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems, *Energy*, 31(8-9):1257-1289 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Leite, G.D.N.P., Weschenfelder, F., Araújo, A.M., Ochoa, Á.A.V., Neto, N.D.F.P. and Kraj, A.,** 2019, An economic analysis of the integration between air-conditioning and solar photovoltaic systems, *Energy Conversion and Management*, 185:836-849 pp.
- Li, C., Zhou, D. and Zheng, Y.,** 2018c, Techno-economic comparative study of grid-connected PV power systems in five climate zones, China, *Energy*, 165:1352-1369 pp.
- Li, D.H.W., Yang, L. and Lam, J.C.,** 2012, Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones - A review, *Energy*, 42:103–112 pp.
- Li, J,** 2019, Optimal sizing of grid-connected photovoltaic battery systems for residential houses in Australia, *Renewable Energy*, 136:1245-1254 pp.
- Li, M., Ma, T., Liu, J., Li, H., Xu, Y., Gu, W. and Shen, L.,** 2019, Numerical and experimental investigation of precast concrete facade integrated with solar photovoltaic panels, *Applied Energy*, 253:113509 pp.
- Li, R., Ooka, R., and Shukuya, M.,** 2014, Theoretical analysis on ground source heat pump and air source heat pump systems by the concepts of cool and warm exergy, *Energy and Buildings*, 75:447-455 pp.
- Li, Y., Gao, W. and Ruan, Y.,** 2018a, Performance investigation of grid-connected residential PV-battery system focusing on enhancing self-consumption and peak shaving in Kyushu, Japan, *Renewable Energy*, 127:514-523 pp.
- Li, Y., Zhao, B. Y., Zhao, Z. G., Taylor, R. A. and Wang, R. Z.,** 2018b, Performance study of a grid-connected photovoltaic powered central air conditioner in the South China climate, *Renewable Energy*, 126:1113-1125 pp.
- Lohani, S.P. and Schmidt, D.J.R.E.,** 2010, Comparison of energy and exergy analysis of fossil plant, ground and air source heat pump building heating system, *Renewable Energy*, 35(6):1275-1282 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ma, Z., Ren, H. and Lin, W.,** 2019, A review of Heating, Ventilation and Air Conditioning technologies and innovations used in solar-powered net zero energy Solar Decathlon houses, *Journal of Cleaner Production*, 240:118-158 pp.
- Mata-Torres, C., Palenzuela, P., Zurita, A., Cardemil, J. M., Alarcón-Padilla, D.C. and Escobar, R.A.,** 2020, Annual thermoeconomic analysis of a Concentrating Solar Power+ Photovoltaic+ Multi-Effect Distillation plant in northern Chile, *Energy Conversion and Management*, 213:112852 pp.
- Mateu-Royo, C., Navarro-Esbri, J., Mota-Babiloni, A., Molés, F. and Amat-Albuixech, M.,** 2019, Experimental exergy and energy analysis of a novel high-temperature heat pump with scroll compressor for waste heat recovery, *Applied Energy*, 253:113504 pp.
- Mehrpooya, M., Ansarinasab, H., Sharifzadeh, M.M.M. and Rosen, M.A.,** 2018a, Conventional and advanced exergoeconomic assessments of a new air separation unit integrated with a carbon dioxide electrical power cycle and a liquefied natural gas regasification unit, *Energy Conversion and Management*, 163:151-168 pp.
- Mehrpooya, M., Ghorbani, B., and Hosseini, S.S.,** 2018b, Thermodynamic and economic evaluation of a novel concentrated solar power system integrated with absorption refrigeration and desalination cycles, *Energy Conversion and Management*, 175:337-356 pp.
- Mehrpooya, M., Sharifzadeh, M.M.M. and Ansarinasab, H.,** 2018c, Investigation of a novel integrated process configuration for natural gas liquefaction and nitrogen removal by advanced exergoeconomic analysis, *Applied Thermal Engineering*, 128:1249-1262 pp.
- Meteonorm,** “A software program for meteorological parameters around the World (7th version)”, <https://meteonorm.com/en/> (Erişim tarihi: 17 Mart 2020).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Montazerinejad, H., Ahmadi, P. and Montazerinejad, Z.,** 2019, Advanced exergy, exergo-economic and exergo-environmental analyses of a solar based trigeneration energy system, *Applied Thermal Engineering*, 152:666-685 pp.
- Morosuk, T. and Tsatsaronis, G.,** 2019, Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems, *Energy*, 169:238-246 pp.
- Nguyen, T.V., Pierobon, L., Elmegaard, B., Haglind, F., Breuhaus, P. and Voldsund, M.,** 2013, Exergetic assessment of energy systems on North Sea oil and gas platforms, *Energy*, 62:23–36 pp.
- Njoku, H.O.,** 2016, Upper-limit solar photovoltaic power generation: Estimates for 2-axis tracking collectors in Nigeria, *Energy*, 95:504-16 pp.
