

İSTON A.Ş. - RİKLİ TEKNOLOJİLERİ MÜDÜRLÜĞÜ - TUZLA ÜRETİM TESİSİ - İSTANBUL BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ

Beton Boru Kürleme Odaları için Gerçek Zamanlı IoT Destekli 3B Dijital İkiz

Kâğıt tabanlı kür takibinden otomatik sapma tespitine – pilot uygulama: Tuzla Üretim Tesisi, Tuzla 1 Beton Boru Fabrikası

PROJE SÖZMENSİ	PILOT TESİSİ	ODA GEOMETRİSİ	KAPSAM	ÖLÇÜM DÜĞÜMÜ	ÖLÇÜLEN BÜYÜKLÜK
02.08 – 30.09.2026	Tuzla 1 Beton Boru Fabrikası	109 × 13 × 5 m	17 oda × 2 nokta	34 adet	Sıcaklık - Nem - Basınç

01 Özet

İSTON'un beton boru üretiminde kullanılan buharlı kür odalarında sıcaklık takibi bugün **kâğıt** formlar üzerinden, operatörün periyodik elle okumasıyla yürütülmektedir.

Bu çalışmada kür odasının ortam koşullarını (sıcaklık, bağıl nem, basınç) sürekli ölçen bir IoT ölçüm ağı kurulmuş; ölçümlerin odanın **gerçek ölçülerinde modellenmiş, gözlemler bir 3B dijital ikiz** üzerinde ve ayrı bir izleme panelinde canlı olarak gösterilmiştir.

Sistem, kür reçetesinin zaman-sıcaklık tolerans bandını dijital ortamda otomatik karşılaştırır; sapma hâlinde görsel ve sesli alarm üretir; operatörü buhar vanasına müdahaleye yönlendirir.

Çalışma, **İSTON Tuzla Üretim Tesisi bünyesindeki Tuzla 1 Beton Boru Fabrikası'nın kürleme odalarında** pilot olarak gerçekleştirilmiştir. Fabrikadaki **17 kürleme odasında** oda başına 2 bağımsız ölçüm noktası (toplam 34 düğüm) olacak biçimde yaygınlaştırılmış izlere tasarlanmıştır.

02 Problem – Mevcut Durum

Operatör, kür süresince belirli aralıklarla odaya gidip sıcaklığı okur ve form üzerindeki n.d.n-İdeal1-maks eğrisiyle elle karşılaştırır.

BÜYÜK – KÂĞIT FORM

- Ölçüm yalnız operatörün turnada; aralarda kür nokta
- Okuma ve yazım hatası, okunaksızlık kayıtlı riski
- Sapma ancak bir sonraki turna fark edilir
- Uzaktan görünürlük yok
- Parti badi dijital kayıt ve izlenebilirlik yok
- Gerçek zamanlı analiz (enerji, frek) yapılamaz

DİJİTAL İKİZ İLE

- Kesintisiz otomatik ölçüm, iki bağımsız noktadan
- Ölçüm anında kalibre, kayıt makine üretimi
- Sapma saniyeler içinde alarm döndürür
- 17 oda tek ekrandan, uzaktan izlenir
- Zaman damgası, dışa aktarılabilir kür kaydı
- Zaman serisi veritabanı üzerinde analiz

Kritik nokta: Buharlı kürde hata gelir alınmaz. İztime hızı aşılmaz beton mikro çatlar; kür eliks kalırsa hedef mukavemete ulaşılmaz. Her iki durumda da sonuç fire olarak üretim sonunda görülür.

03 Amaç ve Hedefler

- Kür odası ortam koşullarını **kesintisiz ve otomatik** ölçmek; operatörün fiziksel turna bağımlılığı kaldırmak.
- Kür reçetesinin tolerans bandından sapmayı **saniyeler içinde** tespit edip görsel + sesli alarmla dönüştürmek.
- Kâğıt formu, parti bazında **zaman damgası ve dışa aktarılabilir dijital kayıta** dönüştürmek.
- Ölçümü konumuyla birlikte anılgılar kılmak: **yeniy 3B dijital ikiz** üzerinde, sensörün gerçek yerinde göstermek.
- Enerji tüketimi ve fire analizi için **zaman serisi veri altyapısı** kurmak.
- 17 odaya yaygınlaştırılabilir, **tek tip ve düşük maliyetli** bir ölçüm düğümü tasarlamak.

