

DİJİTAL İKİZLER UYGULAMADA

Daha Akıllı ve Dayanıklı Şehirler İçin Altyapının Dönüşümü

Bağlantılı modellerden yapay zekâ destekli, ajan tabanlı altyapı ikizlerine

Doç. Dr. Onur B. Tokdemir
İstanbul Teknik Üniversitesi • İnşaat Mühendisliği
İTÜ Yapay Zekâ Merkezi • Müdür Yardımcısı

Problemle başlayalım: 5.000 köprü, 12 kopuk sistem

Dijital ikiz problemi “veri eksikliği” değildir — eksik olan bağlantılı, güvenilir ve karara hazır bağlamdır.

Muayene PDF’leri

dönemsel, insan okur

BIM / CAD

geometri + tasarım amacı

IoT sensörleri

sürekli durum verisi

Trafik + hava durumu

dış etkiler ve yükler

Drone / LiDAR

gözlenen durum

Bakım kayıtları

işlemler + geçmiş

Soru: Bu sistemler sürekli olarak birbirinden öğrenseydi ne olurdu?

İki saatin sonunda neleri yanıtlayabileceğiz?

Eğitimi sekiz soru şekillendiriyor.

1

Dijital ikiz nedir?

2

BIM'den farkı nedir?

3

Hangi teknoloji yığını gerekir?

4

Sahadaki veri ikize nasıl ulaşır?

5

Simülasyon ve YZ nereye oturur?

6

Kentsel altyapıda nerede, nasıl uygulanıyor?

7

Sınırlar ve yönetim riskleri nelerdir?

8

Üretken YZ ve ajanlar alanı nasıl değiştiriyor?

BÖLÜM 1

Temeller

Tanımlar, ayrımlar ve olgunluk düzeyleri

20 dk

Dijital İkiz nedir?

“3B model = ikiz” anlayışını dışarıda bırakacak kadar güçlü bir tanım.

“Gerçek dünyadaki varlık ve süreçlerin; belirli bir sıklık ve aslına uygunlukta senkronize etkileşim içinde olan, bütünleşik ve veriye dayalı sanal temsili.”

Bütünleşik

modeller + veri + servisler

Senkronize

fiziksel ↔ dijital
güncelleme

Sıklık

durum ne sıklıkla
güncellenir

Aslına uygunluk

ne kadar doğru / ayrıntılı

Sonuç odaklı

bir kullanım amacı için
kurulur

Kaynak: Digital Twin Consortium tanımı (2026 erişimi); kavram ve terminoloji için ISO/IEC 30173:2023.

Ana fikir: senkronize fiziksel ve dijital dünyalar

Gözle → yorumla → öngör → karar ver → uygula → yeniden gözle.

