



T.C.
OSTİM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
İKTİSADİ VE İDARİ BİLİMLER FAKÜLTESİ
YÖNETİM BİLİŞİM SİSTEMLERİ BÖLÜMÜ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE YÜZEY KİRLİLİĞİNİN
ENERJİ ÜRETİMİNE ETKİSİ

MEZUNİYET PROJESİ

Vuslat DURSUN
[200103010]

PROJE DANIŞMANI

Dr. Öğr. Üyesi Melike Aktaş BOZKURT

Ankara , 2025

ÖZET

Bu çalışma, fotovoltaik (PV) sistemlerin performansı üzerinde etkili olan yüzey kirliliği sorununun enerji üretim verimliliğine olan etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Giderek artan enerji ihtiyacı ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına duyulan ilgi doğrultusunda, güneş enerjisi sistemlerinin kurulumları her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Ancak panellerin yüzeyinde zamanla biriken toz, kir, polen ve benzeri unsurlar, güneş ışığının hücrelere ulaşmasını kısıtlayarak sistemin üretim kapasitesinde kayıplara yol açmaktadır. Bu bağlamda, fotovoltaik sistemlerin gerçek verimlilik potansiyelini değerlendirebilmek için yüzey kirliliğinin etkilerinin nicel olarak analiz edilmesi gerekliliği doğmuştur.

Çalışma kapsamında saha verileri yerine, PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) platformu üzerinden elde edilen Ankara lokasyonuna ait yıllık üretim verileri esas alınmış ve bu verilere %0'dan %40'a kadar değişen sistem kaybı oranları uygulanarak dokuz ayrı senaryo oluşturulmuştur. Bu senaryolar sayesinde kirlilik seviyesinin üretim üzerindeki etkisi, aylık ve yıllık bazda değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, özellikle %10 ve üzerindeki sistem kaybı oranlarında üretimde belirgin azalmalar meydana geldiğini ortaya koymuş; bu da panel yüzey temizliğinin ihmal edilmemesi gereken kritik bir bakım süreci olduğunu göstermiştir.

Bu tezin amacı, enerji verimliliği bağlamında sıklıkla göz ardı edilen bir unsur olan yüzey kirliliğini odak noktasına alarak farkındalık oluşturmak ve bu durumun enerji sistemlerinin ekonomik ve işlevsel sürdürülebilirliği üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Fotovoltaik teknolojilerin daha verimli kullanılabilmesi için yalnızca donanımsal değil, aynı zamanda operasyonel düzeyde de iyileştirmelere ihtiyaç duyulduğu açıktır. Bu çalışma, PV sistem kullanıcıları, yatırımcılar ve bakım planlaması yapan teknik ekipler için pratik bir referans sunmayı hedeflemektedir.

Vuslat DURSUN

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik sistemler, Yüzey kirliliği, Enerji verimliliği, PVGIS, Güneş enerjisi

Mayıs, 2025

İÇİNDEKİLER TABLOSU

ÖZET	iii
GİRİŞ.....	1
LİTERATÜR TARAMASI	3
1. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI	6
1.1 TEMEL ENERJİ TÜRLERİ.....	6
1.2 KÜRESEL ENERJİ DAĞILIMI	7
1.3 TÜRKİYE'DEKİ DURUM	9
1.4 DÜNYA ÜLKELERİNDEKİ DURUM.....	10
1.4.1 Asya, Güneş ve Rüzgar Lideri.....	11
1.4.2 Avrupa Kıtası.....	11
1.4.3 Amerika Kıtası.....	12
1.4.4 Afrika ve Orta Doğu.....	12
1.4.5 G7 ve G20'nin Rolü.....	12
1.4.6 Yorum ve Değerlendirme	12
1.5 PARİS ANLAŞMASI VE İKLİM POLİTİKALARI.....	13
2. GÜNEŞ ENERJİSİ.....	14
2.1 GÜNEŞ ENERJİSİ NASIL ÇALIŞIR.....	14
2.2 GÜNEŞ ENERJİSİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI	15
2.3 GÜNEŞ ENERJİSİNİN GELECEĞİ	16
2.3.1 Dünya Ülkelerindeki Güneş Enerjisi Kullanım Oranları ve Hedefleri	18
2.3.2 Türkiye'deki Güneş Enerjisi Kullanım Oranları ve Hedefleri.....	18
3. GÜNEŞ PANELLERİNDE KİRLİLİK VE VERİMLİLİK İLİŞKİSİ.....	19
3.1 KİRLİLİK TÜRLERİ.....	19
3.2 KİRLİLİĞİN FV PANEL VERİMLİLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.....	21
3.2.1 Güneş Panellerinde Kirlilik ve Verimlilik İlişkisi.....	22
3.3 GÜNEŞ PANELİ TEMİZLİK ROBOTLARININ EKONOMİK VE TEKNİK DEĞERLENDİRİLMESİ.....	24
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	26
4.1 UYGULAMA ALANI VE YÖNTEM	26
4.1.1 PVGIS Platformunun Bilimsel Temeli ve Önemi.....	26
4.2 ÖLÇÜM VERİLERİ VE GRAFİKLER.....	27
4.3 VERİMLİLİK KARŞILAŞTIRMASI.....	29
4.3.1 %0 Sistem Kaybı.....	29
4.3.2 %5 Sistem Kaybı.....	30

4.3.3 %10 Sistem Kaybı	31
4.3.4 %15 Sistem Kaybı.....	32
4.3.5 %20 Sistem Kaybı.....	33
4.3.6 %25 Sistem Kaybı	34
4.3.7 %30 Sistem Kaybı.....	35
4.3.8 %35 Sistem Kaybı	36
4.3.9 %40 Sistem Kaybı.....	37
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	38
KAYNAKÇA	40

ŞEKİLLER TABLOSU

ŞEKİL 1 ÜLKELERE GÖRE KİŞİ BAŞINA DÜŞEN YENİLENEBİLİR ENERJİ YATIRIMI (2022 YILI VERİLERİ).....	10
ŞEKİL 2 AYLARA GÖRE KÜMÜLATİF KAZANÇ TABLOSU	25
ŞEKİL 3 KİRLİLİK ORANLARINA GÖRE YILLIK ÜRETİM VE KAYIPLAR.....	27
ŞEKİL 4 KİRLİLİK ORANLARINA GÖRE YILLIK ÜRETİM VE GELİR KAYBI İLİŞKİSİ	28
ŞEKİL 5 %0 SİSTEM KAYBI ENERJİ ÜRETİM VERİSİ	29
ŞEKİL 6 %5 SİSTEM KAYBI ENERJİ ÜRETİM VERİSİ	30
ŞEKİL 7 %10 SİSTEM KAYBI ENERJİ ÜRETİM VERİSİ.....	31
ŞEKİL 8 %15 SİSTEM KAYBI ENERJİ ÜRETİM VERİSİ	32
ŞEKİL 9 %20 SİSTEM KAYBI ENERJİ ÜRETİM VERİSİ	33
ŞEKİL 10 %25 SİSTEM KAYBI ENERJİ ÜRETİM VERİSİ	34
ŞEKİL 11 %30 SİSTEM KAYBI ENERJİ ÜRETİM VERİSİ	35
ŞEKİL 12 %35 SİSTEM KAYBI ENERJİ ÜRETİM VERİSİ	36
ŞEKİL 13 %40 SİSTEM KAYBI ENERJİ ÜRETİM VERİSİ	37

GİRİŞ

Enerji, günümüzde hem bireysel yaşamın sürdürülebilirliği hem de toplumsal kalkınmanın temel yapı taşlarından biri olarak kritik bir rol oynamaktadır. Dünya nüfusu hızla artarken, sanayileşmenin ciddi düzeyde ivmelenmesi, kentleşme oranının yükselmesi ve dijitalleşmenin hızla yaygınlaşması, enerjiye duyulan ihtiyacın her geçen yıl katlanarak artmasına sebep olmaktadır.

Günümüzde ev içi yaşıntıdan, tarım uygulamalarına, ulaşım sistemleri ve sanayi sektörüne kadar her kulvar enerjiye bağımlı durumdadır. Enerjiye duyulan bağımlılık düzeyindeki bu ihtiyaçlar; enerjinin üretim süreçlerine ek olarak, enerjinin hangi yollarla sağlandığını da tartışma konusu haline getirmiştir.

Enerji talebinin çarpıcı biçimde artması, doğaya daha fazla müdahale edilmesini ve kaynakların agresif kullanımını beraberinde getirmektedir. Enerji üretiminin yol açtığı; su kaynaklarının kirletilmesi, orman tahribatları ve buna bağlı olarak gelişen biyolojik çeşitliliğin zarar görmesi gibi çevresel sorunlar toplumu adeta geri dönüşü olmayan karanlık bir tünele sürüklemektedir. İnsanoğlu yüzlerce yıl, kendi çıkarları uğrunda doğal kaynakları kontrolsüzce kullanmış; uzun vadede doğacak çevresel risklerin tamamını göz ardı ederek ekoloji üzerinde geri dönüşü mümkün olmayan tahribatlar yaratmıştır.

Artan enerji talebinin karşılanabilmesi için kullanılan geleneksel enerji kaynakları yani fosil yakıtlar (petrol, doğalgaz ve kömür), kısa vadede yüksek verimlilik sunmalarına karşın uzun vadede sürdürülebilirlik bakımından sorun teşkil etmektedir. Fosil yakıtların yanması sonucu oluşan CO₂ ve diğer sera gazları atmosferde birikerek gaz bariyerlerinin artmasına neden olarak küresel ısınmaya ve buna bağlı olarak 21. Yüzyılın temel sorunlarından biri olan iklim değişikliğine yol açmaktadır. Bunların yanı sıra fosil yakıtlar sınırlı rezerv sahiptir ve giderek tükenmektedir.

Enerji, sadece üretim ve tüketimle sınırlı bir kavram değil; toplumların tarihsel gelişiminde belirleyici rol oynayan temel bir aktördür. Günümüz şartlarında ekonomik gelişmenin devamlılığının sağlanması, sürekli enerji erişimi yolundan geçer. Enerjinin fosil yakıtlarla veya yenilenebilir enerjiyle sağlanması ekosistem üzerinde belirli olumsuzluklar doğurmayacağı anlamına gelmez. Bu durum, doğal dengenin korunarak gelecek nesillere aktarılabilmesi adına; enerjinin, önceki dönemlere nazaran daha özenli kullanılması gerektiğinin altını çizmektedir. Bu temele dayanan “sürdürülebilir enerji” çevresel duyarlılık temelinde geliştirilen ve uluslararası seviyede kabul gören bir kavram haline gelmiştir. (Öymen, G. 2022, s. 1070)

Bu kapsamda; enerji üretimi ve tüketimi konularında alternatif çözüm arayışı her geçen gün önemini artırmaktadır. Sürdürülebilir enerji arayışı çerçevesinde güneş, rüzgar, hidroelektrik, jeotermal gibi düşük emisyonlu yenilenebilir enerji sistemleri, fosil yakıtların karşısında güçlü bir alternatif sistemler olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışma, yenilenebilir enerji kaynakları arasında; ev tipi, küçük, orta ve büyük ölçekli sanayi kuruluşları, tarımsal ve hatta yüzer sistemlere kadar geniş ölçeklere yayılmış “Güneş Enerji Sistemleri(GES)”nin verimliliğini etkileyen çevresel faktörleri incelemektedir.

Çoğunlukla şehirden uzak ve açık alanlara konumlandırılan güneş panelleri, zamanla biriken toz, kuş pisliği, çamur, yaprak, fabrika atıkları, polen vb. gibi faktörler nedeniyle kirlenir ve bu da enerji üretiminde düşüşe sebebiyet vermektedir. Konuyla ilgili araştırma çıktıları ele alınarak; bahsi geçen kirlilik türlerinin enerji üretimi üzerindeki negatif etkileri analiz edilerek, GES’in etkinliğinin korunmasına yönelik temizlik ve bakım stratejilerine yönelik öneriler sunulmuştur.

Çalışma, GES yatırımlarının sürdürülebilirliğini artırmak ve bu sayede kullanım ömrünün uzatılması açısından dikkate alınması gereken unsurların altını çizmeyi amaçlamaktadır.

LİTERATÜR TARAMASI

Sulaiman ve diğerleri. (2014), bulgularında; Fotovoltaik (FV) sistemlerin performansını yalnızca panellerin yapısı, konumlandırılış biçimi değil aynı zamanda çevresel koşullara bağlı faktörler de etkilemektedir. Özellikle panellerin yüzeyinde biriken kirletici maddeler—toz, yosun, kuş pisliği ve kum—güneş ışığının hücrelere ulaşmasını engelleyerek sistemin üretim kapasitesini düşürebilmektedir. Yapılan bir çalışmada toz ve kirlenmenin FV sistemlerin üretim performansını %85 oranında düşüreceği tespit edilmiştir.

Dorobantu ve diğerleri. (2011) çalışmalarında; FV Paneller üzerinde oluşan kirliliğin, fotovoltaik hücreler üzerindeki olumsuz etkilerini ele almıştır. Bu tür kirleticilerin, panel yüzeyinde homojen olmayan dağılımlar sergilediğinden belirli hücreleri olumsuz etkilediği bunun da enerji üretiminde performans kaybına neden olduğu saptanmıştır. Ek olarak yapılan deneylerde; bölgesel kirlenmelerin FV Paneller üzerinde gölge etkisi yaratıp, hot-spot(sıcaklık artışına) sebep olduğu gözlemlenmiştir. Tüm bu çıktılar, panel yüzeyindeki kirliliğin sadece ışık geçirgenliğini azaltmakla kalmayıp, panellerin ısı dengesini bozarak daha karmaşık verim kayıplarına yol açtığı sonucuna varılmıştır.

Rajput ve diğerleri. (2013) gerçekleştirdikleri deneyler ışığında; FV Panellerde toz birikiminin sistem performansı üzerinde ciddi düzeyde düşüş yaşanmasındaki önemli faktörlerden biri olduğu sonucuna varmıştır. Yapılan araştırmalarda, üzerinde toz bulunmayan (temiz) panellerde maksimum verimin %6,38, minimum verimin %2,29 olduğu raporlanmıştır. Diğer taraftan; üzeri tozla kaplanmış (kirli) panellerde maksimum verimin %0,64, ölçülen minimum verimin ise %0,33 olduğu raporlanmıştır. Bu bulgular ışığında; tozun (kirliliğin) FV modülün gücünde %92,11, verimlilikte ise %89'luk bir kayba neden olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, Rajput ve çalışma arkadaşları(2013); kirlilikten kaynaklı verim kaybının önlenmesi adına otomatik temizlik sistemlerinin kullanılmasının çözüm niteliğinde bir öneri olarak sunmuştur.

Ahmed ve diğerleri. (2012), derleme çalışmalarında; tozun fotovoltaik sistem performansı üzerindeki etkilerini çok boyutlu şekilde ele almışlardır. Çalışmalarında, yalnızca tozun varlığı değil; parçacıkların boyutu, şekli, elektrostatik özellikleri ve biyolojik yapısının da panel yüzeyine tutunma düzeyi açısından önemli rol oynadığını vurgulamışlardır. Araştırmada; yüzey eğimi, kurulum yüksekliği, hâkim rüzgâr yönü, modül tipi gibi çevresel ve fiziksel

parametrelerin toz birikimini doğrudan etkileyen değişkenler olduğu ifade edilmiştir. Bu çok katmanlı değişkenlerin, fotovoltaik panellerdeki verim kaybını hem doğrudan hem de dolaylı olarak etkilediği ve bu nedenle sistem tasarımı aşamasında detaylı analiz gerektirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Mani ve arkadaşları. (2010), fotovoltaik sistemler üzerine yapılan toz temelli çalışmaları inceleyerek, bu alandaki araştırma eksikliklerine ve zorluklara dikkat çekmişlerdir. Derlemelerinde; çevresel koşullara, iklimsel farklılıklara ve kurulum bölgesine göre değişen toz birikiminin, enerji üretim performansı üzerindeki etkilerinin oldukça karmaşık bir yapıya sahip olduğunu vurgulamışlardır. Yaptıkları değerlendirmede, sistemlerin maksimum verimle çalışabilmesi için bölgeye özgü bakım ve temizlik döngülerinin tanımlanması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca, mevcut literatürün büyük kısmında kullanılan yöntemlerin birbirinden farklı olması nedeniyle, sonuçların doğrudan karşılaştırılabilir olmamasının, bu alanda standartlaştırılmış deneysel protokollerin eksikliğine işaret ettiği sonucuna ulaşılmıştır.