Başarı ölçütleri

Sapma tespit gecikmesi	< 10 sn
Ölçüm periyodu	10 sn
Veri kaybı (bağımlı kesintisizlik)	0 (yazılım ile)
Oda başına ölçüm noktası	2 (bağımlı)

04 Ölçüm Zinciri

Denetleyici: ESP32-C6-DevKitC-1 – RISC-V çekirdek, Wi-Fi 6 (802.11ax), dahili 3V3 regülatör

Sensör: Bosch BME280 – tek gövdede sıcaklık, bağıl nem ve basınç; I²C, adres 0x76

Arayış: I²C standart mod, 100 kHz; 4.7 kΩ pull-up

Mühürleşme: Düğüm IP65 pano – sensör başlığı IP67 + PTFE membran

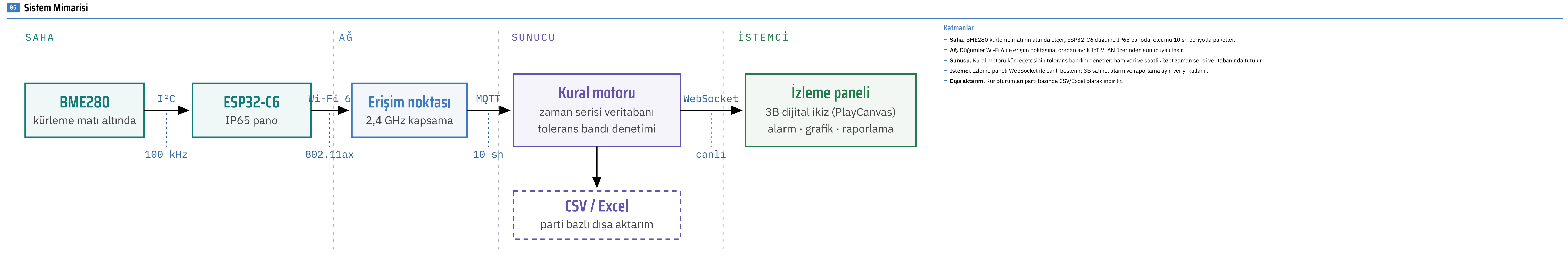
Sensör doğrulama

Arayış	AAALIX	Notlar
Sıcaklık	~40 ... +85 °C	10, 5 °C
Bağıl nem	0 ... 100 % RH	e3 % RH
Basınç	380 ... 1180 hPa	e1 hPa

Çalışma aralığı sınırları: BME280'nin belirlenen sıcaklık aralığı: +85 °C'den; 60-70 °C plato hedefiyle sensör aralığı içinde kalır; daha yüksek sıcaklık ölçümleri odasında sıcaklık ölçümü için ayrıca PT100/PT1000 veya K tipi termokuplajı eklenmesi önerilir.

Düğüm yazılım

- Sensör-focced mod'la, 10 sn periyotta okunur; ölçümler arasında denetleyici uyku moduna geçer.
- Donanım watchdog'ı askıda kalan düğümü kendiliğinden yeniden başlatır; durum LED'i sahâ personeline bağımlıyı gösterir.



Şekil 1 – Ölçümlerin ekranı yerli yolu. Sensör verisi düğümde toplanır, yerel ağ üzerinden sunucuya sevkılır; tolerans denetimi sunucuda yapılır, sonuç istemciye canlı olarak iletir.

06 Elektrik Devre Tasarımı

Topoloji karar – her ölçüm noktası kendi düğümüne sahiptir: **17 oda × 2 nokta = 34 bağımsız düğüm**. 109 m uzunluğundaki odada iki ölçüm noktası yaklaşık 55 m aralığı konumlanır. I²C yer yolu bu mesafeyi kalmaz; NXP UM10204'e göre yerli yolu kapasitesi 400 pF ile sınırlıdır. Aynı düğüm ile **I²C kablolu 1-3 m'de kalır**, tek düğüm arızası odayı tamamen kör etmez ve kablolu bağlantıdır. Değerlendirilen alternatifler: oda başına tek denetleyici + iki BME280 (0x76/0x77) – PB2B715 hatı geçirilirdi gerektirir; ve RS-485/Modbus RTU omurga – gürlülüğe bağımlılığı en yüksek, karmaşıklık en fazla.