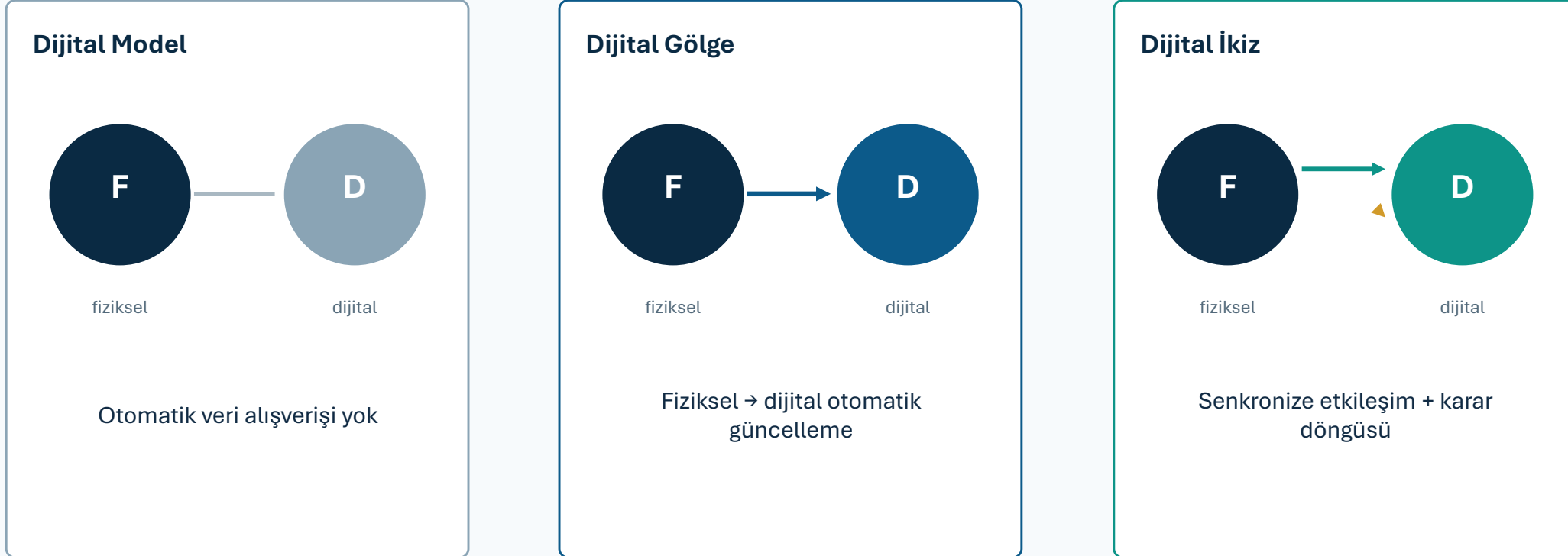


Kapalı döngü ≠ tam otonom

Döngüde bir insan onayı kapısı bulunabilir. “Döngüde insan” çoğu zaman doğru mühendislik tercihidir.

Dijital Model – Dijital Gölge – Dijital İkiz

Belirleyici olan bilgi akışının yönüdür.



Not: Terminoloji tüm çevrelerde tam olarak standartlaşmış değildir — kullandığınız tanımı her zaman açıkça belirtin.

BIM kendiliğinden bir Dijital İkiz değildir

BIM çoğunlukla ikizin içinde değerli bir temsil katmanıdır.

Boyut	BIM	DİJİTAL İKİZ
Temel amaç	Tasarım / bilgi yönetimi	İşletmeyi anlama + karar
Zaman davranışı	Çoğunlukla durum / sürüm bazlı	Sürekli veya dönemsel senkronize
Gerçek zamanlı veri	İsteğe bağlı	Kullanım amacı çoğunlukla gerektirir
Simülasyon	Mümkün	Çoğunlukla merkezî
Öngörü	Doğasında yok	Yaygın yetenek
Çift yönlü eylem	Doğasında yok	Dahil edilebilir
Tipik bağlam	Proje / varlık bilgisi	Sistemler sistemi + işletme bağlamı

BIM geometrik + anlamsal omurga olabilir — ancak ikiz ayrıca senkronizasyon, veri entegrasyonu, analitik ve bir karar süreci gerektirir.

Pratik bir Dijital İkiz olgunluk merdiveni

Yetenek düzeyini tartışmak için kullanışlı bir çerçeve; resmî bir ISO olgunluk standardı değildir.

Olgunluk düzeyi ancak kullanım amacı, maliyeti, karmaşıklığı ve riski haklı çıkarıyorsa artırılmalıdır.