- Nwaigwe, K.N., Mutabilwa, P. and Dintwa, E.,** 2019, An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids, *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3):629-633 pp.
- Ogbonnaya, C., Turan, A. and Abeykoon, C.,** 2019b, Numerical integration of solar, electrical and thermal exergies of photovoltaic module: A novel thermophotovoltaic model, *Solar Energy*, 185:298-306 pp.
- Ogbonnaya, C., Turan, A., and Abeykoon, C.,** 2019a, Energy and exergy efficiencies enhancement analysis of integrated photovoltaic-based energy systems, *Journal of Energy Storage*, 26:101029 pp.
- Oliva, S., Passey, R. and Abdullah, M. A.,** 2019, A semi-empirical financial assessment of combining residential photovoltaics, energy efficiency and battery storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105:206-214 pp.
- Open Studio,** “OpenStudio® is a cross-platform (Windows, Mac, and Linux) collection of software tools to support whole building energy modeling using EnergyPlus and advanced daylight analysis using Radiance”, <https://www.openstudio.net/> (Erişim tarihi: 14 Mart 2020)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Opoku, R., Mensah-Darkwa, K. and Muntaka, A.S.,** 2018, Techno-economic analysis of a hybrid solar PV-grid powered air-conditioner for daytime office use in hot humid climates—A case study in Kumasi city, Ghana, *Solar Energy*, 165:65-74 pp.
- O'Shaughnessy, E., Cutler, D., Ardani, K. and Margolis, R.,** 2018, Solar plus: Optimization of distributed solar PV through battery storage and dispatchable load in residential buildings, *Applied Energy*, 213:11-21 pp.
- Ozcan, H. G., Gunerhan, H., Yildirim, N. and Hepbasli, A.,** 2019, A comprehensive evaluation of PV electricity production methods and life cycle energy-cost assessment of a particular system, *Journal of Cleaner Production*, 238:117883 pp.
- Ozcan, H.G., Gunerhan, G., Ozcan, N.Y., Demirkiran, G. and Aydin, E.E.,** 2016, Comparative study on thermal load calculation methods for a residential building, 12th REHVA World Congress, Department of Civil Engineering, Aalborg University, 6:12 pp.
- Pack Calculation Pro,** “A simulation tool for calculating and comparing the yearly energy consumption of refrigeration systems and heat pumps”, <https://www.ipu.dk/products/pack-calculation-pro/> (Erişim tarihi: 2 Nisan 2020).
- Pena-Bello, A., Barbour, E., Gonzalez, M.C., Patel, M.K. and Parra, D.,** 2019, Optimized PV-coupled battery systems for combining applications: Impact of battery technology and geography, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112:978-990 pp.
- Penta,** “PT100 – Yüzey Tip Sıcaklık Sensörüne Ait Teknik Özellikler”, <http://pentaotomasyon.com.tr/sayfalar.asp?LanguageID=1&cid=3&id=3243&b=detay> (Erişim tarihi: 14 Şubat 2019).
- Petela, R.,** 1964, Exergy of heat radiation, *Journal of Heat Transfer*, 86:187–192 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Poruschi, L. and Ambrey, C.L.**, 2019, Energy justice, the built environment, and solar photovoltaic (PV) energy transitions in urban Australia: A dynamic panel data analysis, *Energy Research & Social Science*, 48:22-32 pp.
- Prăvălie, R., Patriche, C. and Bandoc, G.**, 2019, Spatial assessment of solar energy potential at global scale. A geographical approach, *Journal of Cleaner Production*, 209:692-721 pp.
- Prieto, A., Knaack, U., Auer, T. and Klein, T.**, 2019, COOLFACADE: State-of-the-art review and evaluation of solar cooling technologies on their potential for façade integration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101:395-414 pp.
- PVSOL Premium**, “Dynamic simulation program with 3D visualization and detailed shading analysis of PV systems with storage systems”, <https://www.valentin-software.com/sites/default/files/downloads/handbuecher/en/manual-pvsol-en.pdf> (Erişim tarihi: 17 Mart 2020)
- Reda, F., Paiho, S., Pasonen, R., Helm, M., Menhart, F., Schex, R. and Laitinen, A.**, 2020, Comparison of solar assisted heat pump solutions for office building applications in Northern climate, *Renewable Energy*, 147:1392-1417 pp.
- Reddy, V.S., Kaushik, S.C. and Tyagi, S.K.**, 2012, Exergetic analysis and performance evaluation of parabolic trough concentrating solar thermal power plant (PTCSTPP), *Energy*, 39:258–273 pp.
- Renewable Energy Policy Network for the 21th Century (REN21), 2018.** “Renewables 2018 Global Status Report”, http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_final_.pdf (Erişim tarihi: 21 Ocak 2019)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Renewable Energy Policy Network for the 21th Century (REN21), 2019.

