



DIGITÁLIS IKER LÉTREHOZÁSA ÉPÍTMÉNYINFORMÁCIÓS MODELLEZÉssel ÉS IOT-SZENZORHÁLÓZAT-INTEGRÁCIÓVAL

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN USING BUILDING INFORMATION MODELING AND IOT SENSOR NETWORK INTEGRATION

Máder Patrik Márk,¹ Bakai Nándor,² Jászberényi Tünde,³ Simon Dóra Erika,⁴ Rák Olivér,⁵ Etlinger József,⁶ Zagorács Márk Balázs⁷

Pécsi Tudományegyetem, Műszaki és Informatikai kar, Mérnöki és Smart Technológiák Intézet, Mérnöki Ismeretek Tanszék, BIM Skills lab kutatócsoport, Breuer Marcel Doktori Iskola, Pécs, Magyarország

¹mader.patrik@mik.pte.hu; ²bakai.nandor@mik.pte.hu; ³jaszberenyi.tunde@mik.pte.hu

⁴simon.dora@mik.pte.hu; ⁵rak.oliver@mik.pte.hu; ⁶etlinger.jozsef@mik.pte.hu; ⁷agoracz.mark@mik.pte.hu

Abstract

The construction industry has been undergoing significant transformation in recent years, largely driven by the rapid advancement and widespread adoption of Building Information Modeling (BIM) and Internet of Things (IoT) technologies. BIM encompasses intelligent 3D modeling methods and management processes that enable the comprehensive planning, documentation, and management of buildings throughout their entire lifecycle. IoT technologies, through the deployment of sensor networks, allow for real-time monitoring, data collection, and analysis of buildings and their environments. A high-level integration of Building Information Modeling (BIM) and Internet of Things (IoT) technologies can be achieved through the implementation of a Digital Twin framework.

Keywords: digital twin, Building Information Modelling (BIM), Internet of Things (IoT), ESP32, MQTT.

Összefoglalás

Az építőipar digitalizációja jelentős átalakuláson megy keresztül az utóbbi években az építményinformációs modellezés (BIM) és a „dolgok internete” (IoT)-technológiák gyors ütemű fejlődésének és elterjedésének köszönhetően is. A BIM olyan intelligens, 3D-modellezési, módszertani és menedzsmenteljárásokat tartalmaz, amelyek lehetővé teszik az épületek teljes életciklusának részletes tervezését, dokumentálását és kezelését. Az IoT-technológia pedig különböző érzékelők és szenzorok hálózatának létrehozásával lehetőséget ad az épületek és azok környezete valós idejű monitorozására, adatgyűjtésre és elemzésére. A két terület integrációja magas szinten valósítható meg a digitális iker koncepcióján keresztül.

Kulcsszavak: digitális iker, építményinformációs modellezés (BIM), dolgok internete (IoT), ESP32, MQTT.

1. Bevezetés

A BIM és az IoT integrációja lehetőséget teremt arra, hogy az épületek tervezése, kivitelezése és üzemeltetése során valós idejű adatokat használjunk fel a modellalapú döntéshozatalok során, és akár valós időben követhessük az épületek működését. Ezzel növelhető az épületek hatékonysága,

biztonsága, fenntarthatósága, valamint kiszámíthatóbbá, átláthatóbbá és kalkulálhatóbbá tehető az épület építésének, üzemelésének és üzemeltetésének költségei. A két technológia együttes alkalmazásaként a digital twin új lehetőségeket nyit a létesítményüzemeltetés területén.

1.1. Célok

A kutatásfejlesztési és innovációs projekt fő célja, hogy a BIM- (a projekt jelenlegi fázisában elsődlegesen „Closed BIM”) és IoT-technológiák előnyeit építőipari szemléletmód alapján egye- sítse, és létjogosultságát, használhatóságát alá- támassza a digital twin lehetőségeit figyelembe véve.

Számos esetben törekvés a „Closed BIM”-rend- szerek teljes életciklusban való alkalmazása [1, 2, 3], azonban tényleges megvalósítása jelenleg kompromisszumokhoz kötött [4]. Az állományok hosszú távú tárolásának és hozzáférhetőségének kérdésében is jelentkezhetnek problémák [5]. Az IoT-eszközökkel történő összekapcsolás és moni- torozás pedig ezekben a zárt környezetekben még több kérdést és áthidalandó technikai nehézséget vet fel [6, 7, 8]. Viszont ezek ellenére az alkalma- zási lehetőségek szerteágazóak lehetnek, főleg a korszerű technológiák alkalmazása mellett [9].