Fotovoltaik (FV) sistemlerin performansı, panel yüzeyinde biriken toz, kir ve diğer kirleticilerin neden olduğu ışık geçirgenliğinin azalmasıyla doğrudan etkilenmektedir. Bu birikim, güneş ışığının panel hücrelerine ulaşmasını engelleyerek enerji üretiminde kayıplara yol açar. Kabir ve arkadaşları (2025) tarafından yapılan güncel bir çalışmada, panel yüzeyinde biriken tozun görünür ışığın %55'ine kadarını engelleyebileceği ve haftalık temizlik uygulamasıyla enerji üretiminde %3'e kadar artış sağlanabileceği raporlanmıştır. Aynı çalışmada ayrıca, düzenli temizliğin panel yüzeyinde ısı birikimini azalttığı ve modül ömrünü uzattığı da belirtilmektedir. Temizlik işlemlerinin yalnızca verim artışı sağlamakla kalmadığı, aynı zamanda panelin ekonomik sürdürülebilirliğine katkı sunduğu; yani uzun vadede bakım maliyetlerini düşürerek sistemin toplam geri dönüş süresini kısalttığı vurgulanmaktadır (Kabir et al., 2025). Bu bulgular, düzenli temizlik ve bakım uygulamalarının yalnızca öneri değil, yüksek verimlilik hedefleyen tüm FV sistemler için temel bir zorunluluk olduğunu ortaya koymaktadır.

Fotovoltaik sistemlerde verim kaybına neden olan başlıca dışsal faktörlerden biri, panel yüzeyinde zamanla biriken toz, polen ve diğer partiküllerdir. Özellikle kurak ve tozlu bölgelerde yer alan sistemlerde, bu kirleticiler ışık geçirgenliğini düşürerek elektrik üretim kapasitesinde ciddi azalmalar yaratmaktadır. National Renewable Energy Laboratory (2023) tarafından gerçekleştirilen saha gözlemlerinde, doğal yağışın özellikle polen gibi biyolojik

kirlilikleri temizlemede yetersiz kaldığı; buna karşın düzenli temizlik uygulamalarının enerji üretimini %35'e kadar artırabildiği rapor edilmiştir. Bu bulgular, yüzey kirliliğinin yalnızca geçici bir sorun değil, sistemin uzun vadeli performansını doğrudan etkileyen sürekli bir tehdit olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde Al-Shamisi ve Al-Hinai (2022), fotovoltaik sistemlerde temizlik tekniklerine odaklandıkları kapsamlı derlemelerinde, haftalık temizlik yapılmayan bölgelerde panel verimliliğinde %20'ye varan kayıplar yaşanabildiğini aktarmışlardır. Araştırmacılar, temizlik sıklığı ve yöntemi gibi operasyonel kararların, sistemin coğrafi konumuna ve kirlenme yoğunluğuna göre belirlenmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Tüm bu çalışmalar, panel temizliğinin yalnızca görsel iyileştirme sağlamadığını; aynı zamanda üretim kapasitesini yükselttiğini, panel ömrünü uzattığını ve bakım maliyetlerini düşürerek sistemin genel sürdürülebilirliğine katkı sağladığını ortaya koymaktadır (National Renewable Energy Laboratory, 2023; Al-Shamisi & Al-Hinai, 2022).

1. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

1.1 TEMEL ENERJİ TÜRLERİ

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğal döngüler içinde sürekli olarak kendini yenileyebilen, tükenme riski taşımayan ve çevresel etkileri minimum düzeyde olan enerji üretim türleridir. Bu kaynaklar; güneş, rüzgar, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle, dalga ve gel-git enerjisi olarak sınıflandırılmaktadır (Bağcı, 2019). Her bir enerji türü, gerek üretim teknolojisi gerekse çevresel ve ekonomik etkileri açısından farklılık göstermektedir.

Güneş enerjisi, en yaygın ve potansiyeli en yüksek yenilenebilir kaynaklardan biridir. Fotovoltaik paneller ve termal sistemler aracılığıyla elektrik ve ısı üretiminde kullanılmaktadır. Türkiye gibi yıllık ortalama 2.737 saat güneşlenme süresine sahip ülkelerde güneş enerjisi sistemleri ciddi bir avantaj sağlamaktadır (Koç & Şenel, 2013). IRENA'nın 2023 verilerine göre, dünya genelinde güneş enerjisi kurulu gücü 1.177 GW'a ulaşmış, yıllık büyüme oranı %24 olmuştur (IRENA, 2023).

Rüzgar enerjisi, özellikle kıyı bölgelerinde yüksek verimlilik sunan, yatırım maliyeti görece düşük, sürdürülebilir bir enerji türüdür. Türkiye'nin 2023 yılı itibarıyla rüzgar enerjisi kurulu gücü 12 GW'ı aşmış olup, toplam elektrik üretiminin %11'ini karşılamaktadır (TSKB, 2023). Rüzgar türbinleri ile elde edilen enerji, fosil yakıtlara göre %90 daha az karbon salımı ile çevresel etkileri minimize etmektedir (Torunoğlu Gedik, 2015).

Hidroelektrik enerji ise, özellikle gelişmekte olan ülkelerde uzun süredir yaygın kullanılan bir kaynaktır. Büyük baraj sistemleriyle suyun potansiyel enerjisinden yararlanılarak elektrik üretilir. Türkiye'nin hidroelektrik potansiyeli yaklaşık 216 milyar kWh olarak tahmin edilmektedir (SHURA, 2024). Ancak, hidroelektrik santrallerin yerleşim yerlerini etkilemesi ve ekosistem üzerinde baskı oluşturmaları gibi çevresel eleştiriler de bulunmaktadır (Bağcı, 2019).

Jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerinden gelen sıcak su ve buhar kullanılarak ısıtma ve elektrik üretiminde değerlendirilir. Türkiye, jeotermal kaynak zenginliği bakımından Avrupa'da ilk sıralarda yer almaktadır ve 2023 yılı itibarıyla 1.7 GW'lık kurulu güce sahiptir (IRENA, 2023). Özellikle konut ısıtmasında düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır (Koç & Şenel, 2013).

Biyokütle enerjisi, tarım atıkları, hayvansal artıklar, orman ürünleri ve kentsel organik atıklardan elde edilen enerji türüdür. Karbon nötr olması nedeniyle özellikle iklim değişikliğiyle mücadelede öne çıkan bir enerji kaynağıdır. Ancak Türkiye’de bu alandaki potansiyelin henüz yeterince değerlendirilemediği ve 2023 itibarıyla toplam elektrik üretimindeki payının %1’in altında kaldığı bildirilmektedir (TSKB, 2023).

Son olarak, dalga ve gel-git enerjisi gibi deniz kaynaklı enerji türleri henüz Türkiye’de ticari anlamda kullanılmasa da, gelişmiş ülkelerde Ar-Ge yatırımları artmaktadır. Özellikle Kuzey Avrupa ülkeleri, bu alandaki yatırımlarla enerji bağımsızlığını artırmayı hedeflemektedir (IRENA, 2023).

1.2 KÜRESEL ENERJİ DAĞILIMI

Dünya genelinde enerji talebi son otuz yılda sürekli bir artış eğilimi göstermiştir. 1990’lı yıllardan itibaren enerji tüketiminin neredeyse iki katına çıkması, sanayileşme, kentleşme ve dijitalleşme gibi toplumsal dönüşümlerle doğrudan bağlantılıdır. Elektrik tüketimi özelinde bu artış %60’ı aşarken, bu talep büyümesi sadece üretim kapasitelerini değil, kaynak tercihlerini de dönüştürmüştür (Hasanuzzaman, Zubir, Ilham, & Che, 2017, s. 2–5). Fosil yakıtların çevresel zararları ve arz güvenliği açısından taşıdığı riskler, ülkeleri sürdürülebilir enerji arayışına yöneltmiştir. Özellikle güneş ve rüzgar gibi düşük karbon salımı olan kaynaklar, enerji politikalarının merkezine yerleşmiştir (Hasanuzzaman et al., 2017, s. 6).

Bu dönüşümün somut göstergelerinden biri, 2024 yılında dünya genelinde yenilenebilir enerji kurulu gücünün 4.448 GW’a ulaşmasıdır. Bu büyümenin neredeyse tamamı (%96.6) yalnızca güneş ve rüzgar kaynaklarından gelmiştir. Güneş enerjisinde 452 GW, rüzgar enerjisinde ise 113 GW’lık artış kaydedilmiştir (IRENA, 2025). Aynı yıl içerisinde gerçekleşen toplam artışın %72’si Asya kıtasında toplanmış, bunun da yaklaşık %88’i yalnızca Çin tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu oranlar, yalnızca teknolojik ilerlemeyi değil, aynı zamanda bölgesel kalkınma stratejilerini de ortaya koymaktadır.

Güneş enerjisi bu büyümenin ana unsuru hâline gelirken, düşük işletme maliyetleri, ölçeklenebilir yapısı ve düşen sistem fiyatları, bu teknolojiyi birçok ülke için erişilebilir ve cazip kılmaktadır (Allouhi, Rehman, Buker, & Said, 2022, s. 1–3). Çin ve Hindistan gibi ülkeler yalnızca tüketici değil aynı zamanda üretici pozisyonlarını güçlendirmiş, bu alanda küresel

liderliğe oynamaya başlamıştır. Ancak bu eğilim yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda jeopolitik bir boyut da taşımaktadır. Çünkü enerji sistemlerini yenilenebilir kaynaklarla çeşitlendirmek, ülkelerin dışa bağımlılıklarını azaltarak enerji arz güvenliğini güçlendirmektedir (Johansson, 2013, s. 598).

Kurulu kapasitenin kaynaklara göre dağılımına bakıldığında, 2024 yılında toplam kapasitenin %42'sinin güneş, %29'unun hidroelektrik, %25'inin rüzgar ve %4'ünün biyokütle, jeotermal ve diğer kaynaklardan oluştuğu görülmektedir (IRENA, 2025). Bu kompozisyon, yalnızca teknolojik yönelimi değil; aynı zamanda politika önceliklerini, ekonomik kapasiteyi ve finansal erişilebilirliği de yansıtmaktadır. Örneğin, Avrupa ülkeleri güneş ve rüzgar projelerini çevresel taahhütler doğrultusunda yönlendirirken, gelişmekte olan ülkeler daha çok uluslararası fonlar ve kalkınma ajansları aracılığıyla bu dönüşümü gerçekleştirmeye çalışmaktadır (Hasanuzzaman et al., 2017, s. 7–8; Allouhi et al., 2022, s. 5–6).

Amerika Birleşik Devletleri'nde uygulanan piyasa odaklı teşvik mekanizmaları, enerji yatırımlarının özel sektör öncülüğünde şekillenmesine yol açmıştır. Federal ve eyalet düzeyindeki vergi indirimleri, güneş enerjisi yatırımlarını bölgesel farklılıklarla birlikte desteklemektedir (Allouhi et al., 2022, s. 6). Öte yandan, Afrika ve Orta Doğu gibi yüksek potansiyele sahip coğrafyalar ise altyapı eksiklikleri, finansal sürdürülebilirlik sorunları ve politik tutarsızlık nedeniyle bu kaynakları yeterince değerlendirememektedir (IRENA, 2025; Allouhi et al., 2022, s. 5).

Yenilenebilir enerjiye geçiş sürecinde sadece kurulum miktarları değil, aynı zamanda sistemlerin uzun vadeli sürdürülebilirliği de önem arz etmektedir. Bu bağlamda, gelişmiş ülkelerdeki fotovoltaik yatırımlar yalnızca enerji üretimine değil, aynı zamanda hücre verimliliğini artırma, ömür uzatma ve geri dönüşüm çözümleri gibi Ar-Ge çalışmalarına da yönelmektedir (Allouhi et al., 2022, s. 7–8).

Son olarak, enerji güvenliği perspektifiyle bakıldığında, yenilenebilir enerji yatırımları ülkelerin stratejik bağımsızlığını güçlendiren bir araç olarak öne çıkmaktadır. Avrupa ülkeleri, sınır ötesi elektrik ağları ve ortak enerji pazarları kurarak arz güvenliğini yalnızca ulusal değil bölgesel ölçekte de sağlamlaştırmayı amaçlamaktadır (Johansson, 2013, s. 603). Bu doğrultuda enerji dönüşümü sadece çevreci bir hamle değil; aynı zamanda jeopolitik dengeyi yeniden şekillendiren, ekonomik kalkınmayı destekleyen ve sosyal refahı sürdürülebilir kılan çok boyutlu bir stratejiye dönüşmektedir (Johansson, 2013, s. 604–605).

1.3 TÜRKİYE'DEKİ DURUM

Türkiye'nin enerji politikaları son yıllarda yalnızca ekonomik kalkınma hedeflerine değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik, enerji arz güvenliği ve iklim değişikliği ile mücadele çerçevesinde yeniden şekillenmektedir. 2023 yılı itibarıyla ülkenin toplam kurulu gücü yaklaşık 106 GW düzeyine ulaşmış, bu kapasitenin %55'i yenilenebilir kaynaklardan sağlanmıştır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [ETKB], 2023). Aynı yıl içerisinde devreye alınan 2,9 GW'lık yeni kapasitenin %99,5'i yenilenebilir enerji kaynaklı olup, en büyük pay 1,9 GW ile güneş enerjisine aittir (IRENA, 2025).

Güneş ve rüzgâr gibi kaynaklara dayalı yatırımların artışı, Türkiye'nin 2035 yılına kadar yenilenebilir enerji kurulu gücünü %65'e çıkarma hedefiyle paralellik göstermektedir (ETKB, 2023). Ancak bu büyüme salt niceliksel olarak değerlendirilmemeli; çevresel sürdürülebilirlik, geri dönüşüm altyapısı ve teknoloji bağımsızlığı bağlamında da ele alınmalıdır. Birtürk ve Çeliktaş'ın (2023) ortaya koyduğu analizde, Türkiye'nin 2050 yılına kadar ulaştırmayı planladığı güneş enerjisi kurulu gücü nedeniyle yaklaşık 1,7 milyon tonluk PV modül atığı oluşabileceği belirtilmiştir. Bu veriler, mevcut yatırım politikalarının yanında modül geri dönüşüm stratejilerinin de geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Kurulu güç dağılımına bakıldığında, 2024 yılı itibarıyla hidroelektrik %29,7, güneş %11,5, rüzgâr %11,1, jeotermal %1,6 ve biyokütle ile diğer kaynaklar %2,5 oranındadır (IRENA, 2025). Türkiye'nin güneşlenme süresi açısından sahip olduğu avantaj, 2.737 saat/yıl gibi yüksek bir değerle desteklenmektedir (Koç & Şenel, 2013). Bununla birlikte, panel verimliliğini düşüren tozlanma, bakım maliyetleri ve altyapı eksiklikleri gibi teknik sorunlar hâlen çözüm beklemektedir (Birtürk & Çeliktaş, 2023)."