“Renewables 2019 Global Status Report”, https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf (Erişim tarihi: 21 Ocak 2019)

Rheonik, “Operation Manuel of Coriolis Flowmeter”, https://www.rheonik.com/wp-content/uploads/pdf/RHE14_Operation_Manual.pdf (Erişim tarihi: 15 Mart 2020)

Roselli, C., Diglio, G., Sasso, M. and Tariello, F., 2019, A novel energy index to assess the impact of a solar PV-based ground source heat pump on the power grid, *Renewable Energy*, 143:488-500 pp.

Rosen, M.A., and Tang, R., 2007, Effect of altering combustion air flow on a steam power plant: Energy and exergy analysis, *International Journal Of Energy Research*, 31(3):219-231 pp.

Rostamzadeh, H., Ghaebi, H. and Parikhani, T., 2018, Thermodynamic and thermoeconomic analysis of a novel combined cooling and power (CCP) cycle, *Applied Thermal Engineering*, 139:474-487 pp.

Saloux, E., Sorin, M. and Teyssedou, A., 2019, Exergo-economic analyses of two building integrated energy systems using an exergy diagram, *Solar Energy*, 189:333-343 pp.

Santarelli, M. and Macagno, S., 2004, A thermoeconomic analysis of a PV-hydrogen system feeding the energy requests of a residential building in an isolated valley of the Alps, *Energy Conversion and Management*, 45(3):427-451 pp.