Ezért a projekt egy olyan integrált módszertan és rendszer lehetőségének vizsgálatára, valamint kialakítására fókuszál, amely az elérhető megol- dásoktól és kutatásoktól eltérően a BIM-modellt nem csupán monitoring és vizualizáció céljá- ra használja. A megközelítés az Autodesk Revit szoftverrel létrehozott BIM-modellel és az IoT-szenzorok valós idejű adatainak egyesítésé- re, irányítására épül, egy központi digitális iker modell keretei között. A cél egy olyan megoldás koncepciójának kialakítása és tesztelése, amely lehetővé teszi a valós objektumok és a digitális modellek logikai összekapcsolását, ezáltal valós idejű információkat biztosítva az épületek műkö- déséről és állapotáról a natív modellekben.

1.2 MQTT-szabvány és -protokoll

Fontos kiemelni a projekt kulcsfontosságú pont- ját, amely a helyes adattovábbítási, kommuni- kációs metódus alkalmazása. Ennek alapját az MQTT- (Message Queuing Telemetry Transport) protokoll jelenti. Az MQTT egy kliens-szerver ar- chitektúrára épülő, közzététel-feliratkozás elvű üzenetküldési protokoll, amelyet kifejezetten alacsony erőforrás-igényű és korlátozott hálózati környezetekre terveztek. Minimális adatforgalma és könnyű implementálhatósága miatt különösen alkalmas gépek közötti kommunikációra (M2M) és az IoT-rendszerekben való alkalmazásra [10].

A protokoll megbízható, sorrendtartó és kétirá- nyú kapcsolatot biztosító szállítási rétegre épül (tipikusan TCP/IP). Továbbá független az átvitt üzenetek tartalmától, ezért rugalmasan alkal- mazható különböző adattípusok továbbítására is.

A közzététel-feliratkozás kommunikációs modell lehetővé teszi az egységek könnyű csatolását, és jól skálázható rendszerek kialakítását támogatja. A protokoll tervezése során kiemelt szempont- ként tekintettek a hálózati forgalom minimalizá- lására is [10].

Az IoT-alapú épületüzemeltetési rendszerekben az MQTT-protokoll különösen előnyös kommu- nikációs megoldást kínál, mivel számos különfé- le szenzort és beavatkozási eszközt szükséges egy rendszerbe integrálni. Az ilyen rendszerekben jellemzően folyamatos adatgyűjtés történik pél- dául hőmérséklet-, páratartalom-, levegőminő- ség-, energiafogyasztás- vagy jelenlétértekek for- májában, amelyek továbbítása gyakran alacsony sávszélességű, időszakosan instabil hálózatokon valósul meg. Az MQTT-protokoll lehetővé teszi, hogy az adatátvitel minimális hálózati és energia- igény mellett is megbízhatóan működjön [11, 12].

A közzététel-feliratkozás modell az épületüze- meltetés szempontjából különösen kedvező, mi- vel lehetővé teszi az adatforrások (szenzorok) és az adatfeldolgozók (például felügyeleti rendsze- rek, digitális iker, BIM-alapú vizualizációk, au- tomatizált szabályozó algoritmusok) funkcionális szétválasztását. Ez elősegíti a rendszer modula- ritását, skálázhatóságát és hosszú távú bővíthetősé- gét, ami mindig kritikus szempont komplex épü- letüzemeltetési környezetekben [13].

Összességében az MQTT jól illeszkedik az okos- épületek és komplex szenzorhálózatok architek- turális követelményeihez. Támogatja a valós idejű adatáramlást, a megbízható eszköz-felhő-eszköz kommunikációt, valamint az üzemeltetési dön- téstámogató rendszerek hatékony kiszolgálását.