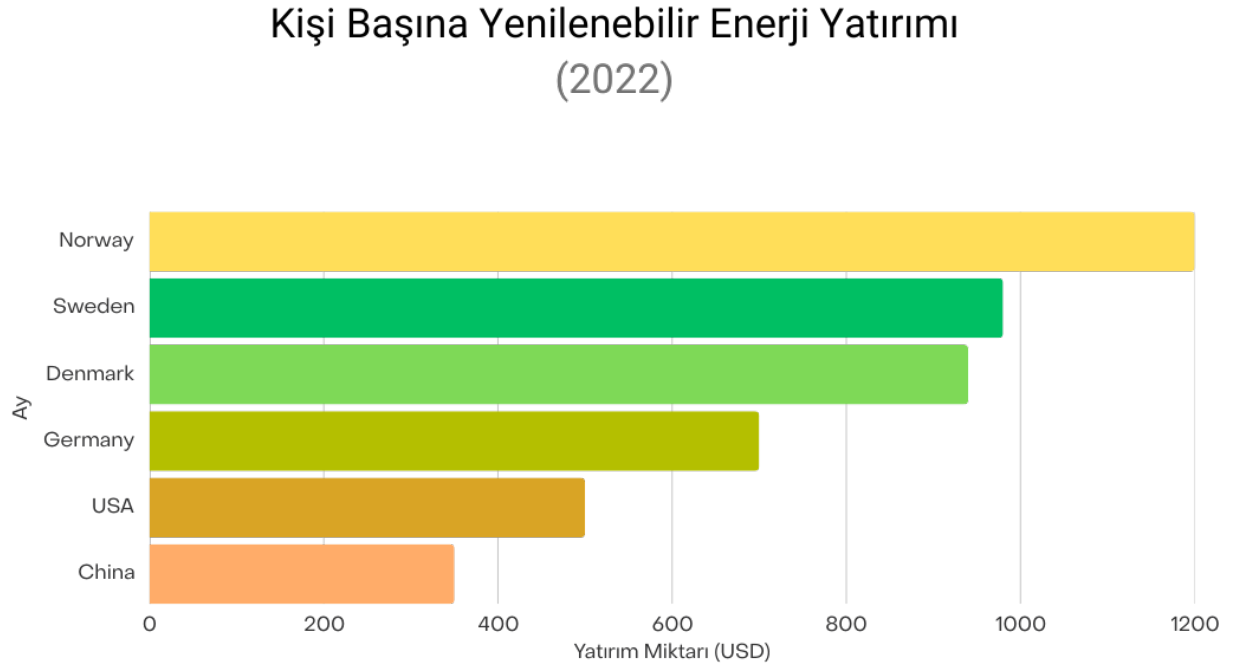
2024 Şubat itibarıyla Türkiye'de toplam 17.866 elektrik üretim santrali faaliyet göstermekte olup, bunların 15.780'i güneş enerjisi santralidir (ETKB, 2023). Bu oran, fotovoltaik teknolojilerin ülke genelinde ne denli hızlı yayıldığını göstermekte; ancak bu yayılımın çevresel yükünü de beraberinde getirmektedir. Çalışmalar, fotovoltaik sistemlerin yalnızca kurulum ve üretim süreçleriyle değil, aynı zamanda yaşam döngüsü yönetimi ile de değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Birtürk & Çeliktaş, 2023).

1.4 DÜNYA ÜLKELERİNDEKİ DURUM

Yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımlar, ülkelerin ekonomik kapasitesine ve enerji dönüşümüne verdiği stratejik önceliğe göre ciddi farklılıklar göstermektedir. Bu durum, yalnızca toplam üretim değil, aynı zamanda kişi başına düşen yatırım miktarları üzerinden de değerlendirilebilmektedir.

2022 yılı verilerine göre, Norveç kişi başına yaklaşık 1200 dolar ile dünya genelinde en yüksek yenilenebilir enerji yatırımına sahip ülke olmuştur. Norveç'i sırasıyla İsveç (980 \$) ve Danimarka (940 \$) takip etmektedir. Bu üç ülke, yalnızca teknolojik gelişmişlik açısından değil, aynı zamanda çevreci kamu politikaları ve toplumsal bilinç düzeyiyle de ön plana çıkmaktadır (Zhao et al., 2024, s. 8–9).

Aşağıdaki grafik, 2022 yılı itibarıyla kişi başına yapılan yenilenebilir enerji yatırım miktarlarını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır:



Şekil 1 Ülkelere Göre Kişi Başına Düşen Yenilenebilir Enerji Yatırımı (2022 yılı verileri)

Grafikten açıkça görüleceği üzere, Almanya (700 \$) ve ABD (500 \$) gibi ülkeler, yatırım hacmi yüksek olmasına rağmen, kişi başına düşen miktarda İskandinav ülkelerinin gerisinde kalmaktadır. Bu fark, söz konusu ülkelerde enerji yatırımlarının daha geniş nüfuslara yayılması, bütçe öncelikleri ve toplumsal enerji talepleri ile açıklanabilir.

Çin ise yenilenebilir enerji alanında dünyanın en büyük üreticilerinden biri olmasına karşın, kişi başına yatırım miktarı açısından listenin sonunda yer almakta; 2022 yılında bu değer yalnızca 350 dolar olarak hesaplanmıştır. Bu durum, Çin'in yüksek nüfus yoğunluğu ve merkezi teşvik politikalarının kişi başı dağılıma etkisi bağlamında değerlendirilebilir (Zhao et al., 2024). Sonuç olarak, kişi başına düşen yenilenebilir enerji yatırımı, yalnızca ekonomik bir gösterge değil, aynı zamanda ülkelerin sürdürülebilir enerjiye geçişteki kararlılığını, halkın bu politikaya katılım düzeyini ve stratejik önceliklerini de yansıtan çok boyutlu bir ölçüttür. Bu tür göstergeler, enerji politikalarının sosyo-ekonomik etkilerini anlamak açısından da kritik öneme sahiptir.

Yenilenebilir enerji, küresel enerji dönüşümünün temel dinamiği hâline gelmiş; özellikle 2024 yılı itibarıyla tarihin en büyük kapasite artışı gerçekleştirilmiştir. IRENA'nın 2025 verilerine göre, dünya genelindeki toplam yenilenebilir enerji kurulu gücü 4.448 GW'a ulaşmış ve bunun %53,6'sı yalnızca Asya bölgesinde yer almaktadır.

1.4.1 Asya, Güneş ve Rüzgar Lideri

Çin, 2024 yılında yalnız başına 373,6 GW kapasite artışı ile küresel artışın %64'ünü gerçekleştirmiştir. Bu artışın büyük kısmı güneş (278 GW) ve rüzgar (79,9 GW) enerjisi kaynaklıdır. Hindistan ve Güney Kore gibi ülkeler de güneş enerjisi kapasitesini ciddi ölçüde artırarak Asya kıtasını bu dönüşümün merkezine yerleştirmiştir. Bu bölgelerdeki büyüme, yalnızca kaynak bolluğundan değil; aynı zamanda teknolojiye erişim, devlet teşvikleri ve üretim altyapılarının yerli firmalarca kontrol edilmesinden kaynaklanmaktadır.

1.4.2 Avrupa Kıtası

Avrupa 2024 yılında toplamda 70.1 GW kapasite eklemiş, Almanya ise bunun 18,8 GW'lık kısmını tek başına karşılamıştır. Avrupa ülkeleri, enerji dönüşümünü sadece elektrik üretimi değil, aynı zamanda karbon nötrlük hedefleri, enerji verimliliği, kamu bilinçlendirme politikaları ve sınır ötesi elektrik ağlarıyla birlikte yürütmektedir.

1.4.3 Amerika Kıtası

Kuzey Amerika'da özellikle ABD, 2024 yılında 38,3 GW güneş ve 5,1 GW rüzgar kapasitesi ekleyerek yatırımlarını artırmıştır. Bu yatırımlar, federal düzeydeki vergi teşvikleri ve eyalet politikalarıyla desteklenmiştir. Güney Amerika ise toplamda 22,4 GW'lık artışla yükseliş trendini sürdürmekte, bu artışta Brezilya öncü rol üstlenmektedir.

1.4.4 Afrika ve Orta Doğu

Afrika kıtası, Mısır, Güney Afrika ve Etiyopya gibi ülkelerin öncülüğünde 4.2 GW kapasite eklemiştir. Ancak toplam küresel payı hâlen %1,5 seviyesindedir. Orta Doğu'da ise Suudi Arabistan 3.3 GW'lık katkının yarısından fazlasını sağlamış ve bölgesel yatırımların öncüsü konumuna gelmiştir. Bu bölgelerde yaşanan temel sorunlar; altyapı eksikliği, finansal sürdürülebilirlik ve politik istikrarsızlık olarak öne çıkmaktadır.

1.4.5 G7 ve G20'nin Rolü

G20 ülkeleri, 2024'te gerçekleşen kapasite artışlarının %90,3'ünü üstlenmiş, toplamda 3.601 GW kapasiteye ulaşmıştır. G7 ülkeleri ise 1.055 GW ile küresel toplamın %23,7'sini oluşturmuştur. Küresel yenilenebilir enerji yatırımlarının büyük kısmı hâlen sınırlı sayıda ülke tarafından gerçekleştirilmektedir.

1.4.6 Yorum ve Değerlendirme

Veriler açıkça göstermektedir ki, enerji dönüşümü küresel ölçekte hızla ilerlemektedir; ancak bu ilerleme oldukça asimetriktir. Çin gibi ülkeler üretim ve kurulumda liderliği üstlenirken, İskandinav ülkeleri kişi başına yatırım miktarında zirvededir. Gelişmiş ülkelerde teknolojik yenilik ve regülasyon ön plandayken, gelişmekte olan ülkelerde finansal destek mekanizmaları ve uluslararası fonlar belirleyici olmaktadır. Yenilenebilir enerji dönüşümü, yalnızca kaynakların teknik potansiyeliyle değil; aynı zamanda siyasi kararlılık, sosyal uyum, ekonomik kapasite ve uluslararası işbirliği düzeyiyle şekillenmektedir. Her ülkenin enerji politikası, bu çok boyutlu yapıyı dikkate alarak geliştirilmek zorundadır.

1.5 PARİS ANLAŞMASI VE İKLİM POLİTİKALARI

Küresel iklim değışikliğı, 21. yüzyılın en ciddi çevresel tehditlerinden biri olarak değerdendirilmektedir. Bu tehdit karşısında uluslararası toplumun en önemli yanıtı, 2015 yılında Paris’te imzalanan ve 2016’da yürürlüğe giren Paris Anlaşması olmuştur. Anlaşma; küresel ortalama sıcaklık artışını 2°C’nin altında sınırlamayı ve mümkünse 1,5°C ile sınırlandırmayı hedeflemektedir (Zhao et al., 2024, s. 2).

Paris Anlaşması’nın en dikkat çekici yönlerinden biri, her ülkenin kendi belirlediğı “ulusal katkı beyanı” (Nationally Determined Contributions – NDC) aracılığıyla gönüllü ancak sistematik bir iklim politikası uygulamasına yönlendirilmesidir. Bu yaklaşım, bağlayıcı üst sınırlar yerine şeffaflık, hesap verebilirlik ve ilerlemeyi izlemeye dayalı dinamik bir model sunmaktadır (Zhao et al., 2024, s. 3).

Anlaşmanın küresel etkisi, yalnızca emisyon azaltım stratejilerinde değil, aynı zamanda enerji, sanayi ve finans sektörlerinde de dönüşüme yol açmıştır. Avrupa Birliğı 2050 yılına kadar karbon nötr olma hedefini açıklarken; ABD, Paris Anlaşması’na yeniden katılarak 2030’a kadar emisyonlarını 2005 seviyelerine göre %50 oranında azaltmayı taahhüt etmiştir (Zhao et al., 2024, s. 5).

Türkiye ise Paris Anlaşması’nı Ekim 2021’de TBMM’de onaylamış, ardından 2053 yılı için net sıfır emisyon hedefini açıklamıştır. Bu hedef doğrultusunda yayımlanan 2022 Türkiye Ulusal Enerji Planı’nda; 2030 yılına kadar emisyonların referans senaryoya göre %41 azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının %65’e çıkarılması, enerji verimliliğinin artırılması ve karbon piyasası mekanizmalarının kurulması gibi hedefler belirlenmiştir (ETKB, 2022, s. 18–21).

Öymen ve Ömeroğlu (2020), Türkiye’nin Paris Anlaşması kapsamındaki politikalarının, Avrupa Birliğı ile enerji müktesebatına uyum süreciyle doğrudan ilişkili olduğunu ifade etmektedir. Yazarlar, özellikle karbon vergisi, emisyon ticaret sistemi (ETS) ve sınırda karbon düzenlemesi gibi mekanizmaların, Türkiye’deki enerji üretiminde hem maliyet yapısını hem de teknolojik tercihi dönüştürebileceğini belirtmektedir (Öymen & Ömeroğlu, 2020, s. 1075–1079).

Bununla birlikte, Zhao ve arkadaşları (2024), anlaşmanın yalnızca bir çevre protokolü olmanın ötesinde, küresel enerji yönetişimini yeniden şekillendiren bir yapı sunduğunu vurgulamaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, Paris Anlaşması teşvikleriyle birlikte

teknoloji transferi, kapasite geliştirme ve yeşil finansman uygulamalarının yaygınlaştığı görülmektedir (Zhao et al., 2024, s. 6–8).

Bu çerçevede Paris Anlaşması, enerji politikalarının yalnızca teknik ve ekonomik parametrelerle değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik, toplumsal sorumluluk ve uluslararası yükümlülüklerle birlikte yeniden inşa edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler için bu dönüşüm, yalnızca bir iklim uyum süreci değil; aynı zamanda küresel enerji sistemine entegrasyon, rekabetçi düşük karbon ekonomisine geçiş ve dış finansman mekanizmalarına erişim açısından stratejik bir fırsat alanı sunmaktadır. Dolayısıyla Paris Anlaşması'nın uygulanması, yalnızca çevresel hedeflerin gerçekleştirilmesini değil, aynı zamanda enerji güvenliği, ekonomik çeşitlenme ve diplomatik konumlanma gibi çok katmanlı hedeflerin eş zamanlı olarak yönetilmesini zorunlu kılmaktadır.

2. GÜNEŞ ENERJİSİ

2.1 GÜNEŞ ENERJİSİ NASIL ÇALIŞIR

Güneş enerjisi, fotovoltaiik (PV) paneller aracılığıyla doğrudan ışıınım enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesine dayanan bir teknolojidir. Bu dönüşüm, güneş ışıınlarının yarı iletken bir malzeme ile etkileşerek elektrik akımı oluşturmaları şeklinde gerçekleşir. Söz konusu yarı iletken malzeme çoğunlukla silisyum olup, gelen fotonların enerji düzeyleri yeterli olduğunda bu malzemedeki elektronlar uyarılır ve hücre içinde serbestçe hareket etmeye başlar. Bu elektron akışı, elektrik üretimini sağlar (U.S. Department of Energy, 2023).

Bir PV sistemi temel olarak üç ana bileşenden oluşur: güneş panelleri, inverter (çevirici) ve bazı sistemlerde enerji depolama birimi. Güneş panelleri, ışığı emerek doğru akım (DC) üretir. Ardından inverterler, bu enerjiyi şebekeye uyumlu olan alternatif akıma (AC) dönüştürür. Eğer sistem off-grid (şebekeden bağımsız) yapıdaysa, enerji bataryalarda depolanabilir. Şebekeye bağılı sistemlerde ise üretilen elektrik anında tüketilir veya şebekeye aktarılır (U.S. Energy Information Administration, 2023).

Fotovoltaiik hücrelerin yapısında genellikle n-tipi ve p-tipi yarı iletken katmanlar yer alır. Güneş ışığı bu katmanlar arasındaki potansiyel fark aracılığıyla elektrik akımı oluşturur. Her

bir hücre, bu fiziksel olayı gerçekleştirmek için tasarlanmıştır. Çok sayıda hücre bir araya getirilerek bir paneli oluşturur (American Chemical Society, 2014).

PV paneller yapısal olarak birkaç katmandan oluşur. En üstte, dış koşullara dayanıklı temperli cam yer alır. Bu cam, güneş ışığını geçirirken paneli fiziksel hasarlardan korur. Onun altında, fotovoltaiik hücrelerin yer aldığı ve ışığın elektrik enerjisine çevrildiği aktif katman bulunur. Bu hücreleri çevreleyen EVA (etilen vinil asetat) tabakalar, nem ve dış etkilerden koruma sağlar. En altta ise reflektör ya da arka koruma tabakası yer alır (National Renewable Energy Laboratory, 2023).

Kullanılan hücre türüne göre verimlilik ve maliyet değişiklik gösterebilir. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan teknolojiler monokristal ve polikristal hücrelerdir. Monokristal paneller yüksek verimlilik sunarken maliyet açısından daha yüksektir. Polikristal paneller ise daha düşük verimlilikle birlikte daha uygun fiyat avantajı sağlamaktadır. Bu iki teknoloji dışında ince film hücreler de esnek yüzeyler için alternatif çözüm sunmaktadır (EnergySage, 2024).

Güneş enerjisi sistemlerinin performansını etkileyen dışsal faktörler de vardır. Panelin yönü, eğim açısı, yerel iklim koşulları ve çevresel kirleticiler (toz, polen, kuş pisliği, endüstriyel kalıntılar) sistemin üretim kapasitesini düşürebilir. Bu nedenle panel yüzeyinin düzenli aralıklarla temizlenmesi ve sistemin bakımının yapılması gereklidir (NREL, 2023).

