

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNİN İZLENMESİNDE DİJİTALLEŞME VE ÖNERİLER

Veri, Yapay Zekâ ve Dijital İkiz ile İşletme Verimliliği

Miktat AKTAŞ, PhD

yaz
yayınları

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNİN İZLENMESİNDE DİJİTALLEŞME VE ÖNERİLER

Veri, Yapay Zekâ ve Dijital İkiz ile İşletme Verimliliği

Miktat AKTAŞ, PhD

yaz yayınları

2026

yaz
yayınları

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNİN İZLENMESİNDE DİJİTALLEŞME VE ÖNERİLER

Veri, Yapay Zekâ ve Dijital İkiz ile İşletme Verimliliği

Yazar: Miktat AKTAŞ, PhD

ORCID NO: 0000-0002-0731-5668

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

ISBN 978-625-8926-60-6

Ekim 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

ÖZET

Bu kitap, şebekeye bağlı güneş enerji santrallerinin (GES) izlenmesinde dijitalleşmeyi, ölçümden eyleme uzanan bütünlüklü bir zincir olarak ele almaktadır. Santralin gelirini belirleyen büyüklük kurulu güç değil, gerçekten şebekeye verilen enerjidir; bu enerjinin beklenenden neden düşük olduğunu zamanında, doğru nedene atfederek ve düşük maliyetle belirlemek ise ölçüm, haberleşme, veri ve analitik altyapısının kalitesine bağlıdır. Kitap bu altyapıyı beş düzeyli bir dijital olgunluk çerçevesi (ölçüm, izleme, analiz, öngörü, özerk işletme) ile düzenler.

Kitapta önce güneş enerjisi pazarı, santral mimarisi ve enerji kaybı kaynakları, ardından IEC 61724 serisi ve IEC TS 63019 çerçevesinde performans göstergeleri (performans oranı, enerji performans indeksi, kullanılabilirlik, performans kayıp oranı) ve ölçüm belirsizliği ele alınmıştır. İzleme mimarisi, haberleşme protokolleri, veri yönetimi ve veri kalitesi hattı tasarım ilkeleriyle birlikte verilmiş; beklenen enerji hesabı, kayıp ayrıştırma, kardeş karşılaştırma ve istatistiksel süreç kontrolü (Shewhart ve CUSUM) performans analitiği başlığı altında incelenmiştir. Arıza tespit ve teşhis, makine öğrenmesi ve yapay zekânın yerleri ve sınırları, yazarın elektrolüminesans (EL) görüntülerinden hücre hasarı sınıflandırması çalışmalarının izleme sürecine bağlanması, dijital ikiz, işletme ve bakım süreçleri, Türkiye mevzuat ve piyasa bağlamı, siber güvenlik ve veri yönetişimi ayrı bölümlerde işlenmiştir.

Yöntemlerin davranışı, tamamı sentetik olarak üretilmiş veriyle gösterilmiştir. 150 günlük bir kalıntı serisinde CUSUM yönteminin %1,5'lik kalıcı bir kaybı 2 gün, günlük 3σ eşiğinin ise 9 gün sonra tespit ettiği; 2.000 koşuluk Monte Carlo karşılaştırmasında bu avantajın küçük kayıplarda belirginleştiği, yaklaşık %3 ve üzerindeki kayıplarda ise ortadan kalktığı gösterilmiştir. 50 MWp'lik varsayımsal bir santral için yaklaşık 17.710 veri noktası, 1 dakikalık kayıtla yılda yaklaşık 112 GB ham veri ve bir yüzde puanlık enerji kazancının 40–80 ABD$/MWh fiyat aralığında yaklaşık 32.000–

64.000 ABD$/yıl değer taşıdığı hesaplanmıştır. Bu sayılar gerçek bir santralin ölçümü değildir; yöntemi göstermek amacıyla üretilmiştir.

Kitabın savı şudur: izlemenin değeri, tespit algoritmasının karmaşıklığından çok, hiçbir kaybın uzun süre görünmez kalmamasını sağlayan kapsamdan, veri kalitesinden ve tespitin doğrulanmış bir saha müdahalesine dönüşmesinden gelir. Kitap, tüm santraller için asgari bir paket, orta ve büyük santraller için ek öneriler ve üç aşamalı bir uygulama yol haritası sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: güneş enerji santrali, performans izleme, dijitalleşme, veri kalitesi, arıza tespiti, dijital ikiz, yapay zekâ, işletme ve bakım.

ABSTRACT

This book treats digitalisation in the monitoring of grid-connected photovoltaic (PV) power plants as a single chain running from measurement to action. A plant's revenue depends not on installed capacity but on the energy actually delivered to the grid, and finding out in time, at low cost and with the correct cause why that energy falls short of expectations depends on the quality of the measurement, communication, data and analytics infrastructure. The book organises this infrastructure with a five-level digital maturity framework (measurement, monitoring, analysis, prediction, autonomous operation).