2. Koncepció, kialakítás, felépítés

Az előbbieket és az előzetes kutatásfejlesztési eredményeinket figyelembe véve az alábbi főbb területek kerültek azonosításra jelenlegi és jövő- beli fejlesztési célterületekként:

- Valós idejű adatgyűjtés, monitorozás: Az ESP32-modulok alkalmazásával IoT-szenzorok adatainak gyűjtése, majd azok natív Autodesk Revit [14] (későbbek során Graphisoft Archi- CAD [15]) BIM-modellbe és WEB-es környezet- be történő integrálása;
- Vezérlés, irányítás: A beérkező adatok függvé- nyében automatizált vagy azoktól függetlenül manuális beavatkozás mellett műveltek végre- hajtása;
- Karbantartási előrejelzések: A gyűjtött adatok elemzése által a karbantartások előrejelzése,

költségek csökkentése, komolyabb meghibásodások megelőzése;

- Energiahatékonyság-optimalizálás: Az adatok felhasználásával feltételezhetően az épület energiahatékonyságának javítása;
- Biztonság, értékvédelem fejlesztése: Az épületbiztonság növelésének megvalósítása az IoT-adatok analízisének segítségével;
- IFC-modellek használata: A „Closed BIM”-módszertanú megközelítés mellett a BIM-modellek IFC-formátumú felhasználása;
- Mesterséges intelligencia implementálása: A nagynyelvi modellek (LLM) és az egyedi utasításkészletek összekapcsolása.

Hosszú távon a cél a szoftveres és hardveres környezet lehetőségeinek kiterjesztése és a legtöbb szoftveres együttműködés megteremtése, valamint ezek egységes, modularizálható keretrendszerbe integrálása. Rövid távon a fókusz a módszertani alapelvek kidolgozásán, a szoftverkörnyezet előkészítésén és stabil működésének biztosításán, a hardverelemek összekapcsolásán, valamint a teljes koncepció hatékonyságának igazolásán van.

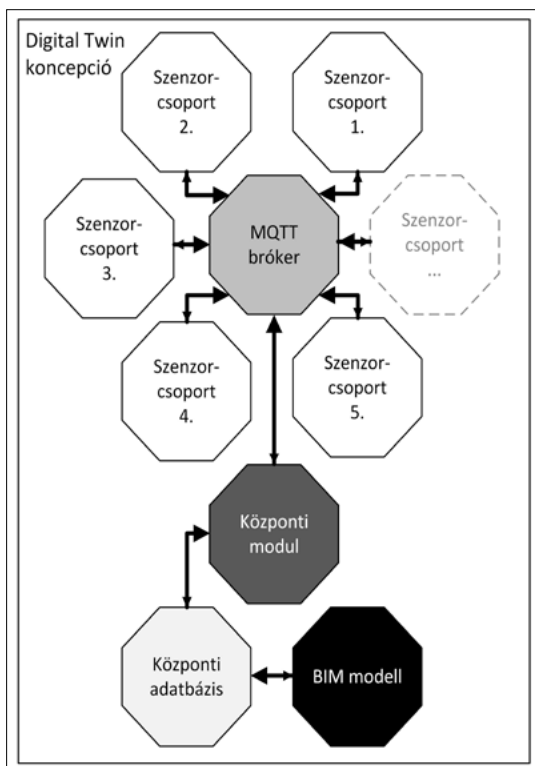
2.1. Kialakítás és felépítés

A folyamatok egyik első lépése, a szakirodalmi és a szakmai háttérkutatót követően, az elvárt működést kiszolgáló hardverfelépítési koncepció alapelveinek megfogalmazása, valamint ennek megfelelően a szükséges szenzorcsoport és fogadó környezet kiválasztása, kialakítása (**1. ábra**).

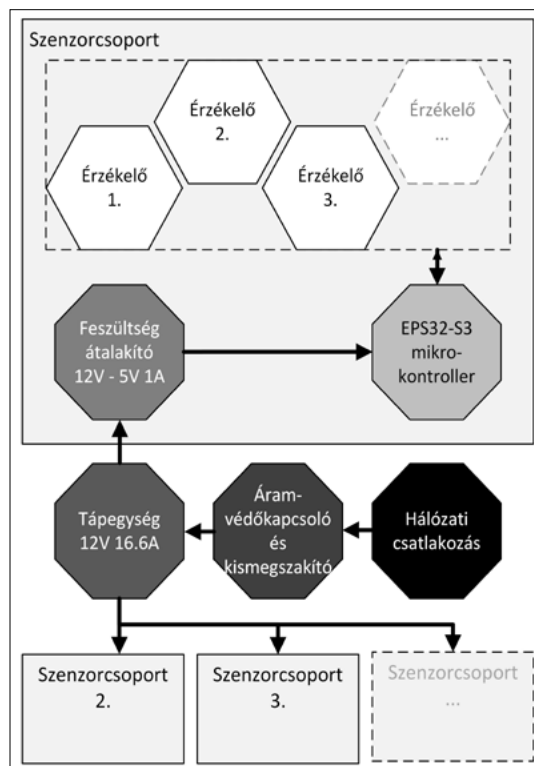
A felépítés összeállítása során elsődleges szempont volt, hogy ne egymástól független szenzorok kerüljenek elhelyezésre az épület tereinek különböző pontjain, hanem csoportokba foglalt komplex csomópontok alakuljanak ki, modularizálható formában. Ez a fejlesztés egyik fő irányként is azonosítható, amely teszteléséhez megfelelő környezetet teremtett a kutatócsoportunk irodaterébe, amelyben bontás nélküli, utólagos beépítéssel volt megvalósítható az üzembe helyezés.