2.2 GÜNEŞ ENERJİSİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

Güneş enerjisi, temiz enerji üretiminin temel aktörlerinden biri hâline gelmiş, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin gerçekleştirilmesinde önemli bir araç olarak öne çıkmıştır. Fosil yakıtlara bağımlılığı azaltma potansiyeli, düşük karbon salımı ve yerli kaynaklarla enerji üretimi imkânı gibi özellikleri, güneş enerjisini özellikle enerji güvenliği açısından stratejik kılmaktadır (Zhou, 2021, s. 480). Fotovoltaiik (PV) sistemlerin kurulumu nispeten kolaydır; modüler yapıları sayesinde farklı ölçeklerde uygulanabilmekte ve bu da bireysel kullanıcıdan büyük sanayiye kadar geniş bir uygulama alanı yaratmaktadır (Kumar, 2020, s. 3).

Güneş enerjisi sistemlerinin en büyük avantajlarından biri, çevresel etkilerinin son derece sınırlı olmasıdır. Elektrik üretimi sırasında zararlı gaz salımı gerçekleştirmemesi, su tüketiminin

düşük olması ve gürültü oluşturmaması gibi faktörler, bu teknolojiyi özellikle kentleşmiş bölgelerde cazip kılmaktadır. Ayrıca PV sistemlerin işletme ve bakım maliyetleri oldukça düşüktür; sistemler çalışırken hareketli parçalar içermediği için arıza oranları da nispeten azdır (Saidur, 2009, s. 185).

Buna karşın, güneş enerjisinin bazı sınırlılıkları da bulunmaktadır. Öncelikle, güneş ışığının doğal olarak kesintili olması, enerji üretiminin gece ve bulutlu havalarda aksamasına neden olmaktadır. Bu durum, enerji sürekliliği açısından güvenilir bir yedekleme veya enerji depolama sisteminin gerekliliğini doğurur (Zhou, 2021, s. 483). Ayrıca PV panellerin üretimi sırasında kullanılan bazı malzemeler (örneğin kurşun, kadmiyum) çevresel atık riski yaratmakta, bu da geri dönüşüm politikalarının önemini artırmaktadır (Saidur, 2009, s. 189).

Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, sistem kurulum maliyetleri gelişmiş ülkelerde ciddi oranda düşmüş olsa da, gelişmekte olan ülkelere hâlâ yüksek düzeydedir. Ayrıca güneşlenme süresi düşük olan bölgelerde yatırımın geri dönüş süresi uzayabilmektedir (Koç, 2021, s. 127). Teknik açıdan ise; panel yerleşimi, yönü, eğimi, çevresel tozlanma ve gölgeleme gibi birçok etken üretim verimliliğini doğrudan etkileyebilmektedir (Yılmaz, 2020, s. 9).

Bununla birlikte, teknolojik gelişmeler bu dezavantajları azaltma yönünde önemli kazanımlar sunmaktadır. Örneğin, gelişmiş invertör teknolojileri sayesinde sistem verimliliği artırılmakta; panel temizliğine yönelik otomasyon sistemleri, dışsal verim kayıplarını sınırlamaktadır. Ayrıca hibrit sistemlerin (örneğin güneş + rüzgar) yaygınlaşmasıyla enerji arzının istikrarsızlığı kısmen bertaraf edilmektedir (Kumar, 2020, s. 5).

2.3 GÜNEŞ ENERJİSİNİN GELECEĞİ

Küresel ölçekte artan enerji ihtiyacına paralel olarak, sürdürülebilir ve düşük karbon salımlı enerji kaynaklarına geçiş kaçınılmaz hâle gelmiştir. Bu dönüşüm sürecinde güneş enerjisi, sahip olduğu teknolojik esneklik, ekonomik erişilebilirlik ve çevresel avantajlar nedeniyle enerji politikalarının merkezine yerleşmiştir. Özellikle 21. yüzyılın ikinci çeyreğinde, güneş enerjisinin geleceği yalnızca teknik gelişmelerle değil, aynı zamanda stratejik, ekonomik ve sosyo-politik faktörlerle şekillenmektedir (Nijssse et al., 2023, s. 3).

Güneş enerjisi teknolojilerinde yaşanan maliyet düşüşü, bu kaynağın yaygınlaşmasını önemli ölçüde hızlandırmıştır. MIT tarafından yayımlanan kapsamlı bir raporda belirtildiği üzere, fotovoltaik sistemlerin kurulum maliyetlerinde son on yılda %70'e varan bir azalma yaşanmış; bu da özellikle gelişmekte olan ülkeler için yatırım yapılabilirliği artırmıştır (MIT Energy Initiative, 2015, s. 8). Aynı raporda, mevcut teknolojilerin verimlilik sınırlarına ulaşmak üzere olduğu, bu nedenle yeni nesil hücre teknolojilerine (örneğin perovskit ve tandem hücreler) yönelimin kritik bir rol oynayacağı vurgulanmaktadır.

Ancak güneş enerjisi geleceği yalnızca teknolojiyle değil, aynı zamanda sistem entegrasyonu, enerji depolama ve altyapı planlamasıyla da doğrudan ilişkilidir. Yoğun güneşlenmeye sahip coğrafyalarda dahi, gece saatlerinde veya bulutlu günlerde üretimin durması gibi sorunlar, güneş enerjisi üretimini istikrarsız kılabilmektedir. Bu noktada, gelişmiş batarya teknolojileri ve şebeke destekli hibrit sistemler, güneş enerjisinin gelecekteki başarısı açısından belirleyici olacaktır (Nijse et al., 2023, s. 5).

Türkiye özelinde değerlendirildiğinde, güneş enerjisi geleceği oldukça umut verici bir potansiyel barındırmaktadır. Ülkenin coğrafi konumu, yıllık ortalama güneşlenme süresinin yüksekliği ile birleştiğinde; hem bireysel hem de merkezi düzeyde yapılacak yatırımların önünü açmaktadır. Kapluhan (2014), Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi durumunda, yalnızca enerji arz güvenliği açısından değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ve kırsal kalkınma açısından da önemli kazanımlar elde edilebileceğini belirtmektedir (s. 48).

Bununla birlikte, Türkiye'de güneş enerjisinin geleceği için belirleyici olacak faktörler arasında yatırım teşvik mekanizmaları, mevzuat uyumu ve yerli teknoloji üretimi de yer almaktadır. 2010'ların başından itibaren kurulan santrallerin büyük kısmı dışa bağımlı bileşenlerle inşa edilmiştir. Ancak son yıllarda, yerli panel üretimi ve Ar-Ge merkezlerinin artırılmasıyla birlikte teknolojik bağımsızlık yönünde ciddi adımlar atılmaktadır (ElektrikPort, 2014). Bu eğilim, Türkiye'nin güneş enerjisinde yalnızca tüketici değil, aynı zamanda üretici ve ihracatçı ülke kimliğine doğru evrildiğini göstermektedir.

2.3.1 Dünya Ülkelerindeki Güneş Enerjisi Kullanım Oranları ve Hedefleri

Güneş enerjisi, küresel enerji dönüşüm sürecinin temel yapı taşlarından biri hâline gelmiş, enerji güvenliği ve karbon nötr hedeflerinin merkezinde konumlanmıştır. Özellikle 2020 sonrası dönemde dünya genelinde güneş enerjisine yapılan yatırımlar hızla artmış, birçok ülke 2030 ve 2050 yılına dönük iddialı kurulu güç hedeflerini benimsemiştir (International Solar Alliance [ISA], 2023, s. 4).

Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2024 tarihli küresel analizine göre, yenilenebilir enerji üretiminin toplam küresel elektrik arzındaki payı %30'u geçmiş olup, bunun üçte birinden fazlası yalnızca güneş enerjisinden sağlanmaktadır. Güneş enerjisinin öncüsü konumundaki Çin, 2023 yılında 230 GW'ı aşan kurulu güce ulaşarak tek başına dünya kapasitesinin yaklaşık %37'sini temsil etmiştir (IEA, 2024, s. 6). Avrupa Birliği'nde Almanya, İspanya ve Hollanda gibi ülkeler enerji portföylerinde güneşin payını artırırken; ABD'de federal ve eyalet düzeyindeki teşviklerle birlikte kurulu kapasite 155 GW seviyesini aşmıştır (ISA, 2023, s. 9).

Gelişmekte olan ülkelerde de güneş enerjisi yatırımları önemli bir ivme kazanmıştır. Hindistan, 2023 itibarıyla 73 GW'lık kurulu güce ulaşmış ve 2030 yılı için 280 GW hedefini ortaya koymuştur. Brezilya, Meksika, Güney Afrika gibi ülkelerde ise güneş enerjisi, hem merkezi sistemler hem de dağıtık üretim yoluyla yaygınlaştırılmaktadır (ScienceDirect, 2023). Bu ülkelerde güneş enerjisi, sadece enerji arzını çeşitlendirme aracı değil, aynı zamanda enerjiye erişim ve istihdam yaratma amacıyla da stratejik bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Bununla birlikte, ülkeler arasındaki gelişmişlik farkı, kurulu güçlerin dağılımında da belirgindir. Özellikle Sahra Altı Afrika ve bazı Orta Doğu ülkelerinde teknik potansiyel yüksek olmasına rağmen, finansal ve altyapısal sınırlılıklar nedeniyle hedeflere ulaşma oranı oldukça düşüktür (ISA, 2023, s. 13).

2.3.2 Türkiye'deki Güneş Enerjisi Kullanım Oranları ve Hedefleri

Türkiye, jeostratejik konumu ve yıllık ortalama 2.737 saatlik güneşlenme süresi ile güneş enerjisi potansiyeli yüksek ülkeler arasında yer almaktadır. Ancak bu yüksek potansiyele rağmen, uzun süre sınırlı teşvik ve regülasyonlarla ilerleyen güneş enerjisi yatırımları, özellikle 2016 sonrası dönemde hız kazanmıştır (Yüzer, 2023, s. 2).

Ember'in 2024 tarihli analizine göre Türkiye, son 2,5 yılda güneş enerjisi kurulu gücünü iki katına çıkararak 12,9 GW'a ulaşmış ve böylece 2025 yılına ait hedeflerini 1,5 yıl öncesinde gerçekleştirmiştir (Ember, 2024). 2035 hedefi ise oldukça iddialı: Ulusal Enerji Planı'nda yer alan bu hedef doğrultusunda, güneş enerjisinin elektrik üretimindeki payının %25'e yükseltilmesi ve toplam kapasitenin 53 GW'a çıkarılması beklenmektedir (Akgüç, 2023, s. 4).

Yüzer (2023), Türkiye'nin güneş enerjisi gelişimini üç temel döneme ayırmaktadır: 2005–2010 arası farkındalık dönemi; 2011–2015 arası ilk lisanslı projeler; ve 2016 sonrası hızlanan kurulumlar. Bu süreçte hem organize sanayi bölgelerinde hem de bireysel çatı uygulamalarında önemli artış yaşanmıştır. Yatırımların özellikle Güneydoğu ve İç Anadolu bölgelerinde yoğunlaştığı, kurumsal tüketicilerin lisanssız üretime yönelerek maliyet avantajı elde ettiği görülmektedir (Yüzer, 2023, s. 5).

Ancak bazı yapısal zorluklar da dikkat çekmektedir. GES yatırımlarında izin süreçlerinin karmaşıklığı, şebeke bağlantı sorunları ve bölgesel kapasite kısıtları, yatırımcıların kararlarını doğrudan etkilemektedir. Ayrıca yerleşme oranının artırılması, panel ve inverter üretiminde dışa bağımlılığın azaltılması Türkiye'nin uzun vadeli stratejik hedefleri arasında yer almaktadır (Akgüç, 2023, s. 7).

3. GÜNEŞ PANELLERİNDE KİRLİLİK VE VERİMLİLİK İLİŞKİSİ

3.1 KİRLİLİK TÜRLERİ

Güneş enerjisi sistemlerinin performansı, sadece kullanılan panel teknolojisi ve sistem tasarımı ile değil, aynı zamanda dış çevresel etkenlerle de doğrudan ilişkilidir. Bu çevresel etkenler arasında yer alan kirlilik türleri, fotovoltaik (PV) panellerin verimliliğini belirgin şekilde azaltan en önemli dışsal faktörlerden biridir. Özellikle toz, ince partikül maddeler (PM2.5), biyolojik birikimler, sanayi kaynaklı emisyonlar ve yağmur sonrası kireçli su lekeleri gibi kirleticiler, ışık geçirgenliğini düşürerek güneş ışınının hücrelere ulaşmasını engeller (Environmental Research Letters, 2020).

Toz birikimi, dünya genelinde PV panellerde gözlemlenen en yaygın kirlilik türlerinden biridir. Orta Doğu, Kuzey Afrika ve Güneydoğu Asya gibi yarı kurak ve tozlu bölgelerde yapılan saha çalışmaları, tozun panel yüzeyine homojen olmayan şekilde yapışarak gölgeleme etkisi

oluşturduğunu ve buna bağlı olarak sıcak nokta oluşumları (hot-spot) meydana geldiğini göstermiştir. Bu durum, hücre bazında ısı dengesiizlikler doğurarak hem kısa vadeli üretim kaybına hem de uzun vadeli panel ömrü ksalmasına neden olur (Journal of Engineering and Applied Science, 2021, s. 12–14).

Bir diğr önemli kirlilik türü ise atmosferde asılı bulunan ince partikül maddelerdir. Bu maddeler, güneş ışığını yansıtarak ve emerek hem gelen radyasyonu azaltmakta hem de panel yüzeyinde birikerek soiling (kirlenme) etkisi yaratmaktadır. ACS Environmental Au (2021) dergisinde yayımlanan bir çalışmada, Hong Kong’da yapılan ölçümler sonucunda, PM2.5 seviyesinin yüksek olduğı günlerde enerji üretiminde %25’e varan azalma gözlemlendiğı rapor edilmiştir. Bu etki, sadece görünür ışığın azalmasıyla değil, aynı zamanda ultraviyole ve kızılötesi spektrumların da absorbe edilmesiyle ilgilidir.

Kirlilik türleri sadece fiziksel partiküllerle sınırlı değildir. Kuş pisliğı, yosun, polen ve yaprak gibi biyolojik kökenli kalıntılar da özellikle nemli bölgelerde sorun teşkil eder. Bu tür kirleticiler, PV hücrelerinin belli bölgelerinde ışık akışını tamamen keserek, sistemde dengesiz enerji üretimine ve mikro-çatlaklara neden olabilir (Science of The Total Environment, 2020, s. 33). Ayrıca kireçli su ile yapılan temizlik işlemleri sonrasında oluşan mineralli kalıntılar da ışık geçirgenliğini azaltarak hücrelere ulaşan enerji miktarını düşürmektedir.

Spektral soiling etkisi, kirleticilerin yalnızca genel ışık miktarını değil, farklı dalga boylarındaki ışığın emilimini de değiştirebildiğini göstermektedir. Özellikle çoklu bağlantılı (multi-junction) PV sistemlerde, bu spektral kaymalar ciddi verim kayıplarına neden olabilir. Bu konuda yapılan deneysel çalışmalarda, bazı toz türlerinin kısa dalga boylarını daha fazla soğurduğı ve sistemin toplam enerji çıktısını %10’un üzerinde etkileyebildiğı belirtilmiştir (arXiv, 2021).

3.2 KİRLİLİĞİN FV PANEL VERİMLİLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan küresel yönelim, iklim değişikliğiyle mücadele, enerji arz güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu kaynaklar arasında yer alan güneş enerjisi, doğrudan elektrik üretimi sağlayan fotovoltaiik (FV) sistemler sayesinde giderek daha fazla tercih edilmektedir. Ancak bu sistemlerin performansı yalnızca teknolojik özelliklerine değil, aynı zamanda çevresel faktörlere de önemli ölçüde bağlıdır. Özellikle hava kirliliği, FV sistem verimliliği üzerinde doğrudan ve dolaylı etkilere sahiptir (Song et al., 2021).

Yapılan araştırmalar, hava kirliliğinin FV panellerin yüzeyine biriken toz, is, kurum ve kimyasal maddeler aracılığıyla ışının panellere ulaşmasını engellediğini ve bu nedenle elektrik üretiminde önemli kayıplar yaşandığını ortaya koymaktadır (Chaichan et al., 2024). Özellikle sanayi bölgelerine yakın kurulan FV sistemlerde, yıllık ortalamada %10 ila %30 arasında verim kaybı yaşanabilmektedir. Bu kayıplar, yalnızca ışığın absorpsiyonunun düşmesiyle değil, aynı zamanda panel yüzey sıcaklığının artması ve buna bağlı olarak termal verimin azalmasıyla da ilişkilidir (Chaichan et al., 2024).