BÖLÜM 2

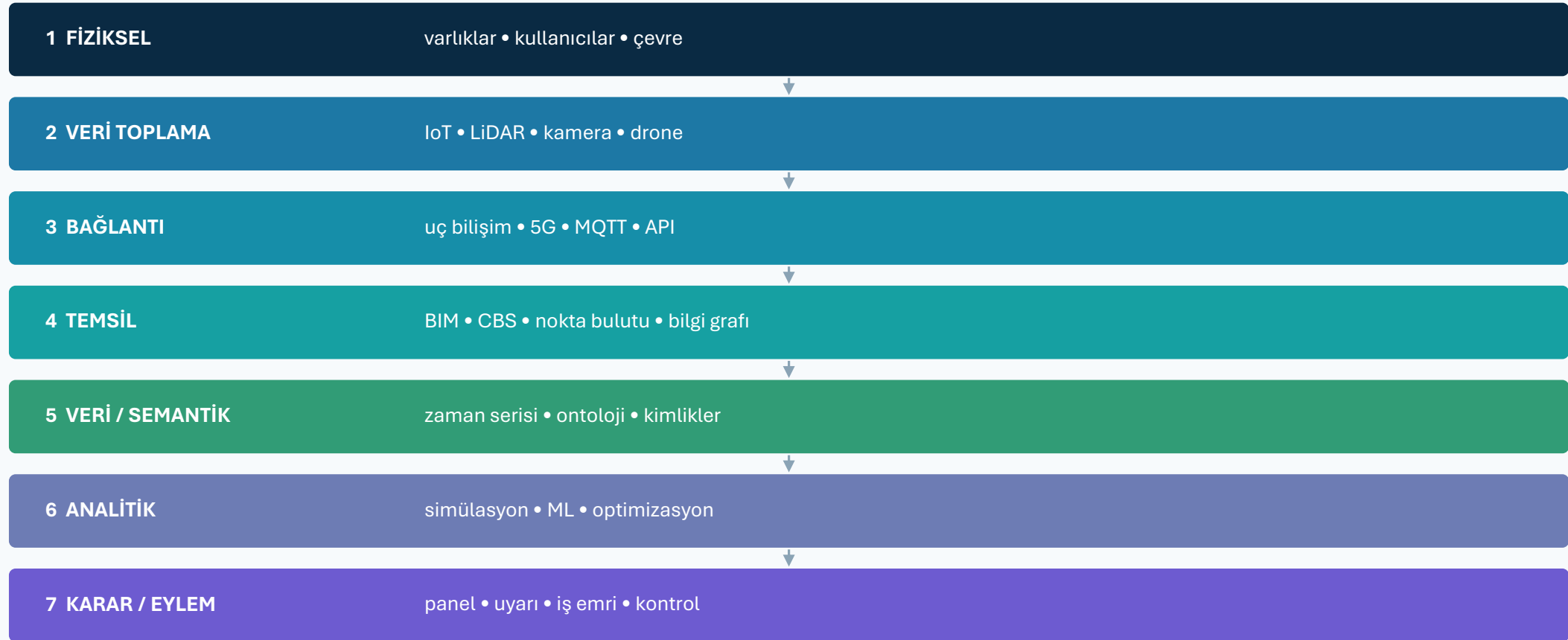
Mimari ve Temel Teknolojiler

Fiziksel dünya nasıl güvenilir ve karar verebilen bir dijital sisteme dönüşür?

20 dk

Referans mimari: yedi katman + geri besleme döngüsü

Eğitimin omurga şeması: her teknoloji bu katmanlardan birine oturur.



7. katman — Karar ve eylem: döngüyü güvenle kapatmak

Yararlı bir ikiz yalnızca bir paneli değil, bir kararı değiştirir.



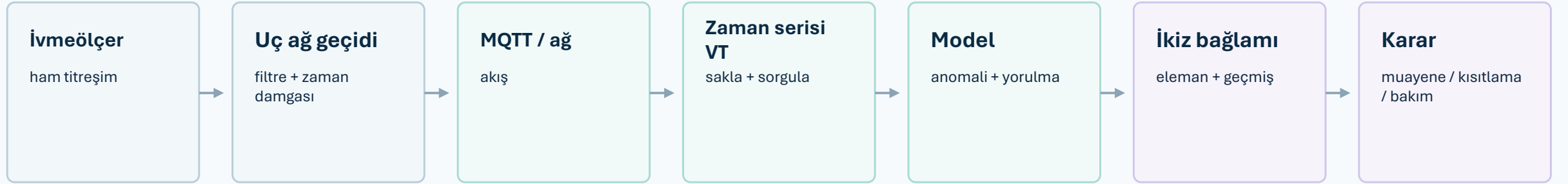
doğrulama, ikize yeni kanıt olarak geri döner

Tasarım gereği “döngüde insan”

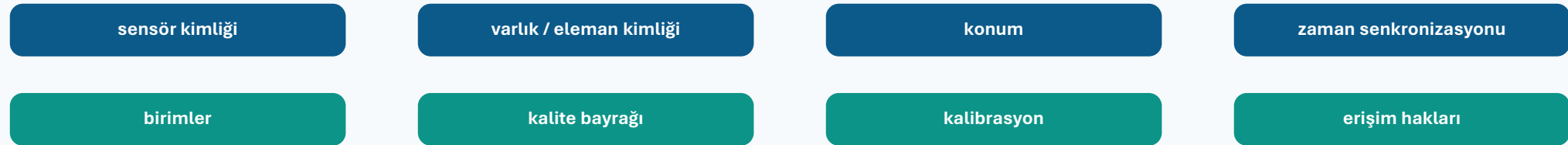
Emniyet açısından kritik altyapıda otonomi; yetki, güven düzeyi, politikalar ve emniyetli arıza kurallarıyla sınırlandırılmalıdır.

Somut örnek: bir köprü titreşim sinyalinin yolculuğu

Uçtan uca somut bir veri hattı.