Ennek megfelelően, ahogyan az **1. ábrán** is látható, egy szenzorcsoport számos szenzort foglal magába, és úgynevezett csomópontot alkot (**2. ábra**).

A csomópont központi egysége egy ESP32-S3-mikrokontroller [16], amely a szenzorokból érkező és az azok számára továbbítandó információkat



1. ábra. A kommunikációs és adatáramlási rendszer fő felépítése



2. ábra. A felépítés főbb logikai elve

kezeli, valamint megvalósítja az MQTT-brókerrel történő folyamatos adatcserét. A csomópontot alkotó szenzorok a következők:

- belsőhőmérséklet- és páratartalom-érzékelő;
- külsőhőmérséklet- és páratartalom-érzékelő;
- jelenlét-érzékelő;
- hanggenerátor;
- hangérzékelő mikrofon;
- fényérzékelő;
- fényerősség-érzékelő;
- levegőminőség-érzékelő;
- gázérzékelő;
- füstérzékelő;
- esőérzékelő;
- nyitáserzékelő;
- infravörös adó.

Ezek felül a hardveres kialakítás további cseleme egy központi egység, amelynek dedikált feladata a csomópontok MQTT-brókerhez küldött adatsomagjainak feldolgozása, egységesítése, majd egy központi adatbázisba történő továbbítása. A központi egység feldolgozó összetevője a csomóponthoz hasonlóan egy ESP32-S3-mikrokontroller, amely nem rendelkezik közvetlen szenzorkapcsolattal.

Az egységek tápellátása hálózati áramforrásból történik.

3. Működési mechanizmus

A projekt keretében megvalósított rendszer egy többretegű, eseményvezérelt és digitálisiker-központú épületüzemeltetési infrastruktúra, amely a fizikai szenzorhálózatot közvetlenül integrálja natív BIM-alapú környezetbe. A rendszer megtervezése során kiemelt figyelmet kapott, hogy az egyes komponensek önállóan is működhessenek, ne blokkolják egymást, nagy mennyiségű adatot és információt is képesek legyenek stabilan kezelni, valós idejű, visszacsatolt, kétirányú kapcsolatot teremtsenek a natív BIM és a fizikai infrastruktúra között, valamint, hogy minden esemény visszakövethető legyen.

```
[12:01] T=26.30°C, RH=44.60%, Hőérzet=26.57°C
[FILTER] Nincs lényeges változás, nem küldünk.
[TEMP-ADC] raw=0 V=0.000
[LAMP][REQ] lux frissült
[TEMP] lux=0.0 (nincs lényeges változás)
[DS18B20] T=8.2°C
[PM] Nincs lényeges változás, nem küldünk.
[STATE] presence=NINCS | door=ZARVA | ldr=SOTET | lamp(obs=OFF, asm=ON, MISMATCH) | mq4=OK(f=2337 b=2343)
[RAIN] Nincs lényeges változás, nem küldünk. state=NINCS
[MQ4] Nincs lényeges változás, nem küldünk. state=OK filt=2332 base=2337
[PRESENCE] VAN
[LAMP][REQ] presence változás
[LAMP][EVAL] lux=0.0 (LOW) | ldr=SOTET | pres=VAN | lamp=ON | wantOn=TRUE
wantOff=false
[IR] NEC SEND: ON | reason=LAMP ON feltétel | code=0x0FFD827
[LAMP][ACTION] ON parancs elküldve -> assumed=ON
[LAMP][RETRY] ON próbálkozás: 1/3 az ablakban
[LDNR] Változás: sötét -> világos
[LAMP][RETRY] Reset: observed=ON (sikeres felkapcsolás)
[LAMP][OBS] LDR most: VILAGOS | observed=ON | assumed=ON
[LAMP][REQ] LDR változás
[LAMP][RETRY] Reset ON retry: wantOn megszűnt
[LAMP][EVAL] lux=0.0 (LOW) | ldr=VILAGOS | pres=VAN | lamp=ON | wantOn=false wantOff=false
```