Schram, W.L., Lampropoulos, I. and Van Sark, W.G., 2018, Photovoltaic systems coupled with batteries that are optimally sized for household self-consumption: Assessment of peak shaving potential, *Applied Energy*, 223:69-81 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Selwynraj, A.I., Iniyan, S., Polonsky, G., Suganthi, L. and Kribus A.,** 2015, Exergy analysis and annual exergetic performance evaluation of solar hybrid STIG (steam injected gas turbine) cycle for Indian conditions, *Energy*, 80:414–427 pp.
- Shahsavari, A. and Rajabi, Y.,** 2018, Exergoeconomic and enviroeconomic study of an air based building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system, *Energy*, 144:877-886 pp.
- Sharma, V., Haque, M.H. and Aziz, S.M.,** 2019, Energy cost minimization for net zero energy homes through optimal sizing of battery storage system, *Renewable Energy*, 141:278-286 pp.
- Shaygan, M., Ehyaei, M.A., Ahmadi, A., Assad, M.E.H. and Silveira, J.L.,** 2019, Energy, exergy, advanced exergy and economic analyses of hybrid polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell and photovoltaic cells to produce hydrogen and electricity, *Journal of Cleaner Production*, 234:1082-1093 pp.
- Shubbak, M.H.,** 2019, Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115:109383 pp.
- Shukla, K.N., Rangnekar, S. and Sudhakar, K.,** 2015. Comparative study of isotropic and anisotropic sky models to estimate solar radiation incident on tilted surface: A case study for Bhopal, India, *Energy Reports*, 1:96-103 pp.
- Singh, A., Sarkar, J. and Sahoo, R.R.,** 2020, Experimentation on solar-assisted heat pump dryer: Thermodynamic, economic and exergoeconomic assessments, *Solar Energy*, 208:150-159 pp.
- Solarbaba, 2019a.** “TÜBA – Güneş Enerjisi Teknolojileri Raporu”, <https://www.solarbaba.com.tr/wp-content/uploads/bilgi039-gunes-teknolojileri-raporu.pdf> (Erişim tarihi: 15 Ekim 2019)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Solarbaba, 2019b.** “Türkiye Güneş Enerjisi Toplam Kurulu Gücü”, <https://www.solarbaba.com.tr/turkiye-gunes-enerjisi-toplam-kurulu-gucu/> (Erişim tarihi: 15 Ekim 2019)
- SSB,** “SBL-200-12i – Bataryaya Ait Teknik Özellikler” https://www.battery-kutter.de/main/en/categories_name-c-0/ssb-sbl-200-12i-p-15261 (Erişim tarihi: 10 Şubat 2019).
- Stanek, W., Simla, T. and Gazda, W.,** 2019, Exergetic and thermo-ecological assessment of heat pump supported by electricity from renewable sources, *Renewable Energy*, 131:404-412 pp.
- Su, W., Li, H., Sun, B., Li, S. and Zhang, X.,** 2019, Performance investigation on a frost-free air source heat pump system employing liquid desiccant dehumidification and compressor-assisted regeneration based on exergy and exergoeconomic analysis, *Energy Conversion and Management*, 183:167-181 pp.
- Sundaram, S. and Babu, J.S.C.,** 2015, Performance evaluation and validation of 5 MWp grid connected solar photovoltaic plant in South India, *Energy Conversion and Management*, 100:429-439 pp.
- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM),** İllerimize ait resmi istatistikler, <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=H&m=IZMIR> (Erişim tarihi: 25 Eylül 2020).
- Talavera, D.L., Muñoz-Rodriguez, F.J., Jimenez-Castillo, G. and Rus-Casas, C,** 2019, A new approach to sizing the photovoltaic generator in self-consumption systems based on cost-competitiveness, maximizing direct self-consumption. *Renewable Energy*, 130:1021-1035 pp.
- Talent, O. and Du, H.,** 2018, Optimal sizing and energy scheduling of photovoltaic-battery systems under different tariff structures, *Renewable Energy*, 129:513-526 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tan, M. and Keçebaş, A.,** 2014, Thermodynamic and economic evaluations of a geothermal district heating system using advanced exergy-based methods, *Energy Conversion and Management*, 77:504-513 pp.