Sinyalle birlikte taşınması gereken üstveri



Gerçeklik yakalama → Scan-to-BIM → Scan-to-Twin

Geometri yeniden üretilir; anlam ve varlık kimliği ise ayrıca eklenmelidir.



Bilgisayarlı görü neleri otomatikleştirebilir?

kusur tespiti • nesne tanıma • ilerleme karşılaştırma • değişim tespiti

Mühendisliğin yine de tanımlaması gerekenler

varlık hiyerarşisi • toleranslar • anlamsal içerik • kabul kriterleri

BÖLÜM 3

Altyapı Uygulamaları ve Vaka Çalışmaları

Yapım, işletme, kentsel sistemler, dayanıklılık ve güncel saha uygulamaları

40 dk

Şantiye Dijital İkizleri: planı, gerçeği ve riski karşılaştırmak

En yüksek değerli kullanım alanları çoğunlukla dar kapsamlı ve operasyondur.

İlerleme

4B iş programı + gerçeklik yakalama
planlanan – gerçekleşen

Kalite

BIM + tarama / görüntü
sapma + kusurlar

İSG

görü + konum + kurallar
tehlikeler + maruziyet

Lojistik

saha durumu + simülasyon
akışlar + vinç / sevkiyat

Maliyet / süre

üretim + iş programı verisi
tahmin + risk

Devreye alma

BYS + varlık verisi
işletmeye devir

İşletme ve bakım: dönemsel muayeneden duruma dayalı eyleme

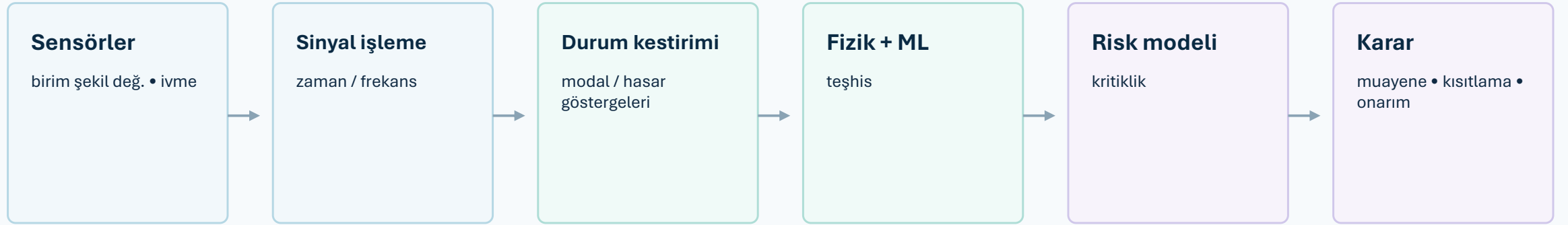
İkiz; neyin, ne zaman muayene edileceğine, bakıma alınacağına, kısıtlanacağına veya yenileneceğine karar vermeye yardımcı olmalıdır.

İzleme, varlık yönetimi kararlarına bağlandığında dijital ikizin değeri artar.



Yapı Sağlığı İzleme + Dijital İkiz

Dijital ikizler sensör anomalilerini yapısal anlama ve eyleme bağlar.



İkizin avantajı: güncel sinyalleri yapısal model, geçmiş davranış, bakım işlemleri ve çevresel bağlamla ilişkilendirmek.

Ulaşım ikizleri: ağlar, akışlar ve kontrol

Karayolu ve raylı sistem ikizleri fiziksel altyapıyı çoğunlukla hareketli aktörlerle birleştirir.