3. ábra. Csomóponti egységek adatlogmintája

latot teremtsenek a natív BIM és a fizikai infrastruktúra között, valamint, hogy minden esemény visszakövethető legyen.

A fizikai rétegben található mikrovezérlő-alapú csomópont különböző környezeti és üzemeltetési paramétereket mér (3. ábra).

Az adatgyűjtés lokális előfeldolgozással párosul, ugyanis a csomóponti eszközön a mért értékek időbélyeget kapnak, strukturált JSON-adatformátumba konvertálódnak, valamint hálózati kiesés esetére átmeneti puffereelési megoldást alkalmaznak.

Az adatpublikálás az MQTT közzététel-feliratkozás modell szerint zajlik, amelyben a csomópontok nem közvetlenül a központi egységnek küldenek adatot, hanem tematikus topikokra publikálnak. Így a rendszer központi kommunikációs eleme egy brókeralapú infrastruktúra, amely biztosítja az üzenetek topik szerinti szétválasztását, a jogosultsági szintek szerinti kézbesítés megvalósítását, valamint a TLS-alapú titkosított adatátvitelt.

A brókerhez kapcsolódó központi egység kettős szerepet tölt be: egyrészt MQTT-feliratkozóként gyűjti és validálja a releváns topikokról érkező adatokat, másrészt pedig interfészt biztosít az adattárolási réteg irányába. Utóbbi esetén az adatok, ellenőrzést követően, REST-alapú API-hívásokon keresztül kerülnek továbbításra a központi adatbázisba (4. ábra).

A központi egység így egyben vezérlési csomópontként is működik, mivel az adatbázisban generált parancsokat MQTT-üzenetként továbbítja a megfelelő alrendszer felé.

Az adatperzisztencia relációs adatbázis-környezetben valósul meg (PostgreSQL-alapú infrastruktúrként), amely időalapú adattárolást, szenzor- és csomópontazonosító szerinti indexelést, valamint a vezérlési képességek kezelését biztosítja. A hoz-

```
[DATA] POST indítása...
[DATA] Küldött JSON: {"node_id":"node_01","sensor":"presence","value":1}
[DATA] HTTP kód: 201
[DATA] Sikeres beszállás
[DATA] POST indítása...
[DATA] Küldött JSON: {"node_id":"node_01","sensor":"light","value":1,"ts_utc":"2026-02-22T12:01:35Z"}
[DATA] HTTP kód: 201
[DATA] Sikeres beszállás
[DATA] POST indítása...
[DATA] Küldött JSON: {"node_id":"node_01","sensor":"co2_state","value":1,"unit":"lvl","ts_utc":"2026-02-22T12:02:12Z"}
[DATA] HTTP kód: 201
[DATA] Sikeres beszállás
[DATA] POST indítása...
[DATA] Küldött JSON: {"node_id":"node_01","sensor":"sound_event","value":10624,"ts_utc":"2026-02-22T12:03:13Z"}
[DATA] HTTP kód: 201
[DATA] Sikeres beszállás
[DATA] POST indítása...
[DATA] Küldött JSON: {"node_id":"node_01","sensor":"temperature","value":26.5,"unit":"C","ts_utc":"2026-02-22T12:07:00Z"}
[CMD] PATCH 46b70940-51b7-465b-b576-933cae94025e -> sent code=200
resp={"id":"46b70940-51b7-465b-b576-933cae94025e"}
```

4. ábra. Központi egységek adatlogmintája

zákapcsolódó jogosultságkezelés pedig lehetővé teszi a többfelhasználós, differenciált hozzáférési modell alkalmazását. Így az adatbázis nem csupán tárolási funkciót lát el, hanem a digitális iker állapotáraként, utasításkezelőjeként is működik. Ebből a felsőbb rétegek, köztük a natív BIM-környezet, strukturált lekérdezésekkel nyernek ki információt.