Wang ve arkadaşlarının (2021) Hong Kong'da yürüttüğü kantitatif bir çalışmada, ince partikül madde (PM_{2.5}) seviyesindeki artışın doğrudan güneş ışığına olan geçirgenliği azalttığı ve bunun da FV sistemlerin performansını negatif yönde etkilediği gösterilmiştir. Özellikle PM_{2.5} seviyesindeki her 10 µg/m³'lük artış, FV sistemlerin günlük enerji üretiminde %1'in üzerinde düşüşe neden olmaktadır (Wang et al., 2021). Ayrıca bu partiküller, panel yüzeyine yapışarak uzun vadede temizlik ihtiyacını artırmakta ve bakım maliyetlerini yükseltmektedir.

Diğer yandan, hava kirliliği sadece fiziksel etkilerle sınırlı değildir; kimyasal kirleticiler de FV sistem performansı üzerinde yıkıcı etkilere sahiptir. Sultan ve arkadaşları (2025), ozon (O₃), azot dioksit (NO₂), kükürt dioksit (SO₂) ve karbon monoksit (CO) gibi gazların, panel yüzeyinde kimyasal bozulmalar meydana getirdiğini ve bu durumun cam geçirgenliğini azalttığını belirtmektedir. Bu etkiler, özellikle uzun süreli maruz kalma durumlarında panel yüzeyinde kalıcı hasar bırakmakta ve ışınım kayıplarını artırmaktadır (Sultan et al., 2025).

Konuya daha geniş bir perspektiften yaklaşan Song ve arkadaşları (2021), kirlenmenin fotovoltaiik sistem verimliliği üzerindeki etkilerini çok sayıda çalışmayı inceleyerek değerlendirmiştir. Derlemeye göre, panel verimindeki kayıplar %2 ile %80 arasında

değişmektedir ve bu kayıpların büyüklüğü; bölgenin iklim koşulları, panel eğimi, temizlik sıklığı ve kullanılan panel teknolojisi gibi birçok faktöre bağlıdır. Özellikle düzensiz temizlik yapılan panellerde toz birikimi daha hızlı olmakta ve bu durum zamanla üretim kapasitesini dramatik şekilde azaltmaktadır (Song et al., 2021).

Kentleşmenin yoğun olduğu bölgelerde ise sis (urban haze) etkisi devreye girmektedir. Peters ve arkadaşları (2018), Delhi ve Singapur gibi büyükşehirlerde yapılan ölçümlerde, sisli ve puslu havalarda FV panellerin enerji üretiminde %10 ila %20 arasında düşüş yaşandığını ortaya koymuştur. Bu durum, sadece kısa vadeli üretim kayıplarına değil, aynı zamanda uzun vadeli yatırım geri dönüş sürelerinin uzamasına da neden olmaktadır (Peters et al., 2018).

Yukarıda özetlenen çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, hava kirliliğinin FV sistem verimliliği üzerindeki etkilerinin çok boyutlu ve ciddi olduğu anlaşılmaktadır. Hem fiziksel hem de kimyasal kirlleticiler, panellerin ışık toplama kapasitesini azaltmakta ve termal verimi düşürmektedir. Bu nedenle, FV sistem kurulumu öncesinde yalnızca güneşlenme süresi değil, aynı zamanda hava kalitesi verilerinin de dikkate alınması gerekmektedir (Wang et al., 2021; Song et al., 2021).

Öte yandan, panel üretiminde kullanılacak kaplama teknolojilerinin kirlenmeye karşı dirençli olması, otomatik temizleme sistemlerinin yaygınlaştırılması ve düzenli bakım programlarının uygulanması; sistem verimliliğinin korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, yerel yönetimler ve enerji politikaları düzeyinde hava kirliliğiyle mücadeleyle yönelik alınacak önlemler, FV sistem yatırımlarının sürdürülebilirliği açısından da kritik rol oynayacaktır (Chaichan et al., 2024; Sultan et al., 2025; Peters et al., 2018).

3.2.1 Güneş Panellerinde Kirlilik ve Verimlilik İlişkisi

Güneş enerjisi sistemleri, enerji dönüşümünde temiz ve sürdürülebilir bir seçenek sunarken, performanslarının birçok dış etkene bağlı olarak dalgalandığı bilinmektedir. Özellikle açık alanda çalışan fotovoltaik (FV) paneller, çevresel kirlilik nedeniyle zamanla verim kaybına uğramaktadır. Bu duruma yol açan etkenler arasında toz birikimi, partikül kaynaklı ışık engellenmesi ve yüzeydeki kimyasal bozulmalar öne çıkmaktadır (Gholami et al., 2024).

Son dönemlerde yapılan dış ortam deneyleri, güneş panelleri üzerinde biriken tozların, ışığın doğrudan geçişini engellediğini ve bu durumun elektrik üretimini ciddi biçimde azalttığını

göstermektedir. Örneğin, İran'da yürütülen bir çalışmada toz birikiminin panel verimliliğini %35'e kadar düşürebildiği ortaya konmuştur (Gholami et al., 2024). Bu oran, özellikle panel temizliği düzenli yapılmayan bölgelerde çok daha dramatik sonuçlar doğurabilir.

Sadece fiziksel kirlenme değil, aynı zamanda panellerin yüzeyinde zamanla oluşan optik bozulmalar da enerji üretimini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu bozulmalar arasında en sık rastlananlar renk değişimi, cam yüzeydeki çizilmeler ve kaplamaların delaminasyonudur. Bu tür bozulmalar, ışığın soğurulma ve yönlendirilme şeklini değiştirerek, özellikle kısa dalga boyundaki ışının verimli kullanılmasını engellemektedir (Fernández-Solas et al., 2021).

Öte yandan kirlenme sadece fiziksel engeller oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda bakım maliyetlerini artırarak sistemlerin ekonomik sürdürülebilirliğini de tehdit eder. Bu bağlamda yapılan bir başka çalışmada, özellikle büyük ölçekli güneş enerjisi santrallerinde temizleme işlemleri için gereken su ve iş gücünün yüksek maliyet oluşturduğu belirtilmiştir. Bu durum, yalnızca kısa vadeli üretim düşüşüne değil, uzun vadede panel ömrünün de kısalmasına yol açmaktadır (Adekanbi et al., 2023).

Verimlilik kaybının öngörülebilir ve yönetilebilir olması için son yıllarda çeşitli matematiksel modeller de geliştirilmiştir. Picotti ve arkadaşları, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi tesislerinde kullanılan aynalı sistemler (heliostatlar) için toz birikimi kaynaklı yansıtma kayıplarını istatistiksel modellerle tahmin etmeye çalışmışlardır. Model sonuçları, düzenli bakım yapılmadığında enerji kayıplarının %25'e kadar çıkabileceğini ortaya koymuştur (Picotti et al., 2023).

Kirliliğin etkileri, özellikle çoklu bağlantılı (multi-junction) sistemlerde daha karmaşık hale gelmektedir. Bu tür panellerde, farklı katmanlar farklı dalga boylarını absorbe ettiğinden, yüzeydeki kirlenme spektral dengesizlik yaratabilir. Fernandez ve çalışma arkadaşları, bu dengesizliğin alt hücreler arasında akım uyumsuzluğuna yol açarak sistemin genel performansını sınırladığını tespit etmiştir (Fernandez et al., 2021).

Sonuç olarak, kirliliğin güneş panelleri üzerindeki etkileri sadece fiziksel değil, aynı zamanda ekonomik ve optik boyutları da içeren çok yönlü bir sorundur. Özellikle tozun etkisi altında çalışan panellerin daha sık temizlenmesi, yüzey koruyucu kaplamaların geliştirilmesi ve kirlenme tahmin modellerinin yaygınlaştırılması, sistemlerin uzun vadeli başarısı için kritik görünmektedir (Adekanbi et al., 2023; Gholami et al., 2024).

3.3 GÜNEŞ PANELİ TEMİZLİK ROBOTLARININ EKONOMİK VE TEKNİK DEĞERLENDİRİLMESİ

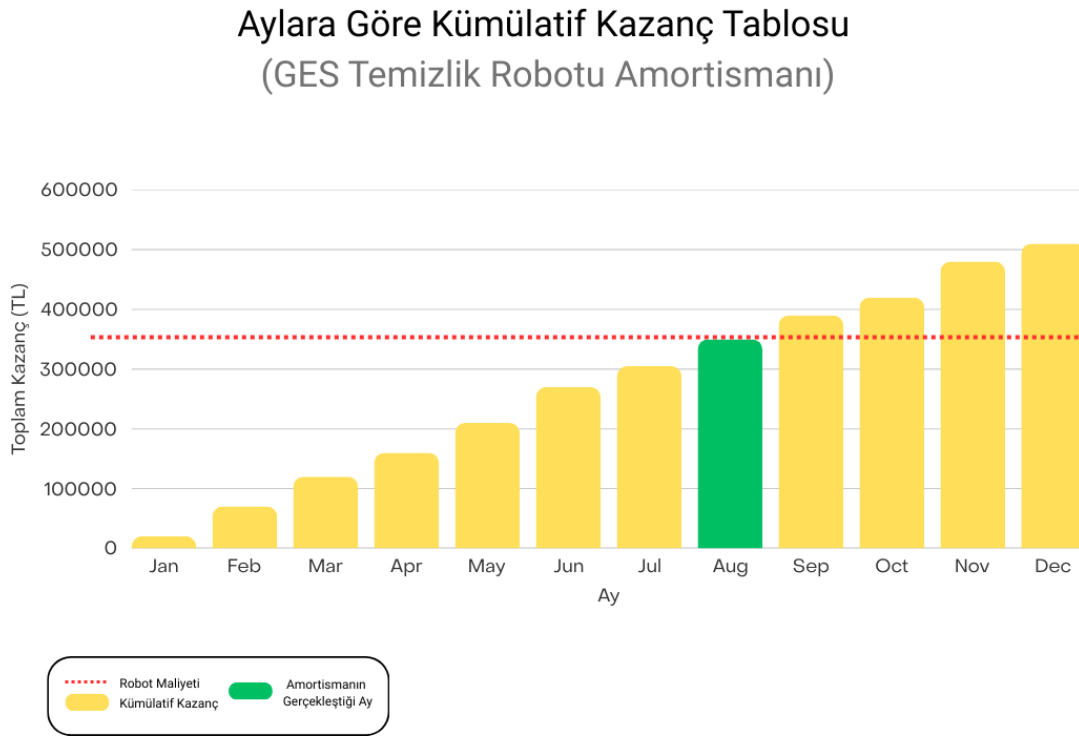
Güneş panellerinin etkinliğini sürdürülebilir kılmak ve verim kayıplarını önlemek için düzenli temizlik kritik öneme sahiptir. Özellikle çatı tipi fotovoltaik (PV) sistemlerde toz, kuş pisliği ve diğer çevresel kirleticilerin panel yüzeyinde birikmesi, ışıının emilimini azaltarak enerji üretiminde ciddi düşüöşlere neden olmaktadır (Sulaiman et al., 2014; Casanova et al., 2011). Bu sorunun çözümünde otomatik robotik temizleme sistemleri son yıllarda önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Paletli yapıdaki temizleme robotları, çatı tipi sistemlerin sınırlı alanlarına ve eğimlerine uyum sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Özellikle insan gücüyle yapılan manuel temizliklerin iş güvenliği riski taşıdığı bu sistemlerde robotik temizlik sistemleri hem daha güvenli hem de operasyonel açıdan daha sürdürülebilirdir (Al Shehri et al., 2016). Nitekim, geliştirilen paletli robot sistemlerinin panel yüzeyini çizmeden temizlik yapabildiğı, temizliğin ardından panelin ışık geçirgenliğinde artış gözleendiğı belirlenmiştir (Akyazı et al., 2019).

Öte yandan manuel temizlik uygulamaları, yalnızca zaman ve iş gücü açısından değil, aynı zamanda güvenlik ve panel sağlığı açısından da ciddi riskler barındırmaktadır. Temizlik sırasında çalışan personelin yüksek çatı eğimlerinde çalışması, elektriksel bileşenlerle temas riski ve hava koşullarına bağlı dengesizlikler, çarpılma veya düşme gibi tehlikeleri artırmaktadır. Bu durum, hem iş sağlığı ve güvenliği açısından hem de işletme sorumluluğı bakımından önemli bir zafiyet oluşturmaktadır. Ayrıca, manuel temizlikte kullanılan bez, fırça veya su püskürtme sistemlerinin kontrolsüz basınç uygulaması, panel yüzeyinde mikron düzeyinde çiziklere neden olabilmektedir. Bu çizikler, kısa vadede fark edilmese de, zamanla panelin ışık geçirgenliğini azaltarak performansını düşürebilir ve üretici garantisini geçersiz kılacak hasarlara yol açabilir. Bu tür mikro hasarlar birikerek sistemin genel verimliliğini azaltmakta ve yapılan büyük yatırımın uzun vadede zarar görmesine neden olabilmektedir.

Yapılan saha araştırmalarına göre, temizlenmeyen panellerin yıllık verim kaybı %20 ila %35 arasında değişmekte olup, bu oran özellikle kurak bölgelerde ve çatı sistemlerinde daha da artabilmektedir (Dorobantu et al., 2011; Kazem et al., 2013). Ortalama bir 1 MW'lık çatı tipi PV sisteminde bu oran yıllık bazda 250.000 TL'ye kadar üretim kaybına yol açabilmektedir.

Paletli bir robotun ortalama piyasa maliyeti yaklaşık 350.000 TL olarak öngörülmektedir. Sistemin yıllık bakım masrafları düşük seviyededir ve enerji tüketimi ihmal edilebilir düzeydedir. Bu bağlamda, düzenli kullanımda robotun yatırım geri dönüş süresi (amortisman süresi), yaklaşık 1 MW kapasiteli bir sistemde 8 ay ile 1 yıl aralığındadır. Bu sürenin kısa oluşu, hem ekonomik hem de operasyonel açıdan bu sistemleri cazip hale getirmektedir.



Şekil 2 Aylara Göre Kümülatif Kazanç Tablosu

Ayrıca, robotik temizlik sistemlerinin insan gücüne göre daha homojen temizlik sağladığı ve özellikle mevsimsel tozlanma farklılıklarına karşı daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Geleneksel yöntemlerle yapılan temizliklerde panel camlarının çizilme riski varken, özel tasarımı robotik fırçalar bu sorunu ortadan kaldırmaktadır (Chen et al., 2018).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

4.1 UYGULAMA ALANI VE YÖNTEM

Bu çalışmanın temel amacı, çatı tipi fotovoltaik sistemlerde panel yüzeyinde zamanla biriken kirliliğin enerji üretimine olan etkisini modelleyerek nicel olarak ortaya koymaktır. Saha koşullarında bu tür bir analiz için çok sayıda panel üzerinde uzun dönemli veri toplanması gerekebilirken, bu çalışmada Avrupa Komisyonu tarafından geliştirilen **PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System)** simülasyon platformu kullanılarak alternatif bir senaryo modellemesi tercih edilmiştir.

4.1.1 PVGIS Platformunun Bilimsel Temeli ve Önemi

PVGIS, Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi (Joint Research Centre - JRC) tarafından geliştirilmiş, kamuya açık, bir fotovoltaik üretim tahmin sistemidir. Platform; Avrupa, Afrika, Asya, Orta Doğu ve Güney Amerika'da birçok noktada güneşlenme, sıcaklık ve meteorolojik verileri kullanarak yıllık, aylık ve saatlik bazda elektrik üretim tahminleri yapabilir. PVGIS'in dayandığı modelleme altyapısı:

- Uydu tabanlı radyasyon haritaları,
- Toprak yüzeyi sıcaklıkları ve eğim-açı düzeltmeleri,
- Panel tipi, yönelim ve sistem kaybı girdilerine göre uyarlanmış hesaplama algoritmalarına dayanır.

PVGIS'in "Grid Connected PV" modülü, yatırımcı ve araştırmacılara, grid bağlantılı sistemlerin verimini modellemek için yıllara yayılmış simülasyon sonuçları sunar. Bu bağlamda platform yalnızca bir hesaplama aracı değil, aynı zamanda mühendislik kararlarının alınmasında kullanılan bir karar destek sistemidir.