Trafik

hacim • hız • kuyruklar
sinyal / koridor optimizasyonu

Raylı sistem

hat • tren • tarife
kapasite + aksama

Yol varlıkları

üstyapı • köprüler • levhalar
bakım önceliklendirme

Bağlantılı araçlar

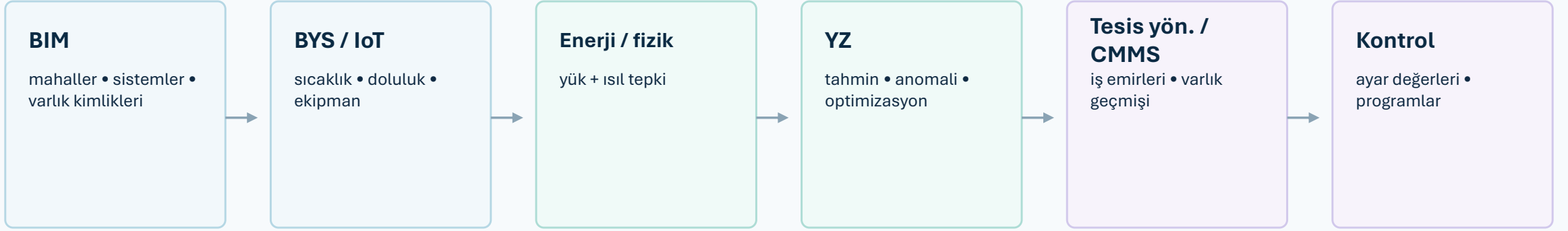
V2X • yörüngeler
güvenlik + simülasyon

Hava durumu

görüş • buzlanma • su baskını
operasyonel müdahale

Binalar ve tesisler: işletme ikizi $\neq$ BIM modeli

BIM yapıyı verir; BYS/IoT + analitik canlı işletmeyi verir.



Tipik değer

enerji optimizasyonu • arıza tespiti • kullanıcı konforu • bakım • iç hava kalitesi

Şebekeler: su, enerji ve yeraltı altyapısı

Temel temsil: ağ topolojisi + varlık durumu + talep.

Su

basınç • debi • kaçak
hidrolik simülasyon

Elektrik

yük • üretim • arızalar
güç akışı + şebeke durumu

Bölgesel enerji

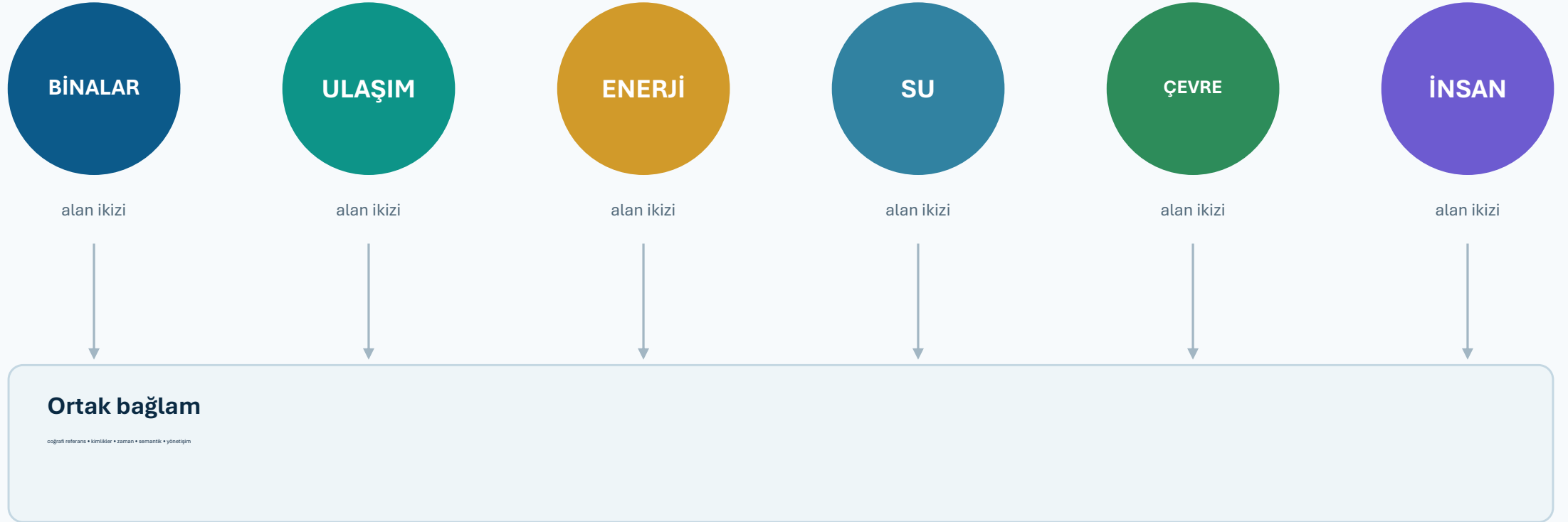
ısı akışlar
optimizasyon

Yeraltı varlıkları

konum • durum
kazi hasarını önleme + planlama

Kent ve kampüs ikizleri: mekânsal zekâ + çoklu alanlar

İkiz, birbirine bağlı alt sistem ikizlerinden oluşan bir ekosisteme dönüşür.



OGC kentsel dijital ikiz rehberi; altyapının, doğal çevrenin ve insan faaliyetlerinin birlikte çalışabilir coğrafi standartlarla bütünleştirilmesini vurgular.