A rendszer legfelső szintjén a natív BIM-alapú digitális iker réteg helyezkedik el, amely jelenleg az Autodesk Revit platformon fejlesztett egyedi, komplex add-in segítségével kapcsolódik az adatbázishoz (5. ábra).

A modellben szereplő objektumok (6. ábra) egyedi azonosító paraméterek segítségével kerülnek összekötésre a fizikai szenzorhálózattal.

Az add-in API-n keresztül kommunikál, lekérdezi az aktuális szenzoradatokat, majd azokat paraméter-kezelési és vizualizációs szinten integrálja a modellbe. Ennek eredményeként a natív BIM-modell dinamikus állapotrepresentációvá alakul. Ennek keretei között a geometriai entitások nem csupán statikus tervezési vagy kivitelezési objektumok lesznek, hanem valós idejű működési adatokkal rendelkező digitális entitások.

A rendszer egyik meghatározó sajátossága a zárt rendszerű vezérlés megvalósítása. A felhasználó a natív BIM-környezetben és majd a fejlesztés

következő fázisában egy kapcsolódó webes felületen keresztül vezérlési utasításokat generálhat, amelyek az adatbázisban strukturált parancsrekordokként kerülnek rögzítésre. A központi egység ezt az információt MQTT-üzenet formájában továbbítja a megfelelő topikra, amelyet az érintett csomópontok is feliratkozóként figyelnek. A végrehajtást követően a rendszer státuszüzenetet és frissített szenzoradatot generál, amely ismételt bekerül az adatfolyamba, így a digitális ikerben az állapotváltozás is megjelenik. Ez a mechanizmus biztosítja a fizikai infrastruktúra és a virtuális modell közötti konzisztens, auditálható és valós idejű visszacsatolást.

Összefoglalva, a projektben kialakított architektúra nem egyirányú, lineáris adatfeldolgozási láncként értelmezendő, hanem eseményvezérelt, MQTT-bróker-alapú, szabályozott állapottárral rendelkező, kétirányú kommunikációs rendszerként. A fizikai szenzorhálózat, az üzenetközvetítő réteg, az adatbázis és a natív BIM-modell-alapú digitális iker integrációja egy olyan komplex információs ökoszisztémát eredményez, amely alkalmas valós idejű monitorozásra, prediktív elemzésre és aktív beavatkozásra egyaránt, amelyekkel megalapozza az intelligens épületüzemeltetés magasabb szintű megvalósítását.

Panel

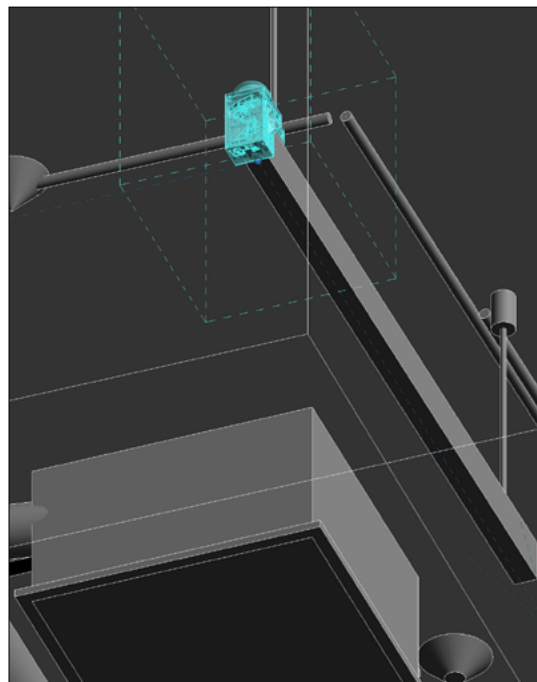
Status: logged in

Sensor View Select Sensors Logout

node_01 Select -

sensor	value	unit	local time
co2	915	ppm	2026-02-13 17:32:00
co2_state	0	lvl	2026-02-13 17:35:55
door	0		2026-02-13 17:21:34
heat_index	28,0088	C	2026-02-13 17:30:00
humidity	41,9	%	2026-02-13 17:21:11
light	0		2026-02-13 17:43:44
light_lux	0,0806	lux	2026-02-13 17:21:16
mq4_gas_event	0		2026-02-13 17:23:59
outdoor_temperature	24,4375	C	2026-02-08 04:00:11
pm10	4,2	ug/m3	2026-02-13 17:21:20
pm25	1,7	ug/m3	2026-02-13 17:21:18
presence	1		2026-02-13 17:47:39
rain	0		2026-02-13 17:21:30
sound_event	239		2026-02-13 17:49:39
sound_level	5,3056	%	2025-12-18 15:16:48
temperature	28,3	C	2026-02-13 17:21:09

