Elektrik Elektronik Mühendisliğinde
Dijital İkiz Teknolojileri

Editör
Doç. Dr. Murat TÖREN

Vizetek
Yayıncılık

Elektrik Elektronik Mühendisliğinde
Dijital İkiz Teknolojileri

Editör
Murat TÖREN

Yazarlar
Barbaros PREVEZE - Barış ÖZ - Furkan MENEVŞEOĞLU
Mehmet YERLİKAYA - Metin VARAN - Mikail PÜRLÜ

E-ISBN: 978-625-382-497-6
DOI: 10.54637/vizetek.9786253824976

Copyright © Vizetek
Bu kitabın basım, yayım ve satış hakları Vizetek Yayıncılık Sanayi ve Ticaret Limited Şirketine aittir. Vizetek Yayıncılık'ın izni alınmadan kitabın tümü ya da bölümleri, kapak tasarımı, elektronik, mekanik, fotokopi, manyetik, kayıt ya da başka yöntemlerle çoğaltılamaz, basılamaz, dağıtılamaz.
Bu kitap, basılı ve elektronik (e-kitap) formatlarında yayımlanmaktadır.
Kitap içeriğinin tüm sorumluluğu yazar(lar)ına aittir.

Yayın Tasarımcısı / Koordinatörü: Sena DURMAZ
Kapak Tasarımı: Ahmet TUNÇDEMİR
Dizgi-Mizanpaj: Samet TORUN
Yayım: Ankara | Ekim, 2026

Materyal Türü: Elektronik Kitap (Çevrim içi / Web tabanlı)
Elektronik Yayın Formatı: PDF Elektronik
Yayın Tipi: Adobe Ebook Reader

Vizetek
Yayıncılık

Seyranbağları Mah. İncesu Cad. 10/2 Çankaya/ANKARA
Tel.: (0312) 482 00 11
Web: www.vizetek.com.tr
E-mail: vizetekyayincilik@gmail.com
Yayıncı Sertifika No: 41575

İÇİNDEKİLER

1. BÖLÜM

Dijital İkizlerin Temelleri 3
Mikail PÜRLÜ

2. BÖLÜM

Görüntü İşleme Destekli Üretim Hücrelerinde
Dijital İkizin Doğrulanması:
Ölçüm Belirsizliği, Gecikme ve Sat Kriterleri 22
Barış ÖZ

3. BÖLÜM

Akıllı Şebekelerde Dijital İkiz ve Yapay Zekâ Entegrasyonu:
Enerji Yönetimi İçin Kavramlar, Mimari Ve Entegre Çerçeve..... 51
Furkan MENEVŞEOĞLU
Metin VARAN

4. BÖLÜM

Dijital İkiz Destekli Yenilenebilir Enerji ve Enerji Depolama Sistemleri:
Mimari, Uygulamalar ve Teknik Zorluklar..... 71
Furkan MENEVŞEOĞLU
Metin VARAN

5. BÖLÜM

Haberleşme Ağları ve 5G/6G..... 94
Mehmet YERLİKAYA

6. BÖLÜM

How to Measure and Improve the
Mobile Multi-Hop Network Flexibility.....116
Barbaros PREVEZE

ÖN SÖZ

Mühendislik tarihi, büyük ölçüde gerçekliği temsil etme biçimlerimizin tarihidir. Kirchhoff yasalarından durum-uzay modellerine, sonlu elemanlar çözücülerinden devre benzetim ortamlarına uzanan bu yolculukta mühendis, fiziksel sistemi her zaman bir model aracılığıyla anlamaya, tasarlamaya ve denetlemeye çalışmıştır. Ancak bu modeller uzun süre durağan kalmış; tasarım aşamasında kurulmuş, işletme aşamasında ise çoğu kez gerçek sistemden kopmuştur. Dijital ikiz kavramı tam da bu kopukluğu ortadan kaldırma iddiasıyla ortaya çıkmıştır: fiziksel varlık ile onun sanal temsili arasında, ölçüm verisiyle sürekli beslenen, çift yönlü ve yaşam döngüsü boyunca evrilen bir bağ.

Bugün dijital ikiz, Endüstri 4.0 söyleminin en sık başvurulan kavramlarından biridir; ne var ki bu yaygınlık beraberinde ciddi bir kavramsal bulanıklık da getirmiştir. Literatürde "dijital model", "dijital gölge" ve "dijital ikiz" terimleri çoğu kez birbirinin yerine kullanılmakta, veri akışının yönü, eşzamanlılık düzeyi ve modelin doğrulanabilirliği gibi ayırt edici ölçütler göz ardı edilmektedir. Bu kitap, söz konusu belirsizliği gidermeyi ve dijital ikizi pazarlama söyleminden arındırarak sağlam bir mühendislik disiplini olarak ele almayı temel hedeflerinden biri saymaktadır.

Elektrik-elektronik mühendisliği, dijital ikiz teknolojileri açısından ayrıcalıklı bir konumdadır. Bir yandan güç sistemleri, elektrik makineleri, güç elektroniği dönüştürücüleri ve haberleşme ağları gibi dijital ikizin en yoğun uygulandığı fiziksel sistemleri barındırır; öte yandan sensörler, gömülü sistemler, nesnelerin interneti altyapısı, sinyal işleme ve kontrol kuramı gibi dijital ikizi mümkün kılan teknolojilerin de kaynağıdır. Başka bir deyişle bu disiplin, dijital ikizin hem nesnesi hem de öznesidir. Akıllı şebekelerde gerçek zamanlı durum kestirimi, transformatör ve batarya sistemlerinde kalan ömür tahmini, elektrikli araç tahrik sistemlerinin döngüde donanım (HIL) testleri ve yarı iletken üretim süreçlerinin sanal izlenmesi, bu ikili niteliğin somut örnekleridir.