Baglantı listesi

230 VAC (L) --F1(T500mA)----	PSUI (L)
230 VAC (N) -----	PSUI (N)
Rv1 (S14K275) : L - N arası	
PE : pano masi + kablo ekranı (tek uc)	
PSUI (+5V) --F2(PTC S804A)----	D1 (SMB35.0A) --> GND
	C1 (470µF/16V) --> GND
	C2 (100µF) --> GND
	ESP32-C6 (V+) --> ESP32-C6 (V+)
PSUI (GND) -----	ESP32-C6 (GND)
ESP32-C6 (3V3) ----	R1 (4k7) --> SDA hattı
	R2 (4k7) --> SCL hattı
	BME280 (VDD) -- C3 (100µF) --> GND
ESP32-C6 (GPIO6/SDA) --	ekranlı kablo -- BME280 (SDA)
ESP32-C6 (GPIO7/SCL) --	ekranlı kablo -- BME280 (SCL)
ESP32-C6 (GND) -----	ekranlı kablo -- BME280 (GND)
BME280 (SDO) --> GND	(I2C adresi 0x76)
BME280 (CSB) --> VDD	(I2C modu seçici)
ESP32-C6 (GPIO8) --	R3 (330Ω) -- LED1 --> GND
ESP32-C6 (EN) --	R4 (10k) pull-up --> 3V3
ESP32-C6 (EN) --	C4 (100µF) --> GND

Tasarım notları

- I²C bus 100 kHz** standart modı seçilir; 1-3 m ekranlı kablolu kare bacaklı masası ve yarısayı 5mfar, 4.7kΩ pull-up ile yerli yolu 400 pF sınırnın altında kalır.
- Kablo ekranı tek uçtan** (pano tarafında PE) ye bağlanır – toprak döngüsü oluşmaz.
- PTFE membranı IP67 kılıf**: membran su damlacığı geçirmez, su buharını geçirir. Nem eleman yağmardan korunmuş ölçüm süres.
- Kendinden ısınma düzeltilmesi:** BME280 focced mod'la, düşük tekrarlama oranıyla okunur; sürekli ölçümün getirdiği kendini ısınma sapması azalır.
- EN ucuyla devreye** (V+ + C4) besleme yüklenirken denetleyicinin güvenli kalmasını sağlar.
- Alternatif besleme:** 230 V hattı bulunmayan noktalarda PoE ayrıca (802.3af – 5 V) veya 18650 + TP4050 uyur.

Şekil 2 – Ölçüm düğümü: besleme, koruma ve I²C sensör arayışı. Şebeke hattı ile düğüm arasında galvanik ayırım SMDP'nin kendi izolasyonuyla sağlanır; sinyal hatlarında ek izolasyonu gerek yoktur.

07 Ağ Topolojisi – 34 Düğümün Sisteme Bağlanması

Her ölçüm noktası kendi ESP32-C6 düğümüne sahiptir: **17 oda × 2 nokta = 34 düğüm** aynı anda ve birbirinden bağımsız yayın yapar. Odalar kapsama açısından **dört bölgeye** ayrılmış, her bölge bir endüstriyel erişim noktasıyla kapsanmıştır. Düğümler üretim ağına değil, **ayrık bir IoT VLAN'ına** bağlanır ve yalnızca MQTT aracınıyla erişilebilir.