Dayanıklılık ikizleri: tam olarak öngörülemeyen sarsıntılara hazırlık

İzle → sönümle → müdahale et → toparlan → öğren.



Kriz anında altyapı ikizinin değeri

ortak operasyon resmi • senaryo tahmini • zincirleme arıza analizi • kaynak tahsisi • olay sonrası öğrenme

Kavramsal çerçeve: Brucherseifer vd. (2021), kritik altyapı dayanıklılığı için dijital ikiz çerçevesi.

Vaka çalışması — Stavå Köprüsü, Norveç

IoT + dijital ikiz veri işlemenin hızlı teşhisi desteklediği gerçek bir köprü izleme vakası.

Fiziksel varlık

E6 üzerinde ~100 m betonarme kemer köprü

Veri

sürekli yapısal izleme / IoT sinyalleri

İkiz zekâsı

işlenmiş göstergeler + sanal muayene; fizik + ML

Karar

hızla gelişen anormal davranış tespit edildi; kapatma / teşhis kararı desteklendi

Ders

sürekli izleme önemlidir; ancak yorumlama + kurumsal tepki en az o kadar kritiktir

Hagen & Andersen (2024), *Structure and Infrastructure Engineering*, 20(7–8), 1242–1273. DOI: 10.1080/15732479.2024.2311911

Vaka çalışması — Punggol Dijital Bölgesi, Singapur

Bina sistemlerini ve işletme verilerini birbirine bağlayan bölge ölçeğinde bir yaşayan laboratuvar.

Bölge sistemleri

binalar • şebekeler • ulaşım

Açık Dijital Platform

sistemler arası veriyi
bütünleştirir

Dijital ikiz

mekânsal + operasyonel
görünüm

Tesis yöneticileri

gerçek zamanlı, işe yarar
içgörü

Yaşayan lab.

yeni hizmetleri dene ve
ölçekle

Temel ders: birlikte çalışabilirlik ve platform mimarisi, “akıllı bölge” uygulamalarının ön koşuludur.

Kaynak: JTC Singapore, Punggol Digital District Living Lab / Open Digital Platform belgeleri.

Vaka çalışması — Birleşik Krallık Ulusal Dijital İkiz Programı (NDTP)

2026'daki vurgu tek bir ulusal 3B model değil; federe, güvenli ve birlikte çalışabilir veri paylaşımıdır.

Federe düğümler

kontrol kurumlarda kalır

Güvenli paylaşım

politika + yetkilendirme

Açık kaynak

paylaşılan, kurulabilir bileşenler

Katalog

veri + referans setlerini keşfet

Gösterim projeleri

enerji • olaylar • zincirleme arızalar

Federasyon, altyapı ölçeğindeki ikizler için temel bir kalıp olarak öne çıkıyor.

Kaynak: UK NDTP Integration Architecture sayfası, geliştirme durumu güncellemesi, Mart 2026.

BÖLÜM 4

Yapay Zekâ ve Ajan Tabanlı İkizler

Betimlemeden öngörüye, akıl yürütmeye, orkestrasyona ve sınırlı otonomiye

20 dk

Yapay zekâ, ikizin yanıtlayabildiği soruları değiştiriyor

İlerleme “ne oldu?” sorusundan “bundan sonra ne yapılmalı?” sorusuna doğrudur.

BETİMLEYİCİ**Ne oluyor?**

izleme + KPI’lar

TEŞHİS EDİCİ**Neden oldu?**

kök neden + ilişkilendirme

KESTİRİMCİ**Ne olacak?**

tahmin + arıza riski

YÖNLENDİRİCİ**Ne yapmalıyız?**

optimizasyon + politika

AJAN TABANLI**Sistem planlayıp uygulayabilir mi?**

LLM / araç kullanımı / orkestrasyon

Otonomi, ancak güven düzeyi, yetki ve yönetim de onunla birlikte artıyorsa değer katar.

Altyapı ikizlerinde yapay zekâ araç kutusu

Yöntemi veri türüne, fiziğe ve karar ihtiyacına göre seçin.

Bilgisayarlı görü

çatlak • KKD • ilerleme

Zaman serisi ML

tahmin • anomali

Çizge sinir ağları

ağlar • topoloji

Fizik bilgili YZ

sınırlı veri + bilinen yasalar

Optimizasyon / RL

kontrol + çizelgeleme

Temel modeller

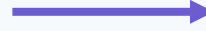
çok kipli akıl yürütme + arayüz

Üretken YZ bir Dijital İkize gerçekte ne katar?