The text first covers the solar market, plant architecture and loss sources, then the performance indicators defined by the IEC 61724 series and IEC TS 63019 (performance ratio, energy performance index, availability, performance loss rate) and measurement uncertainty. Monitoring architecture, communication protocols, data management and a data-quality pipeline are presented with design principles; expected-energy modelling, loss decomposition, peer comparison and statistical process control (Shewhart and CUSUM) are treated as performance analytics. Separate chapters address fault detection and diagnosis, the role and limits of machine learning and artificial intelligence, the connection of the author's electroluminescence (EL) based cell-defect classification work to the monitoring process, digital twins, operation and maintenance processes, the Turkish regulatory and market context, and cybersecurity and data governance.

Method behaviour is demonstrated with fully synthetic data. In a 150-day residual series, CUSUM flagged a persistent 1.5% loss after 2 days against 9 days for a daily 3σ threshold; a 2,000-run Monte Carlo comparison shows that this advantage is concentrated in small losses and disappears (even reverses slightly) for losses of about 3% and above. For a hypothetical 50 MWp plant the book computes about 17,710 data points, roughly 112 GB of raw data per year at one-

minute logging, and a value of about USD 32,000–64,000 per year per percentage point of energy gain at USD 40–80/MWh. These figures are not measurements from a real plant; they are generated to illustrate the methods.

The central claim is that the value of monitoring comes less from algorithmic sophistication than from coverage that keeps any loss from staying invisible for long, from data quality, and from turning each detection into a verified field intervention. The book offers a minimum package for all plants, additional recommendations for medium and large plants, and a three-stage implementation roadmap.

Keywords: photovoltaic power plant, performance monitoring, digitalisation, data quality, fault detection, digital twin, artificial intelligence, operation and maintenance