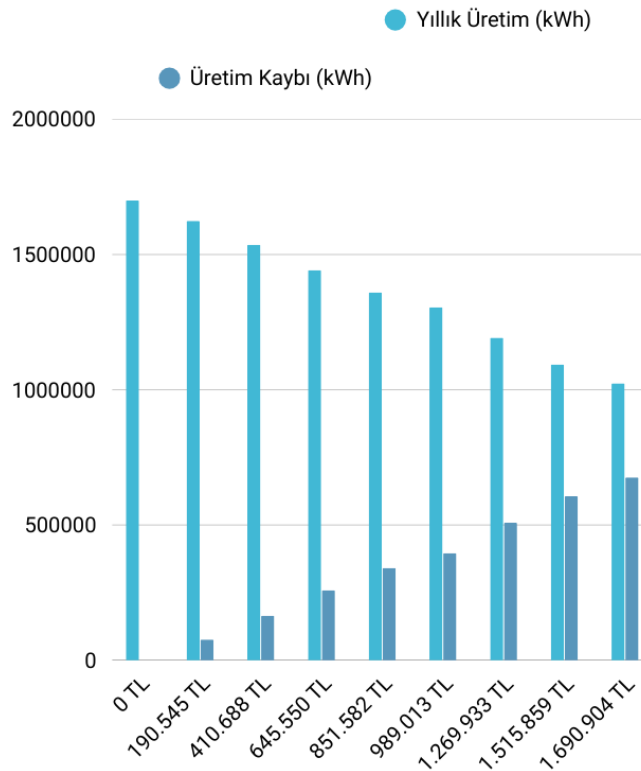
Bu Çalışmadaki PVGIS Uygulaması

Bu çalışmada PVGIS platformu üzerinden Ankara ili (39.92°N, 32.85°E) koordinatlarında yer alan, sabit açılı (25°), güney yönelimli (0° azimuth), kristalin silisyum (crystSi) hücre teknolojisine sahip, 1000 kWp gücünde bir çatı tipi sistem modellenmiştir.

Sistem konfigürasyonu tüm senaryolarda sabit tutulmuş; yalnızca “system loss” (sistem kaybı) parametresi değiştirilerek yüzey kirliliğini temsil eden %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35 ve %40 oranlarında 9 senaryo oluşturulmuştur. Bu şekilde, panellerin yıl boyunca temizlendiği durum ile hiç temizlenmediği en kötü durum arasında aşamalı bir performans kaybı profili çıkarılmıştır.

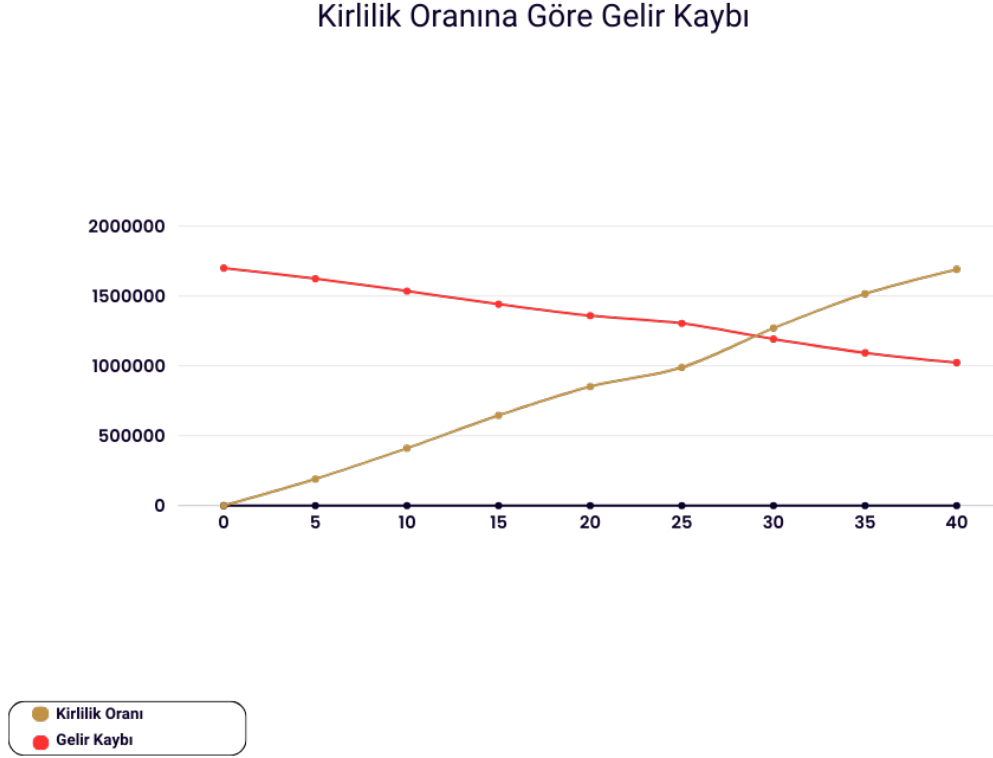
4.2 ÖLÇÜM VERİLERİ VE GRAFİKLER

PVGIS tarafından her sistem kaybı oranı için üretilen yıllık elektrik üretim tahminleri aşağıdaki tabloda özetlenmiştir. Bu veriler, aynı sistemin yalnızca panel yüzey kirliliği sebebiyle nasıl değişken çıktılar üretebildiğini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 3 Kirlilik Oranlarına Göre Yıllık Üretim ve Kayıplar

Her bir sistem kaybı oranı, PV sistemin yıllık üretimini farklı oranlarda düşürmüştür. Özellikle %25 sistem kaybından sonra üretim düşüşleri hızlanmakta, sistemin toplam verimi geri dönüşümsüz biçimde azalmaktadır. Aynı zamanda gelir kaybı da bu eşiğin ardından 1 milyon TL'yi aşan seviyelere ulaşmaktadır.



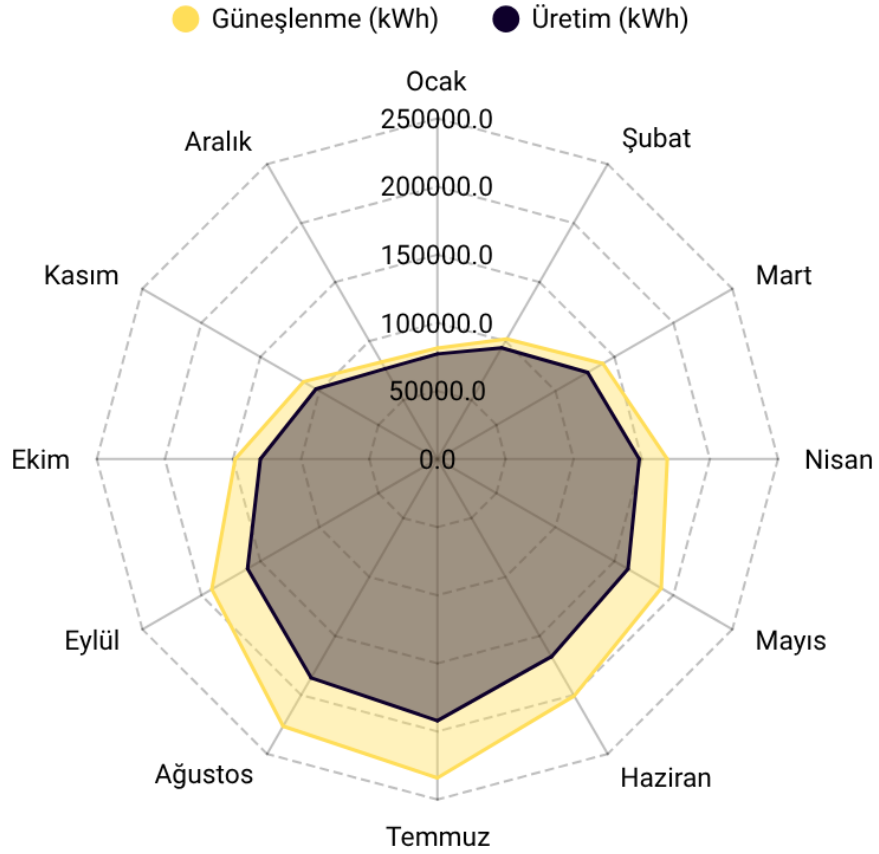
Şekil 4 Kirlilik Oranlarına Göre Yıllık Üretim ve Gelir Kaybı İlişkisi

Bu grafikler, karar vericiye yalnızca mevcut durumu değil, kayıpların hangi noktadan itibaren kritikleştiğini de göstermektedir. Bu sayede temizlik uygulamalarının yalnızca düzenli olması değil, zamanlamasının da stratejik biçimde yapılması gerektiği ortaya çıkmaktadır.

4.3 VERİMLİLİK KARŞILAŞTIRMASI

4.3.1 %0 Sistem Kaybı

Bu senaryo, teorik olarak idealize edilmiş, panel yüzeyinde hiçbir kirlilik bulunmayan, optik geçirgenliğin maksimum, ışık yansımalarının minimum, bağlantı kayıplarının sıfır, sıcaklık eğrisinin nominal seviyede olduğu bir durumu ifade eder. PVGIS'e göre bu sistemin yıllık üretim kapasitesi **1.700.000 kWh** olarak belirlenmiştir. Bu değer, panel üreticilerinin datasheet verilerine en yakın düzeyde enerji performansını yansıtır. Aynı zamanda bu senaryo, tüm diğer kayıpların göreceli olarak kıyaslandığı baz senaryo niteliğindedir.

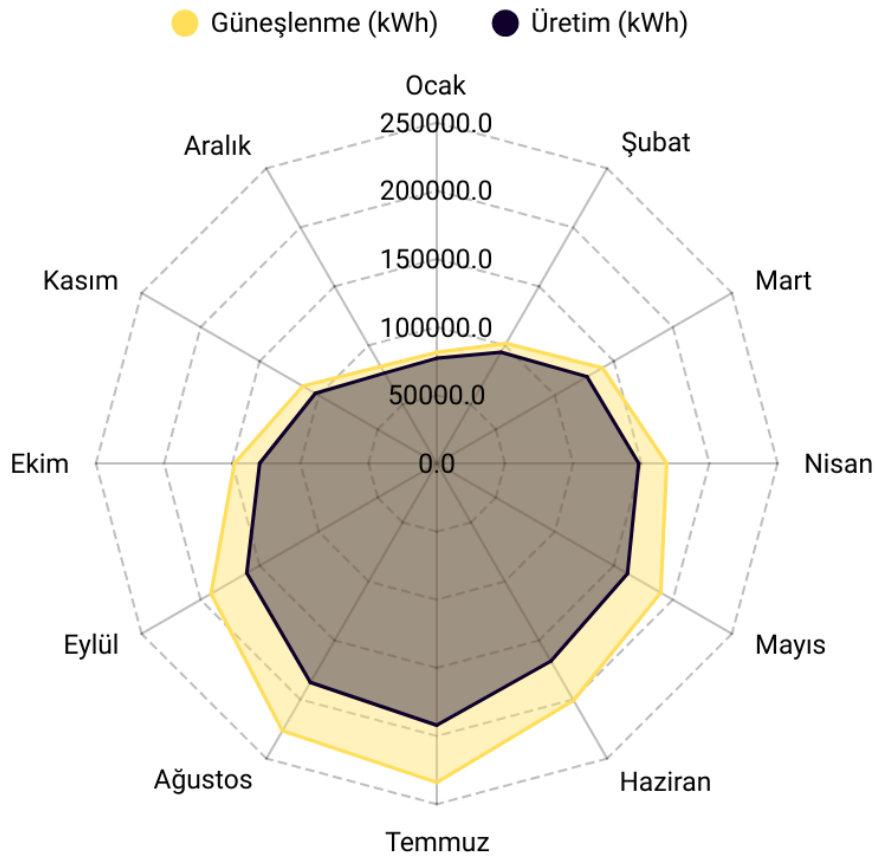


Şekil 5 %0 Sistem Kaybı Enerji Üretim Verisi

4.3.2 %5 Sistem Kaybı

Bu seviyedeki kayıp, genellikle sistemin yeni kurulduğu ve panel yüzeyinde gözle görülür partikül birikimi oluşmadığı, ancak atmosferik nem, ince toz ve çevresel partiküllerin yüzeyde ince bir film oluşturduğu ilk birkaç ayı temsil eder. Bu durumda hücreye ulaşan ışığın spektral yoğunluğu değişmekte, özellikle kısa dalga boylarında (UV ve mavi bölge) absorpsiyon düşmektedir. Yıllık üretim **1.623.782 kWh** olarak hesaplanmış, %4,48 verim kaybı oluşmuştur.

Ekonomik olarak bu %5'lik kayıp, yılda **190.545 TL** zarara denk gelmektedir. Bu, sistemin bakım yapmadan bir yıl bile geçirmesi hâlinde, potansiyel gelirinin %10'una yakını kaybetmesi anlamına gelir.

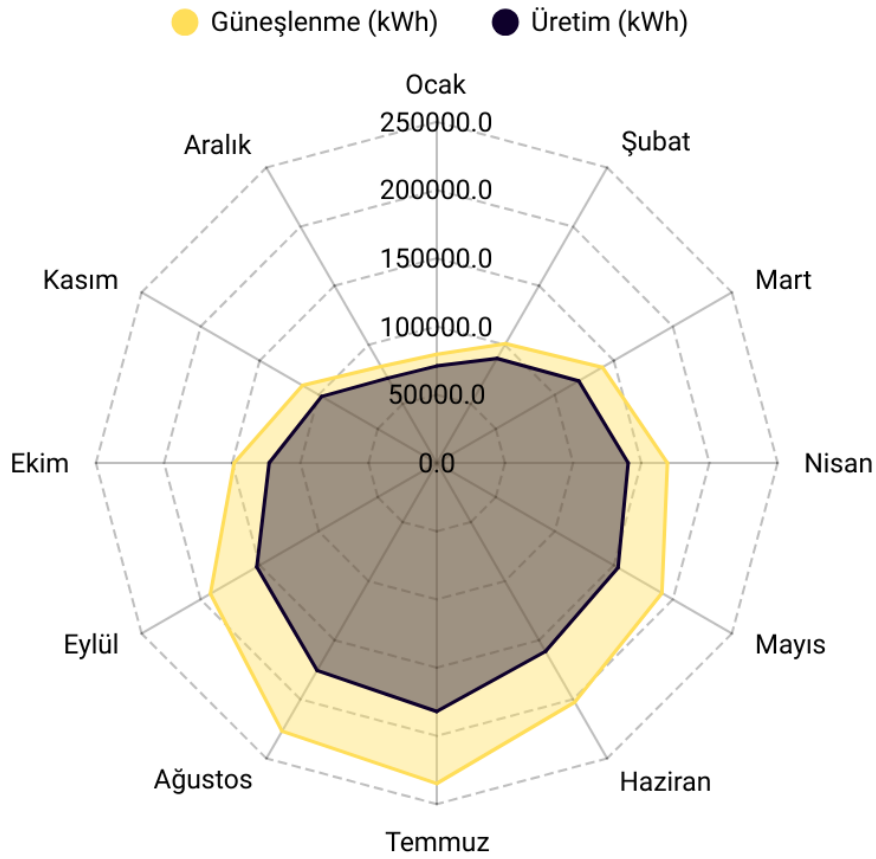


Şekil 6 %5 Sistem Kaybı Enerji Üretim Verisi

4.3.3 %10 Sistem Kaybı

Bu aşamada panel yüzeyindeki partikül birikimi artık homojen olmaktan çıkmış, yüzeyde mikroskobik gölgelenmelere neden olacak şekilde dağılım bozuklukları oluşmuştur. Güneş ışığının foton yoğunluğu hem nicel olarak düşmüş hem de panel hücreleri arasında dengesiz akım üretimine yol açmıştır. Bu durum, bypass diyotlarının sık devreye girmesine ve dolayısıyla inverter davranışında dalgalanmalara neden olabilir.

Yıllık üretim **1.535.725 kWh**, verim kaybı %9,66, ekonomik kayıp **410.688 TL**'dir. Bu seviyedeki kayıp artık sadece optik değil, elektriksel eşdeğer devre üzerinde de iz bırakmaya başlar.