- Testo, 2019a.** “Technical Specification of Temperature and Relative Humidity Microprocessor Transmitters for Comfort Conditions – Type 6621”, <https://static-int.testo.com/media/17/4e/f86b57d96cc9/testo-6621-EN.pdf> (Erişim tarihi: 14 Şubat 2019)
- Testo, 2019b.** “Technical Specification of Temperature and Relative Humidity Microprocessor Transmitters for Comfort Conditions – Type 6681”, <https://media.testo.com/media/15/77/92e4abb490f9/testo-6681-6610-Vol2-Instruction-manual.pdf> (Erişim tarihi: 14 Şubat 2019)
- Testo, 2019c.** “Dijital manifolda ait teknik bilgiler – Tip 570-2”, <https://static-int.testo.com/media/86/ff/096395a37c9d/Manifoldpdfforweb.pdf> (Erişim tarihi: 14 Şubat 2019)
- Trading Economics, 2020.** “Inflation Rate (Forecast 2020-2022 for Europe)”, <https://tradingeconomics.com/forecast/inflation-rate?continent=europe> (Erişim tarihi: 10 Mayıs 2020)
- TRNSYS,** “An extremely flexible graphically based software environment used to simulate the behavior of transient system”, <http://www.trnsys.com> (Erişim tarihi: 17 Mart 2020)
- Tsatsaronis, G.,** 2007, Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics, *Energy*, 32(4):249-253 pp.
- Urbanucci, L. and Testi, D.,** 2019, Integration of reversible absorption heat pumps in cogeneration systems: Exergy and economic assessment, *Energy Conversion and Management*, 200:112062 pp.
- Vega-Garita, V., Hanif, A., Narayan, N., Ramirez-Elizondo, L. and Bauer, P.,** 2019, Selecting a suitable battery technology for the photovoltaic battery integrated module, *Journal of Power Sources*, 438:227011 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Voloshchuk, V., Gullo, P. and Sereda, V.,** 2020, Advanced exergy-based performance enhancement of heat pump space heating system, *Energy*, 117953.
- Wajs, J., Golabek, A., Bochniak, R. and Mikielwicz, D.,** 2020, Air-cooled photovoltaic roof tile as an example of the BIPVT system—An experimental study on the energy and exergy performance, *Energy*, 117255.
- Wang, C., Gong, G., Su, H. and Yu, C.W.,** 2015a, Efficacy of integrated photovoltaics-air source heat pump systems for application in Central-south China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49:1190-1197 pp.
- Wang, C., Gong, G., Su, H. and Yu, C.W.,** 2015b, Dimensionless and thermodynamic modelling of integrated photovoltaics–air source heat pump systems, *Solar Energy*, 118:175-185 pp.
- Wang, D., Liu, Y., Kou, Z., Yao, L., Lu, Y., Tao, L. and Xia, P.,** 2019, Energy and exergy analysis of an air-source heat pump water heater system using CO₂/R170 mixture as an azeotropy refrigerant for sustainable development, *International Journal of Refrigeration*, 106:628-638 pp.
- Wang, X., Xia, L., Bales, C., Zhang, X., Copertaro, B., Pan, S. and Wu, J.,** 2020, A systematic review of recent air source heat pump (ASHP) systems assisted by solar thermal, photovoltaic and photovoltaic/thermal sources, *Renewable Energy*, 146:2472-2487 pp.
- Wang, Z., Xiong, W., Ting, D.S.K., Carriveau, R. and Wang, Z.,** 2016, Conventional and advanced exergy analyses of an underwater compressed air energy storage system, *Applied Energy*, 180:810-822 pp.
- Wu, J., and Wang, N.,** 2020, Exploring avoidable carbon emissions by reducing exergy destruction based on advanced exergy analysis: A case study, *Energy*, 118246.
- Wu, W. and Skye, H.M.,** 2018, Net-zero nation: HVAC and PV systems for residential net-zero energy buildings across the United States, *Energy Conversion and Management*, 177:605-628 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM), “Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)”, <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/> (Erişim tarihi: 15 Ekim 2019)