Kitap, bu çerçevede kuramsal temelden uygulamaya doğru ilerleyen bir yapıda kurgulanmıştır. İlk bölümlerde dijital ikizin tanımı, olgunluk düzeyleri ve referans mimarileri ele alınmakta; ardından fiziksel temelli modelleme, veri güdümlü yöntemler ve bu ikisini birleştiren hibrit yaklaşımlar incelenmektedir. Durum kestirimi ve Kalman filtreleme, model indirgeme,

belirsizlik nicelendirmesi ile model doğrulama ve geçerleme konularına özellikle yer verilmiştir; zira bir dijital ikizin değeri, gerçeği ne ölçüde ve hangi güven aralığında temsil ettiğiyle doğrudan ilişkilidir. Sonraki bölümlerde güç sistemleri, elektrik makineleri, güç elektroniği, yenilenebilir enerji ve depolama sistemleri, haberleşme ağları ile endüstriyel otomasyon alanlarındaki uygulamalar ayrıntılı olarak tartışılmaktadır. Son bölümlerde ise siber güvenlik, birlikte çalışabilirlik ve standartlar, hesaplama maliyeti ile yapay zekâ destekli otonom dijital ikizler gibi açık araştırma sorunlarına değinilmektedir.

Bu eser, öncelikle elektrik-elektronik, kontrol, enerji ve mekatronik mühendisliği alanlarındaki lisansüstü öğrenciler ile akademisyenler için hazırlanmıştır. Bununla birlikte, sanayide dijital dönüşüm projelerinde görev alan mühendislerin ve araştırma-geliştirme uzmanlarının da kitapta hem kuramsal bir dayanak hem de uygulamaya yönelik bir yol haritası bulacağı umulmaktadır. Okuyucunun temel devre teorisi, sinyaller ve sistemler ile olasılık kuramına aşina olduğu varsayılmış; daha ileri matematiksel araçlar ise ilgili bölümlerde gerektiği ölçüde sunulmuştur.

Dijital ikiz alanı hızla gelişmekte olup bugün geçerli kabul edilen pek çok yaklaşımın yakın gelecekte yeniden değerlendirilmesi kaçınılmazdır. Bu nedenle kitap, kesin yanıtlar sunmaktan çok, okuyucuya bu alanda eleştirel düşünebilmesi için gerekli kavramsal ve yöntemsel donanımı kazandırmayı amaçlamaktadır. Okuyuculardan gelecek her türlü eleştiri ve öneri, sonraki baskılara ışık tutacaktır.

Bu kitabı; hayatıma anlam katan oğlum **Melih** ve kızım **Gülşah** ile her zaman yanımda olan kardeşim **Talip Tören**'e ithaf ediyorum.

Kitabın hazırlanma sürecindeki değerli katkıları ve desteği için **Göktürk Öztürk**'e ayrıca içten teşekkürlerimi sunarım.

Editör

Doç. Dr. Murat TÖREN

2026

1. BÖLÜM

DİJİTAL İKİZLERİN TEMELLERİ

Mikail PÜRLÜ[1]

1. GİRİŞ

Dijital ikiz kavramı, literatürde tek ve ortak bir tanımı bulunmayan oldukça kapsamlı bir yapıya sahiptir; bu doğrultuda farklı kaynaklarda öne çıkan başlıca tanımlar aşağıdaki gibidir:

Tanım 1: Dijital ikiz, potansiyel veya gerçek, fiziksel olarak üretilmiş bir ürünü mikro atomik düzeyden makro geometrik düzeye kadar eksiksiz bir şekilde tanımlayan sanal bilgi yapıları kümesidir. En ideal durumda, fiziksel olarak üretilmiş bir ürünün incelenmesiyle elde edilebilecek her türlü bilgi, onun dijital ikizinden elde edilebilir. Dijital ikizler iki türdür: Dijital İkiz Prototipi ve Dijital İkiz Örneği. Dijital ikizler, bir Dijital İkiz Ortamında işletilir (Grieves ve Vickers, 2016).

Tanım 2: Dijital ikiz; gövde, tahrik ve enerji depolama, yaşam desteği, aviyonik, ısıl koruma vb. dahil olmak üzere bir veya daha fazla önemli ve birbirine bağımlı araç sistemini dikkate alabilecek kadar ultra gerçekçi olan; uçan ikizinin yaşam döngüsünü birebir yansıtmak amacıyla mevcut olan en iyi fiziksel modelleri, sensörlerdeki güncellemeleri, filonun geçmişi gibi bilgileri kullanan, imal edilmiş bir mekanizma veya yapının birleştirilmiş; çoklu fizik alanlarını, farklı ölçekleri ve stokastik süreçleri kapsayan benzetimidir.(Glaessgen ve Stargel, 2012).

Tanım 3: Dijital ikiz; çift yönlü veri alışverişi için tüm yaşam döngüsü boyunca fiziksel sisteme bağlı olan, bu sistemin sanal ve dinamik bir temsilidir (Trauer vd., 2020).

Tanım 4: Dijital ikiz; algılanan veriler, bağlı akıllı cihazlar, matematiksel modeller ve gerçek zamanlı veri işleme sayesinde sanal ve gerçek sistem arasındaki senkronizasyon ile karakterize edilen, farklı simülasyon

[1] Dr. Öğr. Üyesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü. ORCID: 0000-0002-1194-3931