Adresleme ve veri yolu

Düğüm adı	KD-07-52 – Kürleme Odası 07, Sensör 2
MQTT konumu	15cm/17x24x15cm/07-52/İzlem
Vpn	250Kb/s düğüm bant genişliği; sıcaklık, nem, basınç, açılışları belli geçen süre
Periyot	10 sn - düğüm başına 8.640 kayıt/gün
Adres	DHCP rezervasyonu – MAC – oda eşleşmesi sabit

Dağılımlılık

- Bağımlılık:** Bir düğümün arızası yalnız kendi noktasını kör eder; odanın ikinci düğümü ölçmeye devam eder.
- Kesintisiz veri kaydı:** Wi-Fi veya arızalı denetleyicinin yedek kopyasında saklar, bağımlı oluncaya toplu gönderir.
- Ağ ayırımı:** IoT VLAN üretimi ve off-ağdan ayırılır; düğümler yalnız arızanın portuna erişebilir.
- Besleme:** Erişim noktaları PoE ile anahtarlanır; anahtar ve sunucu UPS arkasındadır.
- İzlenebilirlik:** Düğümün son gözlemleri zaman panelde tutulur; sensör kulan düğüm yayın iletir.

Yaygınlaştırılma yaklaşımı

Pilot, **Tuzla 1 Beton Boru Fabrikası'nın** kurulu; düğüm tasarımı **tek tip**dir: aynı kart, aynı pano, aynı yazılım. Bir odanın devreye alınması; panonun montajı, iki sensör başlığının mat alına yerleştirilmesi ve düğümlerin ağa tanımlanmasını içerir.

Odalar **arayış devreye** alınıp; her oda kendi kür oturumunu bağımsız yürütür. Bölgeye üretim durdurulmadan oda oda ölçülür yapılabilir ve pilot odada doğrulanmış reçete diğerlerine kopyalanır.

Ölçek: 34 düğüm, 10 sn periyotta günde = 294.000 kayıt iletir. Ham veri kısa süre tutulur; saatlik ilet uzun süreli arşivi oluşturur.

Şekil 3 – 34 ölçüm düğümünün erişim noktaları, PoE anahtar ve uygulama sunucusu üzerinden izleme paneline bağlanır. Her odada iki bağımsız düğüm (S1, S2) bulunur.

08 Sensör Yerleşimi ve Oda Geometrisi

09 Kür Profili ve Sapma Algoritması

10 Malzeme Listesi

Ölçüm düğümü başına × 34	denetleyici kartı	1
ESP32-C6-DevKitC-1		1
BME280	sensör modülü, I ² C	1
PSUI	SMPS 230 VAC – 5 V / 2 A	1
F1	cam sigorta T500 mA + yuva	1
Rv1	varistör S14K275	1
F2	PTC 500 mA	1
D1	TVS diyet SMB35.0A	1
C1	470 µF / 16 V	1
C2, C3, C4	100 nF seramik	3
R1, R2	4.7 kΩ pull-up	2
R3, R4	330 Ω - 10 kΩ	2
LED1	3 mm durum LED'i	1
Kablo	ekranlı 4 × 0.22 mm ²	3 m
Pano	IP65 kutu + rakor + klemens	1 k
Bağlık	IP67 kılıf + PTFE membran	1
Montaj	kelekepe, kanal, etiket	1 k

Tesis geneli altyapı

MI-F1 AP	endüstriyel, 2.4 GHz kapsama	kapsamaya göre
Switch	PoE + ağ kablolaması	1 k
Sunucu	web + zaman serisi veritabanı	1
UPS	kesintisiz güç kaynağı	1

11 3B Dijital İkiz ve İzleme Paneli

3B SAHA **Görüşölümü** – Odaanın gerçek ölçülerinde modellenmiş sahâ. Zemindaki kılınlar sensörlerin gerçek konumunu gösterir; etkileşim canlı değeri taşıy.

İzleme paneli – gözlemler, ölçüm kartı, kürlenme oturumu denetimi ve 3B sahâ.

Kürleme oturumu – geçen süre, hedef aralık, ölçülen değeri, sapma sayısı ve tolerans bandı.

Sapma aralığı kritik yazı: Operatör uyarıya müdahale eder; olay kayıtlı geçer.

12 Ön Bulgular

Projenin analiz çalışmaları sürmektedir. Bu aşamada elde edilen gözlemler aşağıdadır.