Yingli Solar, “YL250P-29L – Çoklu Kristalin SFV Panele Ait Teknik Özellikler” <http://www.solarbrasil.com.br/images/solarbrasil/downloads/yingli-modulo-255w.pdf> (Erişim tarihi: 9 Şubat 2019)

Zeb, K., Uddin, W., Khan, M.A., Ali, Z., Ali, M.U., Christofides, N. and Kim, H.J., 2018, A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94:1120-1141 pp.

Zhang, H. L., Baeyens, J., Degève, J. and Cacères, G., 2013, Concentrated solar power plants: Review and design methodology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22:466-481 pp.

Zhao, B. Y., Zhao, Z. G., Li, Y., Wang, R. Z. and Taylor, R. A., 2019, An adaptive PID control method to improve the power tracking performance of solar photovoltaic air-conditioning systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113:109250 pp.

Zhao, B.Y., Li, Y., Wang, R.Z., Zhao, Z.G. and Taylor, R.A., 2018, A universal method for performance evaluation of solar photovoltaic air-conditioner, *Solar Energy*, 172:58–68 pp.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresi boyunca kıymetli görüşlerini hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanlarım Sn. Prof. Dr. Hüseyin Günerhan ve Sn. Prof. Dr. Arif Hepbaşlı'ya, Porto Üniversitesi'nde bulunduğum süre zarfında nümerik çalışmaların gerçekleştirilmesinde büyük katkıları olan Sn. Dr. Szabolcs Varga ve Sn. Prof. Dr. Armando Carlos Figueiredo Coelho De Oliveira'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim. Tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Ali Güngör ve Prof. Dr. Aytunç Erek'e tez çalışmasına koydukları bilimsel katkılarından ötürü şükranlarımı sunarım. Ayrıca, TÜBİTAK 3001 "Başlangıç Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı [Proje no:215M016]" projesi ile deneysel çalışmaların ve TÜBİTAK 2214-A "Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı" bursu ile nümerik çalışmaların yürütülmesi kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından sağlanan finansal destekten ötürü kuruma sonsuz teşekkürlerimi sunar, minnetlerimi arz ederim. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi sırasında teknik destek veren Sn. İsmail Yüzbaşıoğlu'na, Webasto Thermo Comfort İklimlendirme Sis. Tic. Ltd. Şti.'ne ve işletmede teknik müdür olarak görev yapan Makine Y. Mühendisi Gökhan Özcanlı'ya teşekkürlerimi sunarım. Doktora çalışmaları boyunca desteğini tereddütsüz esirgemeyen ve bu zorlu süreci çok yüksek anlayışla karşılayan sevgili eşim Latife Özcan'a da sonsuz teşekkür ederim. Hayatım boyunca maddi ve manevi yanımda olan, bana güvenen, her zaman varlığının bana güç verdiği aile büyüklerime, anneme, babama, kardeşime ve tüm dostlarıma şükranlarımı sunarım.

22 / 09 / 2020

Hüseyin Günhan Özcan

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılı Bodrum doğumludur. 2009 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. 2012 yılında ise Anadolu Üniversitesi İşletme Bölümünden mezun olmuştur. Yüksek lisans çalışmasını Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Termodinamik programında 2013 yılında tamamlamıştır ve aynı yıl doktora öğrenimine yine aynı programda başlamıştır. SAFKAR A.Ş.'de Raylı Sistemler ve Özel Projeler Bölümünde Araştırma ve Geliştirme Mühendisi olarak 2,5 yıl çalışmasının ardından Yaşar Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak 2014 yılında çalışmaya başlamış ve halen bu görevini sürdürmektedir. 2019 Eylül-2020 Eylül arasında TÜBİTAK 2214-A “Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı” ile Porto Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde misafir araştırmacı olarak bulunmuştur. Lisansüstü çalışmaları boyunca TÜBİTAK TEYDEB 1501, TÜBİTAK 3001, SANTEZ, BAP, vb. birçok farklı projede araştırmacı ve/veya bursiyer olarak çalışmıştır. 5’i SCI, 2’si SCOPUS olmak üzere 9 adet uluslararası endekslerde taranan makalesi ve 10 ulusal, 13 uluslararası olmak üzere 23 konferans/sempozyum bildirisi mevcuttur (12 tanesine sözlü sunum ile katılmıştır). Uluslararası dergilere hakemlik yapmakta olan Hüseyin Günhan Özcan etkili bir şekilde İngilizce ve başlangıç seviyesinde Portekizce ve Almanca bilmekte olup, 2017 yılından beri evlidir. Temel araştırma alanları temiz enerji teknolojileri, HVAC sistemleri, soğutucu akışkanlar ve solar soğutma olup bu sistemlerin modellenmesi ile ileri termodinamik açıdan incelenmesi konusunda uzmanlaşmıştır.