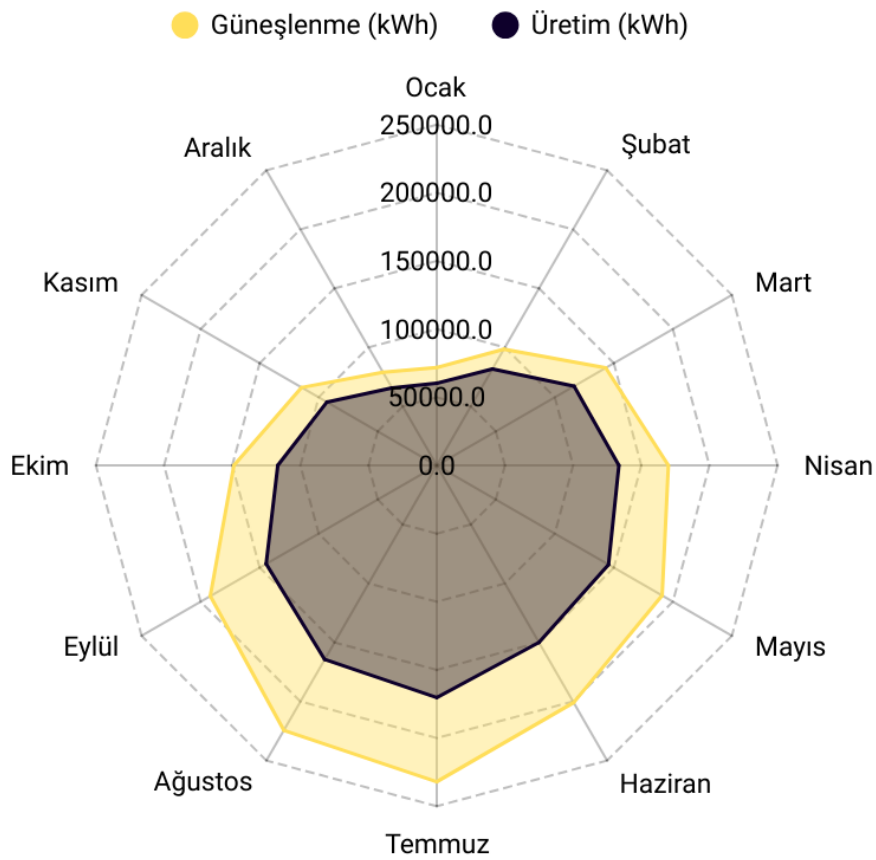


Şekil 7 %10 Sistem Kaybı Enerji Üretim Verisi

4.3.4 %15 Sistem Kaybı

%15'lik sistem kaybında, panel yüzeyinde soiling nedeniyle ışık alma farklılığı termal asimetrilere yol açar. Bazı hücreler daha az ışık alırken ısınmazken, diğerleri aşırı ısınır ve bu fark hücresel sıcak nokta (hot spot) riskini artırır. Bu tür dengesizlikler hücre içi taşıyıcı ömrünü kısaltır ve panelin LID (Light-Induced Degradation) etkisini şiddetlendirir.

Yıllık üretim **1.441.780 kWh**, kayıp %15,19; gelir kaybı **645.550 TL**. Bu seviyeden sonra sistemin bakım maliyeti ile kayıp arasında açık bir ters orantı başlar.

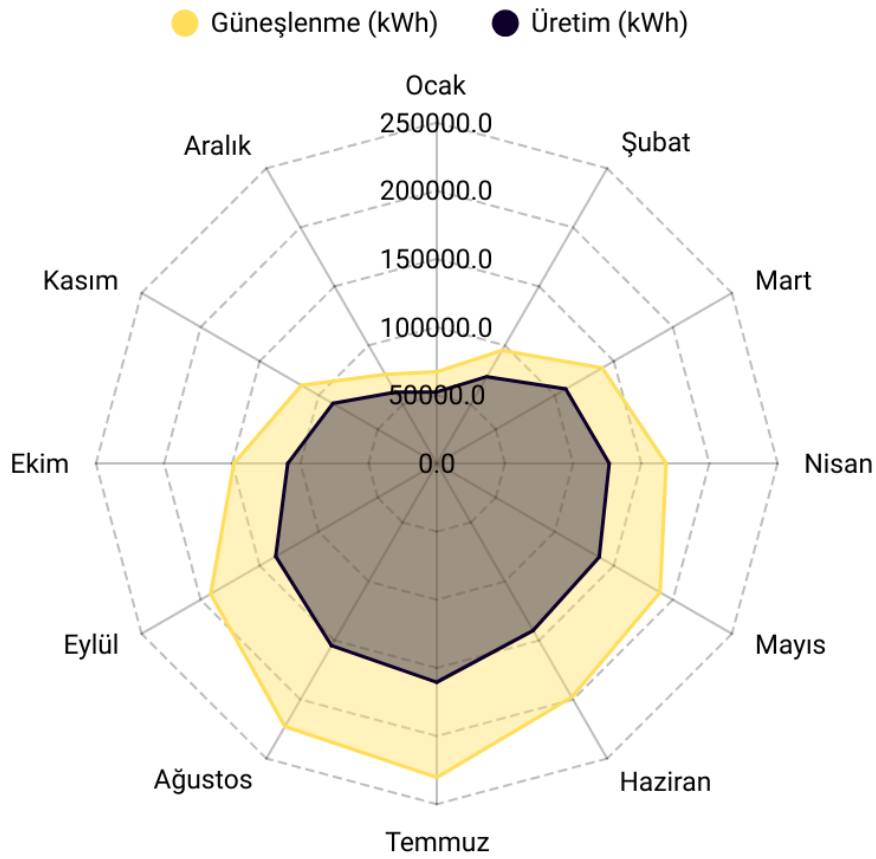


Şekil 8 %15 Sistem Kaybı Enerji Üretim Verisi

4.3.5 %20 Sistem Kaybı

%20 soiling etkisi, ışığın panelin cam yüzeyinden geçme oranını %25'e kadar azaltabilir. Bu durumda panel, nominal koşullar altında çalışan ancak güneş ışığını efektif kullanamayan bir optik yapı haline gelir. Yüzey kirliliği yalnızca absorpsiyon kaybı yaratmaz; aynı zamanda camın yansıma katsayısını değiştirerek ışığın panel dışına geri kaçmasına neden olur.

Yıllık üretim **1.359.367 kWh**, verim kaybı %20,04, yıllık gelir kaybı **851.582 TL**. Panel üreticilerinin garanti dışı bırakma eşikleri genellikle %20 sistem kaybına yakın değerlere ayarlanmıştır.

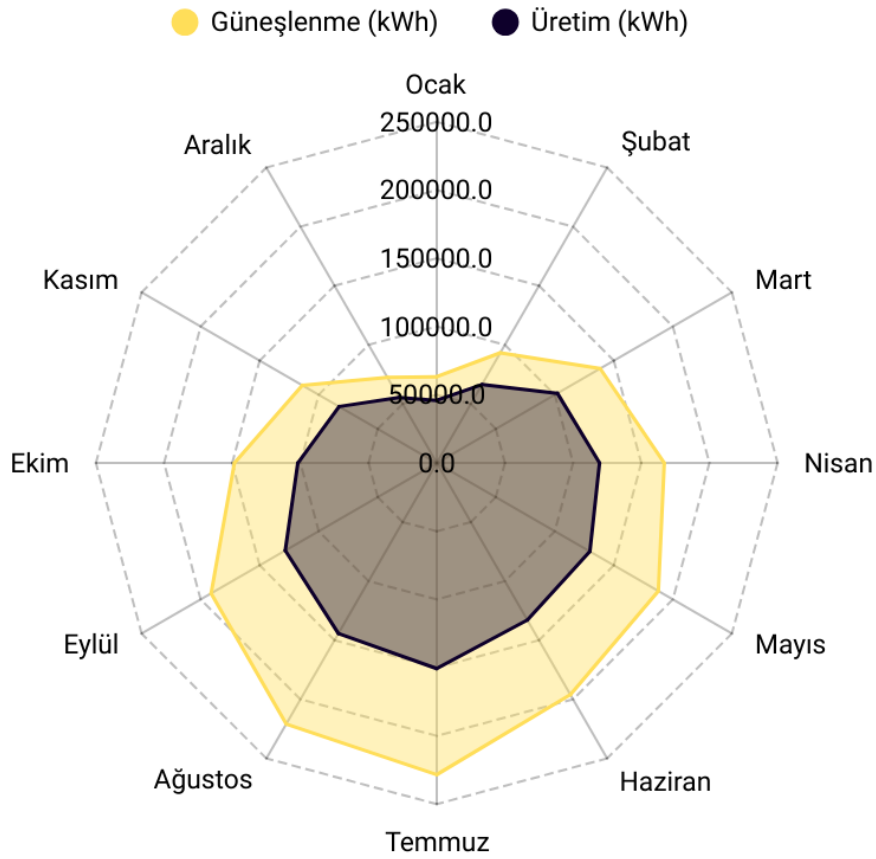


Şekil 9 %20 Sistem Kaybı Enerji Üretim Verisi

4.3.6 %25 Sistem Kaybı

%25'lik kayıp, artık hücre içi taşıyıcı üretim hızının lineerliğini bozacak düzeyde foton eksikliğine yol açar. Güneş ışınımının düşük spektral dağılımı nedeniyle hücrelerin maksimum güç noktası (MPP) davranışları kayar, bu da MPPT algoritmalarının sürekli yeniden ayar yapmasına sebep olur.

Üretim **1.304.395 kWh**, kayıp %23,27, gelir kaybı **989.013 TL**. Bu eşiğin geçilmesi, sistemin artık yalnızca bakım değil, performans restorasyonu ihtiyacı doğurduğunu gösterir.

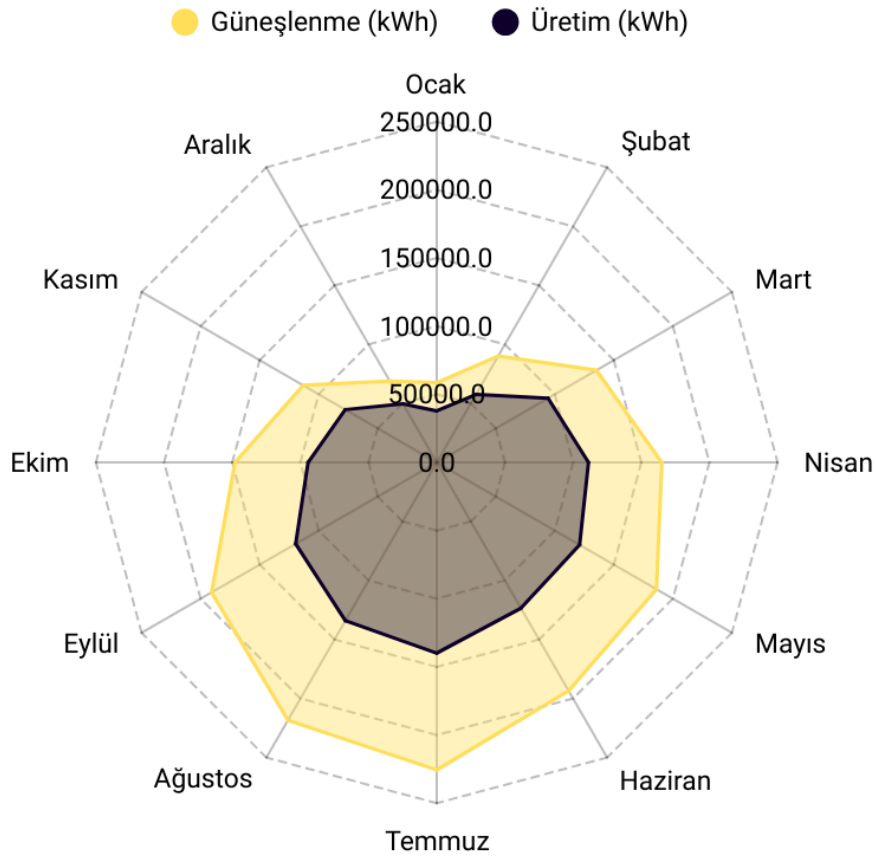


Şekil 10 %25 Sistem Kaybı Enerji Üretim Verisi

4.3.7 %30 Sistem Kaybı

%30'a ulaşan sistem kaybı, panelin ışık seçiciliğini (spectral selectivity) yitirdiği noktadır. Bu, özellikle PERC ve bifacial panellerde daha büyük sorunlara yol açabilir çünkü arka yüzey ışık alma kapasitesi de kirlilikten etkilenir.

Yıllık üretim **1.192.027 kWh**, verim kaybı %29,88, gelir kaybı **1.269.933 TL**. Bu düzeyde, yalnızca temizleme değil, panel yüzey kaplamasının kontrolü de önerilir.

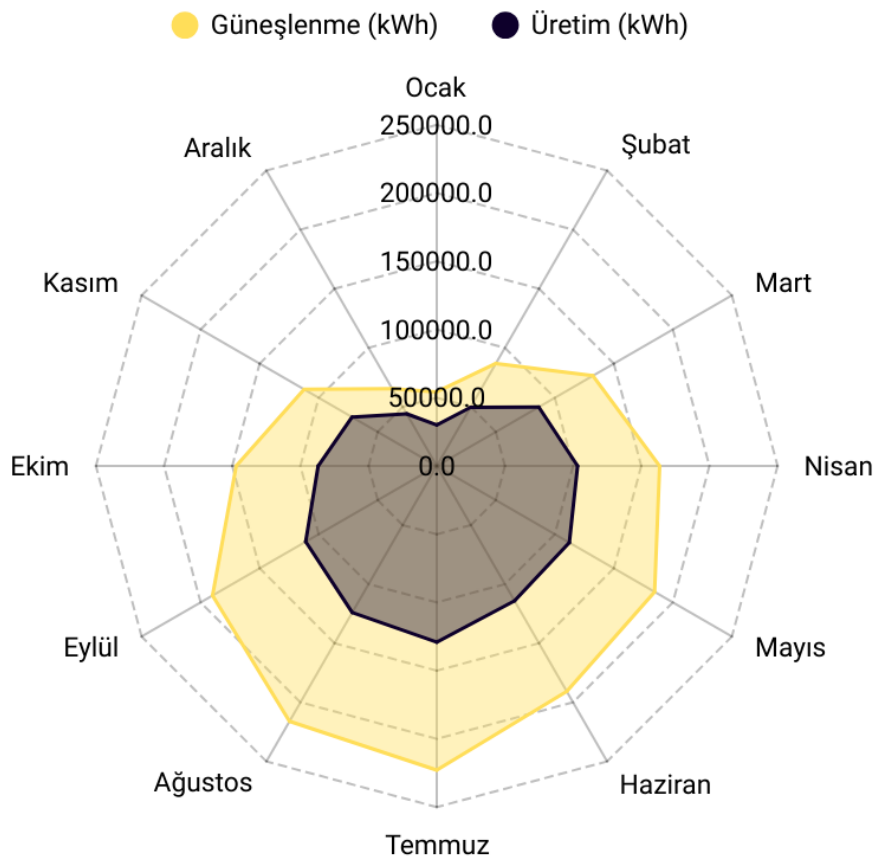


Şekil 11 %30 Sistem Kaybı Enerji Üretim Verisi

4.3.8 %35 Sistem Kaybı

%35 soiling oranında artık panelin opto-elektronik transfer fonksiyonu ciddi biçimde bozulur. Fotovoltaik etki tam anlamıyla zayıflamış, hücre içi yük taşıma süreci baskılanmıştır. Sıcaklık artışıyla birlikte panelde geri akımlar oluşabilir.

Üretim **1.093.656 kWh**, kayıp %35,67, gelir kaybı **1.515.859 TL**. Bu aşamada üretim, teorik potansiyelin %64,3'üne düşmüştür. Verim eğrisi artık negatif marjla ilerler.