- Pilot odada canlı izleme ve otomatik alarm çalışır durumda doğrulanmıştır.
- Daha kaliteli ürün elde edildiği ve fire olan ürün sayısının azaldığı gözlemlenmiştir.
- Enerji tasarrufu hesaplaması çalışmaları sürdürülmektedir.
- Kür oturumları parti adıyla kayda geçmeye başlamış; kâğıt forma göre ölçüm sıkılığı ve süreklilikte belirgin biçimde artmıştır.
- Sayısal iyileşme oranları, yeterli sayıda kür oturumu biriktikten sonra raporlanacaktır. Bir posterdeki bulguları **ölçümlü nihai sonuç değil, ön gözlemler**.

13 Kazanımlar

- Kâğıt form ve manuel okuma ortadan kalkar; **kayıtlı kayıtlı ve okunaksızlık riski sıfırlanır**.
- Sapma tespiti bir sonraki operatör turnadan **saniyeler içinde** iner.
- Parti bazında dijital, zaman damgası ve dışa aktarılabilir **kür kaydı** olur – kalite dokümantasyonu ve izlenebilirlik.
- 17 oda **tek ekrandan ve uzaktan eş zamanlı** izlenir.
- Zaman serisi veritabanı üzerinde **gerçek zamanlı analiz** mümkün olur; enerji, fire, eşleşme, iyileşme.
- 3B dijital ikiz sayesinde sahâ denetimi olmayan personel de **ölçümün konumunu doğru** yorumlar.
- Düğüm tasarımı tek tip ve **yaygın bileşenlerden** kurulur; yedek parça ve bakım basittir.

Öngörülen kazanımlar

- Enerji tasarrufu.** Buhar vanası, profil tamamladığı anda kapatılır; "ne olur ne olmaz" diye uzatılan kür süresi ortadan kalkar. Plato sıcaklığının hedefine üstüne çıkması da anında görüldüğü için **gereksiz buhar** üretimi ve buna bağlı yakıt tüketimi azalır.
- Fire azalması.** İztime hızı aynı ya da eliks kür, üretim sonunda değil **oluşturduğu anda** yakalanır ve düzeltilir. Böylece hem mikro çatık kaynaklı ret, hem de hedef mukavemete ulaşamayan parti sayısı düşer.
- Her iki kazanım da **parti badi kür kaydı** üzerinden ölçülebilir hâle gelir: buhar verilen süre ile fire oran aynı veri tabanında eşleştirilir.

Bu üç maddede **beklenen kazanımlar**, sayısal doğrulama, yeterli sayıda kür oturumu biriktikten sonra yapılabilecektir (Bkz. 12).

14 Gelecek Çalışmalar

- Olgunluk (maturity) indeksi:** Nurse-Saul yöntemi ve ASTM C1074 ile yerinde mukavemet tahmini – kalıp alma zamanının optimizasyonu.
- Kapalı çevrim kontrol:** buhar vanasının otomatik (PID) kontrolü; bugün müdahale operatör onaylıdır.
- 17 odanın tamamına yaygınlaştırma ve **tesis geneli 3B** düğümün.
- Yüksek sıcaklık noktaları için **PT100 / termokuplaj** ile ikinci ölçüm zinciri.
- Zaman serisi üzerinde **anomalî tespiti ve kestirimci bakım**.
- ERP / üretim sistemi ile **parti eşleştirme**.
- Wi-Fi kapsaması yazılı noktaları için **LoRaWAN veya PoE** alternatifi.

15 Kaynaklar	16 Kaynaklar	17 Kaynaklar	18 Kaynaklar	19 Kaynaklar	20 Kaynaklar
1 TS EN 1916 – Beton, betona ve öngerilmeli beton borular ve bağlantı parçaları.	2 ACI 517.2R – Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure. American Concrete Institute.	3 BSch Sensorset – BME280 Combined Humidity and Pressure Sensor, Datasheet Rev. 1.23.	4 ASTM C1074 – Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method.	5 NXP Semiconductors – UM10204, I ² C-bus Specification and User Manual, Rev. 7.	6 PlayCanvas – WebGL Engine, Developer Documentation.

PROJE	ÇİZİM NO	TESİS	TARİH	REV	HAZIRLAYAN
Kürleme Odası Dijital İkiz	IST-KOI-P01	Tuzla 1 Beton Boru Fabrikası	08.09.2026	RO	İSTON A.Ş. – Bilgi Teknolojileri Müdürlüğü