TEZ ÇIKTILARI

Ulusal/Uluslararası Enkdeslerde Taranan Makaleler

- Ozcan H.G., Gunerhan H., Yildirim N. and Hepbasli A. (2019) “A comprehensive evaluation of PV electricity production methods and life cycle energy-cost assessment of a particular system”, Journal of Cleaner Production, Vol.238:117883. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.117883. **(Basıldı)**.
- Bilir L., Ozcan H.G., Yildirim N. ve Gunerhan H. (2020) “Rüzgâr türbini ile fotovoltaik panellerin karşılaştırılması: Ege Üniversitesi-İzmir örneği”, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, Vol.11(3):1061-1072. DOI: 10.24012/dumf.620774. **(Basıldı)**.
- Ozcan H.G., Varga S., Gunerhan H. and Hepbasli A. (2020) “Numerical and experimental work to assess dynamic advanced exergy performance of an on grid PV-air source heat pump-battery system”, Energy Conversion and Management, Vol.227:113605. DOI:10.1016/j.enconmen.2020.113605. **(Basıldı)**.
- Ozcan H.G., Varga S., Gunerhan H. and Hepbasli A. (2020) “Numerical Simulation and Parametric Study of Various Operational Factors Affecting a PV-Battery-Air Conditioner System under Prevailing European Weather Conditions”, Sustainable Cities and Society. **(Revizyon aşaması)**.

Ulusal/Uluslararası Sözlü Sunum Bildirileri

- Ozcan H.G., Gunerhan H., Yildirim N. ve Hepbasli A. (2019) “Fotovoltaik destekli iklimlendirme sisteminin deneysel ve simülasyon çalışmaları ile incelenmesi” 8. Güneş Enerjisi Sempozyumu ve Sergisi (Mersin). **(Bildiri-sözlü sunum)**.
- Ozcan H.G., Gunerhan H., Yildirim N. and Hepbasli A. (2018) “Different parameters effect on solar aided air conditioning system based on real time experiments”, 3rd South East European Conference on Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems (Novi Sad - Serbia), Vol. Renewable Energy Sources 1, pp. 1- 11. (Special issue: Applied Energy). **(Bildiri-sözlü sunum)**.
- Ozcan H.G., Gunerhan H. ve Yildirim N. (2018) “FV panel grubuna ait elektrik üretiminin deneysel ve teorik olarak kıyaslanması” 4. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu (Edirne), Vol.2, pp. 1247-1255. **(Bildiri-sözlü sunum)**.

TEZ ÇIKTILARI (devam)

- Ozcan H.G., Gunerhan H., Yildirim N., Demirkiran G. and Aydin E.E. (2016) “A comparative study on thermal load calculation methods for a residential building”, 12th REHVA World Congress (Allborg-Denmark), Vol.6, paper 672. **(Bildiri-sözlü sunum)**.
- Demirkiran G., Ozcan H.G., Yildirim N. and Günerhan H. (2016) “Modelling and dynamic simulation of a thermal zone with solar aided air conditioner in summer”, 12th REHVA World Congress (Allborg-Denmark), Vol.3, paper 617. **(Bildiri-sözlü sunum)**.