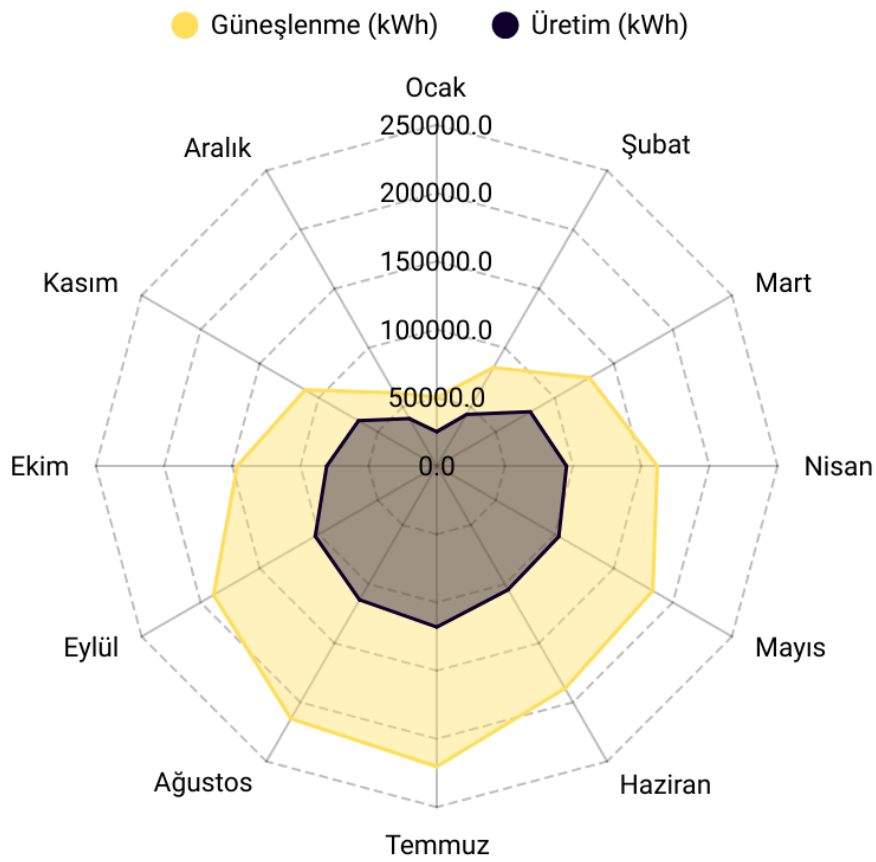


Şekil 12 %35 Sistem Kaybı Enerji Üretim Verisi

4.3.9 %40 Sistem Kaybı

Bu son senaryo, sistemin sürdürülebilirliğini kaybettiği, nominal üretim kapasitesinin neredeyse yarısını kaybettiği ve bakım stratejilerinin başarısız sayılabileceği düzeyi ifade eder.

Yıllık üretim **1.023.638 kWh**, kayıp 676.362 kWh, verim düşüşü %39,79, gelir kaybı **1.690.904 TL**. Bu senaryoda sistemin yatırım geri dönüş süresi ortalama 2 yıl uzamış, yatırımın IRR (Internal Rate of Return) değeri negatife düşmüş olabilir.



Şekil 13 %40 Sistem Kaybı Enerji Üretim Verisi

Simülasyon sonuçları, panel yüzeyinde biriken kirliliğin sistem verimliliğini doğrusal olmayan bir şekilde düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Özellikle %20 kirlilik seviyesinden sonra üretim kaybının artış hızı ivmelenmekte, bu durum sistemin optik davranışında kritik eşiğe ulaşıldığını göstermektedir. Ekonomik açıdan bakıldığında ise %30 ve üzeri seviyelerde temizlik yapılmayan sistemlerin, yılda 1 milyon TL'nin üzerinde gelir kaybı ile karşı karşıya kalabileceği hesaplanmıştır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, fotovoltaik sistemlerde panel yüzeyinde biriken kirliliğin elektrik üretimi üzerindeki etkisi, farklı oranlarda sistem kaybı senaryoları üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışmada deneysel saha verisi kullanılmamış; bunun yerine, PVGIS platformundan elde edilen aylık üretim verileri esas alınmış ve bu verilere %0'dan %40'a kadar kademeli olarak artırılan sistem kaybı oranları uygulanarak üretim düşüşleri hesaplanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, sistem kaybı arttıkça yıllık üretim miktarında istikrarlı bir düşüş olduğunu göstermektedir. Özellikle %10 ve üzerindeki kayıplar, sistemin yıllık enerji üretiminde ciddi düşüşlere yol açmakta; bu da sistemin beklenen performansından uzaklaşmasına neden olmaktadır. En yüksek kayıp oranı olan %40 seviyesinde, yıllık üretim değerinin yarıya yakınının kaybedildiği görülmektedir. Bu tablo, yüzey kirliliğinin göz ardı edilmemesi gereken bir faktör olduğunu ortaya koymaktadır.

Temizlik gibi basit görünen bir bakım işlemi, sistemin toplam verimi üzerinde doğrudan belirleyici olabilmektedir. Bu nedenle bakım periyotlarının rastgele değil, performans verilerine dayalı olarak belirlenmesi önerilmektedir. Özellikle sistem kaybı %5'in üzerine çıktığında üretimdeki düşüş daha görünür hale gelmekte; bu noktadan itibaren yapılacak müdahaleler sistemin ekonomik dengesini koruma açısından önem taşımaktadır.

Bu analiz, saha verisine dayalı olmamakla birlikte, kirlilik kaynaklı performans kaybının genel seyrini anlamak açısından anlamlı bir çerçeve sunmuştur. Elde edilen sonuçlar, PV sistem kullanıcıları, yatırımcılar veya bakım sorumluları için temel bir farkındalık oluşturabilecek niteliktedir. Düzenli bakım yapılmadığında yıllık üretim değerlerinin düşmesi, sistemin geri ödeme süresini uzatabilir, hatta bazı projelerin fizibilitesini olumsuz etkileyebilir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, benzer analizlerin farklı şehirler, çevresel koşullar ve kirlileti türleri bazında detaylandırılması mümkündür. Bu sayede daha gerçekçi senaryolar oluşturularak bakım stratejileri optimize edilebilir. Ayrıca sistem kaybı ile maliyet-fayda ilişkisini içeren ekonomik analizler de bu tür çalışmaların etkisini artırabilir.

Bu alışma, panel yüzeyinde oluşan kirliliğin fotovoltaik üretim üzerindeki etkisini temel düzeyde ortaya koymayı hedeflemiştir. Gerçek saha verisi kullanılmamakla birlikte, yapılan senaryo analizleri, temizlik gibi basit görünen bakım uygulamalarının sistem performansında nasıl farklar yaratabileceğine dair anlamlı bir ereve sunmuştur. Elde edilen bulgular, özellikle belirli bir sistem kaybı eşiğinin aşılması durumunda, üretimdeki azalmanın göz ardı edilemeyecek seviyelere ulaştığını göstermektedir. Bu nedenle güneş enerjisi sistemlerinin işletilmesinde düzenli bakım süreçlerinin dikkate alınması, sistemin verimliliğini korumak açısından önem taşımaktadır. Çalışma, bu alanda yapılacak daha kapsamlı saha uygulamaları ve ekonomik analizler için bir n zemin oluşturma amacı taşımaktadır.

KAYNAKÇA

1. Abdallatif, Y. A. Y. (2024). Toz birikiminin fotovoltaik (FV) sistem verimliliği üzerindeki etkisi ve optimize edilmiş temizlik sıklığı. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
2. Song Z, Wang M, Yang H. Quantification of the Impact of Fine Particulate Matter on Solar Energy Resources and Energy Performance of Different Photovoltaic Technologies. ACS Environ Au. 2022 Feb 21;2(3):275-286. doi: 10.1021/acsenvironau.1c00048. PMID: 37102140; PMCID: PMC10114768.
3. Adekanbi, A., Mustapha, O. T., Lawal, A. I., & Kayode, J. S. (2023). Soiling Loss in Solar Systems: A Review of its Effect on Solar Energy Efficiency and Mitigation Techniques. vol. 7, Art. no. 100094, 2024. doi:10.1016/j.cles.2023.100094.
4. Ahmed, A., Husain, H., Hussain, S., & Qasim, M. (2012). Effect of Dust on Photovoltaic Performance: Review and Research Status . Latest Trends in Renewable Energy and Environmental Informatics, 14, 175–3.
5. Akgüç, A. (2023). Assessing Progress of Turkey in Achieving Renewable Energy Targets Outlined in Energy Regulations. ResearchGate.
6. Akyazı, A., Gültekin, F., & Şahin, A. (2019). Güneş panelleri için mobil robot tasarımı ve performans analizi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7(3), 1664–1675.
7. Al Shehri, A., Ameen, M., & Almarshoud, A. (2016). Experimental study of automatic solar panel cleaning system. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 6(6), 2663–2670.
8. Al-Shamisi, A., & Al-Hinai, H. (2022). A review on solar panel cleaning systems and techniques. Energies , 16(24), 7960. <https://doi.org/10.3390/en16247960>
9. American Chemical Society. (2014). How a Solar Cell Works. Retrieved from <https://www.acs.org/education/chemmatters/past-issues/archive-2013-2014/how-a-solar-cell-works.html>
10. arXiv. (2021). Spectral Nature of Soiling and Its Impact on Multi-Junction Based Concentrator Systems. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2107.02135>
11. Bağcı, E. (2019). Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Potansiyeli, Üretimi, Tüketimi ve Cari İşlemler Dengesi İlişkisi. Research Studies Anatolia Journal , 2(4), 101–117.

12. Birtürk, A., & Çeliktaş, M. S. (2023). Fotovoltaik modüllerin sürdürülebilirliğinde yaşanan İkarus sendromu. *Mühendis ve Makina*, 64(712), 526–548.
<https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1364113-3424037>
13. Casanova, M., Jorquera, J., & Casanova-Leyva, M. (2011). Dust accumulation impact on efficiency of solar PV panels in arid climates. *Energy Procedia*, 25, 338–343.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.07.042>
14. Chaichan, M. T., Kazem, H. A., & Al-Waeli, A. H. A. (2024). Air pollution and solar photovoltaic power generation . *Journal of Cleaner Production*, 437, 140983.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140983>
15. Chen, Y., Chen, J., & Wang, Y. (2018). Study of cleaning method of photovoltaic panels based on water-saving and non-damaging. *Energy Reports*, 4, 275–281.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.08.005>
16. Dorobantu L., Popescu M. O., Popescu Cl., Craciunescu A.(2011). Theeffect of surface impurities on . In: Proceeding the international conference on renewable energies and power quality, Las Palmas de GranCanaria, Spain, 13th – 15th April 2011
17. Dorobantu, L., Varlam, C., & Popescu, D. (2011). The influence of pollution and cleaning on the performance of solar panels. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(5), 053112.
18. ElektrikPort. (2014). Türkiye’de Güneş Enerjisinin Durumu ve Geleceği.
<https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/turkiyede-gunes-enerjisinin-durumu-vegelecegi/11398>
19. Ember. (2024). Türkiye Surpasses 2025 Solar Target as Capacity Doubles in 2.5 Years.
<https://ember-energy.org/latest-insights/turkiye-surpasses-2025-solar-target-as-capacity-doubles-in-2-5-years/>
20. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2022). Türkiye Ulusal Enerji Planı.
<https://enerji.gov.tr>
21. ETKB. (2023). Enerji İstatistikleri Raporu 2023. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.
22. EnergySage. (2024). Monocrystalline vs. Polycrystalline Solar Panels. Retrieved from
<https://www.energysage.com/solar/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar>

23. Environmental Research Letters. (2020). The Impact of Air Pollutant Deposition on Solar Energy System Efficiency. <https://iopscience.iop.org/journal/1748-9326>
24. Fernandez, E. F., Almonacid, F., Perez-Higueras, P., & Rodrigo, P. (2021). Spectral nature of soiling and its impact on multi-junction based concentrator systems. arXiv preprint arXiv:2103.01873. <https://arxiv.org/abs/2103.01873>
25. Fernández-Solas, Á., Vega, A. R., & De La Calle, A. (2021). Optical degradation impact on the spectral performance of photovoltaic technology. arXiv preprint arXiv:2103.04639. <https://arxiv.org/abs/2103.04639>
26. Geetha, Anbazhagan, S., Usha, J., Santhakumar, R., Palanisamy, Sarawagi, Raghav, Singh, Avijit, Solar Panel Self-Cleaning Mechanisms and Its Effect on the Economic and Environmental Sustainability, Journal of Electrical and Computer Engineering , 2024, 7726716, 11 pages, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/7726716>
27. Gholami, H., Adeli, M., & Chegini, V. (2024). Dust deposition characteristics on photovoltaic arrays investigated through outdoor experiments. Scientific Reports, 14, 84708. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84708-2>
28. Hasanuzzaman, M., Zubir, U. S., Ilham, N. I., & Che, H. S. (2017). Global electricity demand, generation, grid system, and renewable energy policies: A review. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 6(3), e222. <https://doi.org/10.1002/wene.222>
29. İçel, Y. (2024). Kirliliğin PV Panel Verimine Etkisi ve Panel Temizleme Yöntemleri . In: Kaygusuz, K. (ed.), 21. Yüzyılda Mühendislikte Çağdaş Araştırma Uygulamaları Üzerine Disiplinler Arası Çalışmalar- VI. Özgür Yayınları.
30. IRENA. (2023). Renewable Capacity Statistics 2023 . <https://www.irena.org/publications/2023>
31. IRENA. (2025). Renewable Capacity Highlights 2025 . International Renewable Energy Agency.
32. IRENA. (2025). Renewable Capacity Statistics 2025. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2025/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2025>
33. International Energy Agency. (2024). Global overview – Renewables 2024 – Analysis. <https://www.iea.org/reports/renewables-2024/global-overview>
34. International Solar Alliance. (2023). World Solar Market Report 2023. <https://isolaralliance.org/uploads/docs/a85d84a7a402f9209262f855b273da.pdf>

35. Johansson, B. (2013). Security aspects of future renewable energy systems. *Energy*, 61, 598–605.
36. Journal of Engineering and Applied Science. (2021). A Review of Dust Accumulation on PV Panels in the MENA and the Far East Regions. Springer.
37. Kabir, M. S., Niloy, K. M., Rahman, S. M. I., Hossen, M. I., Afrose, S., Mofazzol, M. I. H., & Ahmmmed, M. L. (2025). A novel method for detecting dust accumulation in photovoltaic systems: Evaluating visible sunlight obstruction in different dust levels and AI-based bird droppings detection. arXiv preprint arXiv:2501.08304 .
<https://arxiv.org/abs/2501.08304>
38. Kapluhan, E. (2014). ENERJİ COĞRAFYASI AÇISINDAN BİR İNCELEME: BİYOKÜTLE ENERJİSİNİN DÜNYADAKİ VE TÜRKİYE’DEKİ KULLANIM DURUMU. *Marmara Coğrafya Dergisi*(30). <https://doi.org/10.14781/mcd.98631>
39. Kazem, H. A., Chaichan, M. T., & Al-Waeli, A. H. A. (2013). Dust effect on photovoltaic utilization in Iraq: Review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 734–749.
40. Kılınç, E. C. (2023). YENİLENEBİLİR ENERJİ VE FOSİL YAKIT TÜKETİMİNİN EKOLOJİK AYAK İZİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ: TÜRKİYE ÖRNEĞİ. *Finans Ekonomi Ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 8(3), 731-749. <https://doi.org/10.29106/fesa.1307807>
41. Koç, C., & Şenel, M. (2013). Güneş enerjisi potansiyelinin Türkiye üzerindeki etkileri. *Enerji ve Çevre Dergisi*, 4(1), 22–34.
42. Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi. *Mühendis Ve Makina*, 59(692), 86-114.
43. Koç, Ü. (2021). Güneş Enerjisi ve Ekonomik Büyüme. *Ekonomi Politika Ve Finans Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 515-533. <https://doi.org/10.30784/epfad.890910>
44. Kumar, R. (2020). Solar Photovoltaic Energy: Advantages and Disadvantages. *Global Scientific Research Journals*, 8(1), 1–8.
<https://www.globalscienceresearchjournals.org/articles/solar-photovoltaic-energy-advantages-and-disadvantages.pdf>
45. Mani, M., & Pillai, R. (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 14(9), 3124–3131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>

46. MIT Energy Initiative. (2015). The Future of Solar Energy: An Interdisciplinary Study.
<https://energy.mit.edu/research/future-solar-energy/>
47. National Renewable Energy Laboratory. (2023). NREL Research Finds Rain Not Enough To Wash Pollen From Solar Panels .
<https://www.nrel.gov/news/program/2023/nrel-research-finds-rain-not-enough-to-wash-pollen-from-solar-panels.html>
48. National Renewable Energy Laboratory. (2023). Solar Photovoltaic Technology Basics.
Retrieved from <https://www.nrel.gov/research/re-photovoltaics.html>
49. Nijssse, F. J. M. M., Mercure, J.-F., Ameli, N., Larosa, F., Koth