Doğal dille etkileşim yalnızca yüzeydir.

Geleneksel ikiz

- paneller + filtreler
- sabit analitik hatları
- elle model seçimi
- ayrı doküman araması
- araçları insan koordine eder

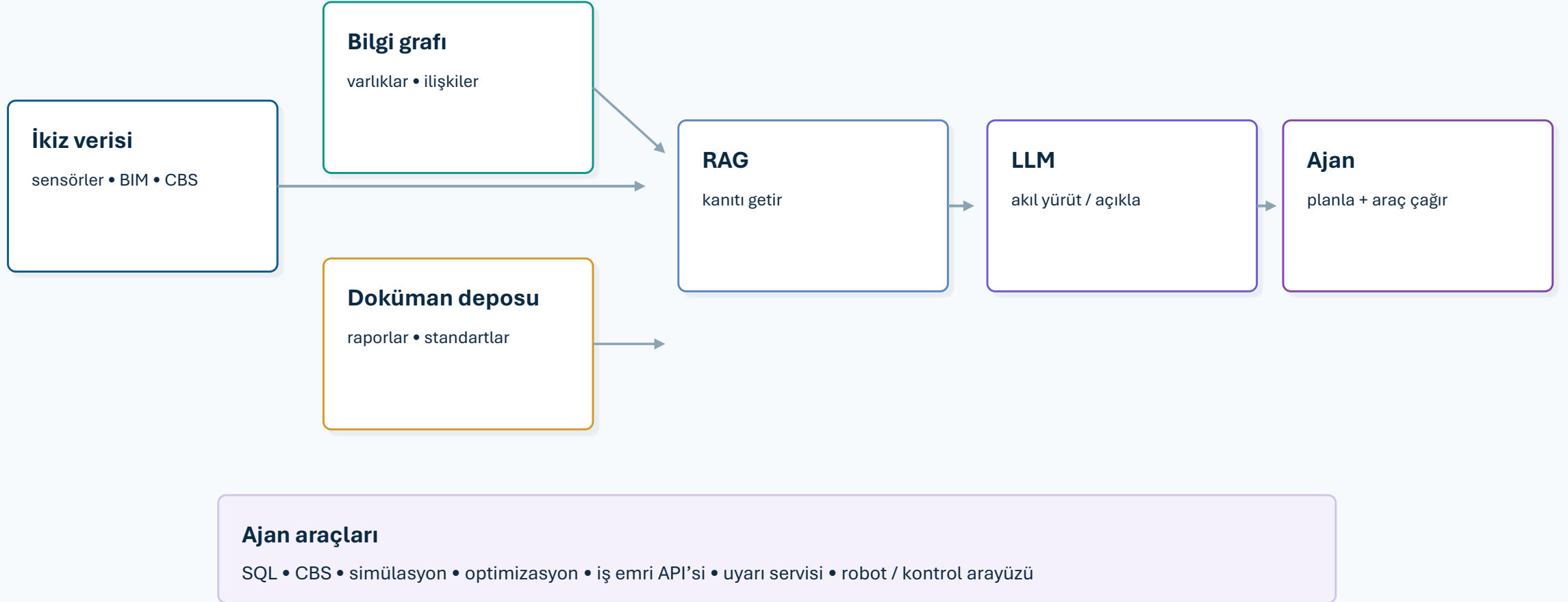


Üretken YZ destekli ikiz

- sohbet tabanlı sorgu
- güvenilir dokümanlar üzerinde RAG
- çok kipli yorumlama
- araç / simülatör orkestrasyonu
- senaryo üretimi
- otomatik açıklama

Yeni nesil yığın: İkiz + Bilgi Grafi + RAG + LLM + Ajan

Doğal dille yürüyen mühendislik iş akışları için pratik bir mimari.



Mühendisler sohbet edebilen bir ikize neler sorabilir?

Doğal dil; veriye, modellere ve kararlara açılan bir arayüze dönüşür.

“5 yıllık bozulma riski en yüksek köprüler hangileri?”

“3 No’lu ayaktaki titreşim dün neden arttı?”

“Son bakım işleminden sonra ne değişti?”

“Bütçe %15 kısılırsa hangi müdahaleler ötelenmeli?”

“Dün geceki depremden hangi varlıklar etkilendi?”

“Sel senaryosunu çalıştır ve kritik yol kapamalarını sırala.”