5. ábra. Revit szenzoradat-megjelenítő Add-in

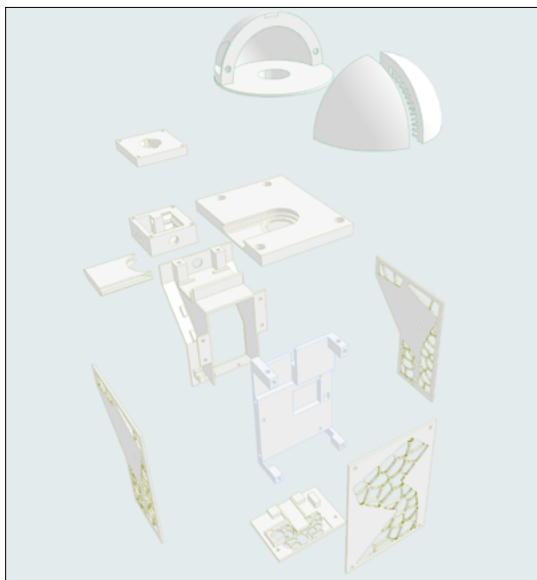


6. ábra. BIM-modell csomóponti elemmel

4. Eszközház

Mivel a projektben komplex szenzorcsomópont készül, és a modularitás elsődleges szempont, egyedileg megtervezett vázra van szükség (7. ábra).

Az eszközház prototípusa 3D-nyomtató segítségével került előállításra. A nyomtatáshoz mivel komolyabb leesés, leejtés elleni védelemre ez esetben nincs szükség, fehér színű, 1,75 mm átmérőjű Polylactic Acid (PLA)-nyomtatószál került felhasználásra (8. ábra).



7. ábra. A megtervezett eszközház szétrobbantott 3D-modellje



8. ábra. A prototípus nyomtatott, összeszerelt modellje

Jelenleg a prototípus a konkrét tesztkörnyezet adottságait figyelembe véve készült el, de a jövőben sokkal általánosabban alkalmazható verziók megtervezése is cél. Belső szerkezetét tekintve, minden szenzor egyedileg tervezett fogadófelületre és dedikált pozícióba került. A megvalósított konstrukció nem csupán alapvető védelmet nyújt a szenzorok számára, hanem biztosítja a roncsolásmentes egyszerű felszerelhetőséget, hozzáférhetőséget és karbantarthatóságot (9. ábra).

5. Következtetések

A bemutatott rendszerarchitektúra egy integrált, kétirányú kommunikációt megvalósító, digitális-ker-alapú épületüzemeltetési infrastruktúra első működő prototípusát reprezentálja. A rendszer képes valós idejű állapotmonitorozásra és vezérlés-visszacsatolásra is, amely a natív digitális modell és a fizikai infrastruktúra közötti kapcsolatot biztosítja. Ugyanakkor hangsúlyozandó, hogy a kutatásfejlesztési és innovációs folyamat jelenleg még a kezdeti fázisban tart. A jelenlegi implementáció koncepcióbizonyítás-jellegű, amely elsősorban a felépítés- és az összeállítás-validációra, a kommunikációs megbízhatóság vizsgálatára, valamint a natív BIM-alapú integráció működőképességének igazolására fókuszált. A rendszerben rejlő potenciál ugyanakkor jelentős, különösen a skálázhatóság, az automatizált döntéstámogatás és a prediktív üzemeltetési modellek irányában. A további fejlesztési irányok több dimenzióban



9. ábra. A felszerelt eszköz

értelmezhetők, és a 2. fejezetben célterületként azonosított alkalmazási és kutatási irányokon túl a projekt további innovációs potenciált hordoz. Az eddig nem említettek közül elsőként kiemelendő az egyéb helyre, pozícióba helyezhető, azonos összetételű, de más formájú modulok készítése, a webes hozzáférés teljes körű implementálása és a rendszer saját szerveren történő futtatása. További stratégiai irány a szenzorozottság növelése, a rendszer pilotkörnyezetben történő kiterjesztése, az IT biztonsági szint emelése. Emellett a fejlesztés kiváló keretet biztosíthat a jövőben hallgatók bevonására kutatócsoporti munkába, valamint hazai és nemzetközi pályázati projektek előkészítésére.