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ 1

1.1. Neden izleme, neden dijitalleşme? 1

1.2. Dijitalleşmenin tanımı ve düzeyleri 1

1.3. Kapsam ve okuyucu 2

1.4 Kaynak yaklaşımı ve yazarın katkısı 3

1.5. Kitabın yapısı 4

2. GÜNEŞ ENERJİSİ, SANTRAL MİMARİSİ VE KAYIP KAYNAKLARI 5

2.1. Pazar bağlamı: neden izleme artık zorunlu bir mühendislik konusu? 5

2.2. Santralin fiziksel mimarisi 6

2.3. Santral türleri ve izleme gereksinimlerine etkisi 7

2.4. Üretim kaybının fiziksel ve işletmesel kaynakları 8

2.5. İşletme maliyeti ve dijital yatırımın ekonomik çerçevesi .. 9

3. PERFORMANS GÖSTERGELERİ VE İZLEME STANDARTLARI 11

3.1. Neden standartlaştırılmış göstergeler? 11

3.2. Temel enerji göstergeleri 11

3.2.1. PR'nin yorumlanmasında dört tuzak 12

3.2.2. Sıcaklık düzeltmeli PR 12

3.3. Beklenen enerji ve enerji performans indeksi 13

3.4. Kullanılabilirlik 14

3.5. Kayıp köprüsü: PR neden o değerde? 15

3.6. Bozunma ve performans kayıp oranı 15

3.7. İzleme sistemi sınıfları 16

3.8. Göstergeler arası ilişki ve gösterge seti önerisi 16

4. SENSÖRLER, ÖLÇÜM ZİNCİRİ VE ÖLÇÜM BELİRSİZLİĞİ 19

4.1. Ölçüm zincirinin yapısı 19

4.2. Işınım ölçümü 19

4.3. Sıcaklık, rüzgâr ve diğer meteorolojik büyüklükler 20

4.4. Elektriksel ölçümler 21

4.5. Kirlenme ölçümü 21

4.6. Takipçi ve mekanik sistemler 22

4.7. Zaman damgası ve senkronizasyon 22

4.8. Ölçüm belirsizliği ve kalibrasyon 22

5. İZLEME MİMARİSİ, HABERLEŞME VE PROTOKOLLER . 25

5.1. Referans mimari 25

5.2. Saha ağı 26

5.3. Haberleşme protokolleri 26

5.4. SCADA, santral kontrolcüsü ve izleme platformu 28

5.5. Uç (edge) katmanı ve yerel dayanıklılık 29

5.6. Bulut, yerinde veya hibrit 29

5.7. Veri hacmi ve örnekleme aralığı 29

5.8. Mimari tasarım ilkeleri 30

6. VERİ YÖNETİMİ VE VERİ KALİTESİ 33
6.1. Neden veri kalitesi ayrı bir bölümdür? 33
6.2. Veri modeli ve varlık hiyerarşisi 33
6.3. Etiket (tag) isimlendirme ve veri sözlüğü 34
6.4. Zaman serisi depolama 34
6.5. Veri kalitesi hattı 35
6.6. Kalibrasyon ve sensör sağlığının veriden izlenmesi 37
6.7. Veri sahipliği ve sürüm denetimi 37
7. PERFORMANS ANALİTİĞİ: BEKLENEN ENERJİ, KAYIP AYRIŞTIRMA VE İSTATİSTİKSEL KONTROL 39
7.1. Analitiğin amacı 39
7.2. Beklenen enerji hesaplama zinciri 39
7.3. Kalıntı ve normalizasyon 40
7.4. Kayıp ayrıştırma 40
7.5. İstatistiksel süreç kontrolü: Shewhart ve CUSUM 41
7.5.1. Sentetik gösterim 42
7.5.2. Monte Carlo karşılaştırması 43
7.6. Karşılaştırmalı (kardeş) analiz 44
7.7. Alarm üretimi: kalıntıdan eyleme 44
8. ARIZA TESPİT VE TEŞHİS 45
8.1. Tespit, yerelleştirme, teşhis 45
8.2. Arıza türleri ve izleme verisindeki izleri 45
8.3. Dizi düzeyinde karşılaştırma 47

8.4. Eğri tabanlı ve görüntü tabanlı teşhis 48

8.5. Teşhis karar ağacı..... 48

9. MAKİNE ÖĞRENMESİ VE YAPAY ZEKÂ: YERLERİ VE SINIRLARI..... 51

9.1. Ne zaman öğrenmeli yöntem gerekir? 51

9.2. Üretim tahmini ve beklenen enerji..... 51

9.3. Anomali tespiti..... 52

9.4. Arıza sınıflandırması 52

9.5. Açıklanabilirlik 53

9.6. Doğrulama ve model yönetimi 53

9.7. Öneriler 54

10. DİJİTAL İKİZ 55

10.1. Kavram 55

10.2. Mimari..... 56

10.2.1. Fizik tabanlı bileşen..... 56

10.2.2. Veri tabanlı bileşen..... 56

10.2.3. Durum ve parametre güncelleme 57

10.3. Kullanım senaryoları 57

10.4. Dijital ikiz olgunluğu..... 58

10.5. Sınırlar ve riskler..... 58

11. İŞLETME VE BAKIM SÜREÇLERİ: İZLEMEDEN EYLEME 61

11.1. Neden bu bölüm? 61

11.2. Bakım stratejileri 61

11.3. Alarm yönetimi 62

11.4. İş emri yönetimi (CMMS) 63

11.5. Önceliklendirme: etki × olasılık 64

11.6. Temizlik optimizasyonu 64

11.7. Performans göstergeleri ve raporlama 65

11.8. Ekip yetkinliği ve değişim yönetimi 65

12. TÜRKİYE BAĞLAMI: MEVZUAT, PİYASA VE UYGULAMA 67

12.1. Bölümün kapsamı ve bir uyarı 67

12.2. Pazar ve kurulu güç 67

12.3. Ölçüm ve veri iletimi yükümlülükleri 67

12.4. Merkezî izleme ve tahmin 68

12.5. Yerel koşullar ve izleme tasarımına etkisi 69

13. SİBER GÜVENLİK VE VERİ YÖNETİŞİMİ 71

13.1. Neden güneş santralleri için önemli? 71

13.2. Endüstriyel kontrol sistemleri için çerçeve 71

13.3. Tasarım ilkeleri 72

13.4. Veri yönetişimi 73

13.5. Olay müdahale 74

13.6. Yapay zekâ sistemlerine özgü riskler 74

14. UYGULAMALI ÖRNEK: 50 MWP VARSAYIMSAL SANTRAL 75

14.1. Amaç ve varsayımlar 75

14.2. İzleme sisteminin boyutlandırılması 76

14.3. Üç katmanlı izleme paketi 76

14.4. Yatırımın ekonomik değeri 77

14.4.1. Başabaş analizi 78

14.4.2. Tespit hızının değeri 79

14.5. Örnek bir olay akışı 79

15. ÖNERİLER VE YOL HARİTASI 81

15.1. Öneriler: roller ve öncelikler 81

15.1.1. Tüm santraller için asgari paket 81

15.1.2. Orta ve büyük santraller için ek öneriler 81

15.1.3. Portföy sahipleri ve yatırımcılar için 82

15.1.4. Araştırmacılar için 82

15.2. Uygulama yol haritası 83

15.3. Sık yapılan hatalar 83

15.4. Başarı ölçütleri 84

16. SONUÇ 85

16.1. Sınırlar ve gelecek çalışma 86

KAYNAKLAR 87

Ek A. Terimler Sözlüğü 97

Ek B. Saha Kontrol Listeleri 99

Ek C. Etiket İsimlendirme Şablonu 101

Ek D. İzleme Sistemi Şartname ve Sözleşme Maddeleri Şablonu 103

Ek E. Kullanım Vakaları Kataloğu..... 105

Yazar Hakkında 106

"Kitabın hazırlanması sırasında dil bilgisi ve üslubu geliştirmek amacıyla yapay zekâ tabanlı yazım araçlarından yararlanılmış; içerik yazar tarafından gözden geçirilip düzenlenmiştir. Kitabın içeriğine ilişkin tüm sorumluluk yazara aittir."