Ajan Tabanlı Dijital İkiz: denetimsiz otomasyon değil, sınırlı otonomi

Planla → getir → simüle et → değerlendir → onay iste → uygula → doğrula.



rol / yetki

güven eşiği

onaylı araçlar

denetim izi

emniyetli arıza durumu

siber kontroller

Yönetişimsiz otonomi, mühendislik olgunluğu değildir.

BÖLÜM 5

Standartlar, Güven ve Uygulama

Birlikte çalışabilirlik, siber güvenlik, yatırım getirisi ve hayata geçirmek için pratik bir yol

15 dk

Standartlar haritası: kontrol listesi değil, katman katman

Altyapı dijital ikizi yığınının tamamını tanımlayan tek bir standart yoktur.

Kavramlar

ISO/IEC 30173:2023
dijital ikiz terminolojisi

Bilgi yönetimi

ISO 19650 serisi
BIM bilgi yönetimi

OpenBIM

IFC 4.3
yol • ray • köprü • yapıları varlıklar

3B kent / CBS

OGC CityGML 3.0
anlamsal kent modelleri

Sensörler

OGC SensorThings API
gözlemler + IoT

Güvenlik

ISO 19650-5 + siber çerçeveler
güvenlik odaklı bilgi yönetimi

Kaynaklar: ISO; buildingSMART IFC 4.3 dokümantasyonu; OGC CityGML ve Kentsel Dijital İkiz rehberi.

Güvenilir ikizler: siber güvenlik, emniyet, mahremiyet ve model riski

İkiz gözlemlenebilirliği artırır — ama saldırı ve karar yüzeyini de genişletir.

Siber

kimlik • erişim • ağ ayrıştırma

Veri

kalite • köken • sahiplik

Model

doğrulama • belirsizlik • kayma

YZ

halüsinasyon • araç kötüye kullanımı • prompt enjeksiyonu

Emniyet

emniyetli arıza • insan müdahalesi

Denetim

kim, neye, hangi kanıtla karar verdi?

Mühendislik ilkesi: ikiz, fiziksel sistemin tolere edebileceğinden daha az emniyetli bir işletme durumu asla yaratmamalıdır.

Dijital İkiz projeleri neden başarısız olur?

Başarısızlıkların çoğu algoritmik olmadan önce kurumsal ve veri kaynaklıdır.

Sahipsiz kullanım amacı

kararı olmayan teknoloji gösterisi

Zayıf veri temeli

kimlik, kalite, geçmiş eksik

Entegrasyon maliyeti

eski sistemler + tedarikçiler

Belirsiz yatırım getirisi

değer ölçülmüyor

Aşırı modelleme

gereğinden fazla ayrıntı / kapsam

İşletme modeli yok

ikizi kim güncel tutacak?

Yetkinlik açığı

alan + veri + yazılım

Güven açığı

kullanıcılar çıktıları benimsemiyor

En iyi panzehir

Yüksek değeri tek bir kararla ve onaylaştırmak için gereken asgari veri/model yığınıyla başlamak.

Dijital İkiz ne zaman KURULMAMALI?

Doğru mühendislik çözümü bir veritabanı, bir panel veya dönemsel bir model olabilir.

- Varlığın durumu yavaş değişiyor ve yıllık güncelleme yeterli.
- Daha sık veri, kararı iyileştirmiyor.
- Veri kalitesi güvenilir çıkarım yapmaya elvermiyor.
- Beklenen değer, yaşam döngüsü işletme maliyetinden düşük.
- Daha basit bir izleme veya analitik sistemi sorunu çözüyor.

Dijital ikiz bir mimari tercihtir — proje hedefi değildir.

Beş çıkarım

Eğitimin tek slaytlık özeti.

1

Dijital İkiz bir 3B modelden fazlasıdır.

2

Senkronizasyon ve kimlik, veriyi yaşayan bir temsile dönüştürür.

3

Simülasyon + YZ, izlemeyi öngörüye ve yönlendirmeye taşır.

4

Birlikte çalışabilirlik ve yönetim en az görselleştirme kadar önemlidir.

5

Ufuk; federe, sohbet edebilen ve ajan tabanlı ikizlere doğru ilerliyor — sınırlı otonomiyle.

İstanbul ölçeğinde bir kentin Dijital İkizini kurmak için ne gerekir?

ortak kimlikler

BIM + CBS birlikte çalışabilirliği

sensör + dış veri

federe yönetim

siber güvenlik + mahremiyet

simülasyon + YZ

kurumsal sahiplik

kamusal değer

En zor problem çoğunlukla 3B model değildir.