Miktat AKTAŞ, PhD

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Santral izlemede beş düzeyli dijital olgunluk çerçevesi (bu kitaptaki kavramsal sınıflandırma).

Şekil 2.1. Sol: 2025 yılı küresel güneş kurulumu, üç kurumun bildirimi [28–30] (DC/AC ve kapsam farkları nedeniyle değerler farklıdır). Sağ: Türkiye güneş kurulu gücü, TEİAŞ verilerini aktaran haber kaynağına göre [32].

Şekil 3.1. Varsayımsal 50 MWp santral için PR kayıp köprüsü (kayıp çarpanları çarpımsaldır; dikey eksen 70'ten başlar).

Şekil 5.1. Santral izleme sistemi için beş katmanlı referans mimari ve kesen işlevler.

Şekil 5.2. Varsayımsal 50 MWp santral için örnekleme aralığına göre yıllık ham veri hacmi (17.710 etiket, değer başına 12 bayt, sıkıştırmasız).

Şekil 6.1. Veri kalitesi hattı: ham veriden doğrulanmış veriye ve her adımda bayrak üretimi.

Şekil 7.1. Sentetik 150 günlük kalıntı serisi (üst) ve CUSUM istatistiği (alt). Kırmızı noktalar alarmları gösterir; alarm sonrası istatistik sıfırlanır.

Şekil 7.2. Kalıcı kayıp büyüklüğüne göre ortalama tespit gecikmesi (sentetik veri, 2.000 koşu).

Şekil 8.1. Sentetik dizi akımı haritası: dizi akımının küme medyanına oranı (12 dizi kutusu × 16 dizi). Etiketli hücreler kasıtlı yerleştirilmiş sorunları gösterir.

Şekil 10.1. Fotovoltaik santral için dijital ikiz mimarisi: fizik ve veri tabanlı modellerin birleşimi ve karar döngüsü.

Şekil 11.1. İzlemeden eyleme kapalı döngü: tespit, önceliklendirme, iş emri, müdahale, doğrulama ve öğrenme.

Şekil 11.2. Bakım stratejilerinin izleme verisi ve müdahale zamanlaması açısından karşılaştırılması.

Şekil 13.1. Santral ağı için bölge ve kanal yapısı: saha, kontrol, DMZ ve kurumsal/bulut bölgeleri.

Şekil 14.1. Varsayımsal 50 MWp santralde yıllık katma değer: kazanılan enerji yüzdesi ve satış fiyatı varsayımına göre (80 GWh/yıl).

Şekil 15.1. İzleme ve dijitalleşme yol haritası: temel, derinleşme ve optimizasyon aşamaları.

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Santral alt sistemleri, izlenen değişkenler ve tipik arızalar

Tablo 3.1. Kullanılabilirlik tanımlarının karşılaştırması

Tablo 3.2. Önerilen asgari gösterge seti ve cevapladığı soru

Tablo 4.1. Başlıca sensörler, kritik noktalar ve veriye etkisi

Tablo 5.1. Santral izlemede kullanılan başlıca protokoller

Tablo 8.1. Yaygın arıza türleri ve izleme verisindeki tipik izleri

Tablo 10.1. Dijital ikiz için aşamalı olgunluk yaklaşımı

Tablo 14.1. Varsayımsal 50 MWp santralin temel parametreleri

Tablo 14.2. Varsayımsal santraldeki veri noktaları (etiketler)

Tablo 14.3. Enerji kazancı ve satış fiyatına göre yıllık değer ve 10 yıllık net bugünkü değer (varsayımsal, %8 iskonto)

Tablo A.1. Kitapta kullanılan başlıca terimler

Tablo C.1. Etiket isimlendirme için önerilen kurallar

Tablo D.1. İzleme sistemi şartnamesi için kontrol maddeleri

Tablo E.1. Kullanım vakaları: veri, yöntem ve eylem

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."



GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNİN İZLENMESİNDE DİJİTALLEŞME VE ÖNERİLER

Veri, Yapay Zekâ ve Dijital İkiz ile İşletme Verimliliği

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com

ISBN: 978-625-8926-60-6