Összességében megállapítható, hogy a projekt keretében létrehozott rendszer jelenlegi állapotában egy olyan, skálázható digitálisiker-platform alapja, amely megfelelő továbbfejlesztéssel képes lehet az intelligens épületüzemeltetés, az adatvezérelt döntéstámogatás és a valós idejű infrastruktúra-irányítás integrált megvalósítására. A jelenlegi eredmények alapot képeznek a következő fejlesztési fázis számára, amelyben a rendszer ipari validációja, biztonsági megerősítése és tudományos elmélyítése egyaránt meg fog valósulni.

Köszönetnyilvánítás

A Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapjából finanszírozott Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programjának szakmai támogatásával készült.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Alecrim I., Carvalho J. P., Bragança I., Mateus R.: *Using BIM for Assessing Buildings Life Cycle Impacts*. Journal of Cleaner Production, 265. (2020) <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121705>
- [2] Santos R., Costa A. A., Silvestre J. D., Py L.: *Development of a BIM-based Environmental and Economic Life Cycle Assessment Tool*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 503. (2020). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012005>.
- [3] Akbarieh, A., Jayasinghe, L. B., Waldmann, D., Teferle, F. N.: *BIM-Based End-of-Lifecycle Decision Making and Digital Deconstruction: Literature Review*. Sustainability, 12/7. (2020) 2670. <https://doi.org/10.3390/su12072670>
- [4] Thabet W., Lucas J., Srinivasan S.: *Linking Life Cycle BIM Data to a Facility Management System Using Revit Dynamo*. Organization, Technology and Management in Construction: an International Journal. 14. (2022) 2539–2558. <https://doi.org/10.2478/otmcj-2022-0001>
- [5] Beetz J., Dietze S., Berndt R., Tamke M.: *Towards The Long-Term Preservation of Building Information Models*. In: Proceedings of CIB W78, 2013: 30th International Conference on Applications of IT in the AEC Industry (2013) Tsinghua University, 209–217. <http://2013cibw78.civil.tsinghua.edu.cn/>
- [6] Desogus G., Quaquero E., Rubiu G., Gatto G., Perra C.: *BIM and IoT Sensors Integration: A Framework for Consumption and Indoor Conditions Data Monitoring of Existing Buildings*. Sustainability, 13/8. (2021). <https://doi.org/10.3390/su13084496>
- [7] Scianna A., Gaglio G. F., La Guardia M.: *Structure Monitoring with BIM and IoT: The Case Study of a Bridge Beam Model*. ISPRS International Journal of Geo-Information, 11/3. (2022). <https://doi.org/10.3390/ijgi11030173>
- [8] Iqbal F., Ahmed S., Tariq M., Waqas H., Al-Ammar E., Wabaidur S., Fawad M.: *BIM-IoT Integration for Remote Real-Time Concrete Compressive Strength Monitoring*. Ain Shams Engineering Journal, 15/7. (2024). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102863>
- [9] Borghoff U. M., Pfeiffer E., Rodig P.: *Design of a Representation Information Repository for the Long-Term Usability of Digital Building Documents*. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 29. (2024) 596–611. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.19337>
- [10] MQTT Version 5.0 – OASIS Standard 07 March 2019. (letöltve: 2026. február 17.). <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>
- [11] Amirkhanova G., Ismailov S., Amirkhanov A., Adilzhanova S., Zhasuzakova M., Chen, S.: *A Lightweight, End-to-End Encrypted Data Pipeline for IIoT: An AES-GCM Implementation for ESP32, MQTT, and Raspberry Pi*. Information, 17/1. (2026) <https://doi.org/10.3390/info17010033>
- [12] Kim H. J., Lee, M. H.: *A Comparative Performance Study of Parallel MQTT and RS485 Communication Architectures for High-Frequency IoT Sensing*. Electronics, 15/4. (2026) <https://doi.org/10.3390/electronics15040760>
- [13] Chien CM., Trung N. T. H., Cheng CY., Chen CS., Yeh D., Wang RZ.: *Leveraging 5D Platform and Facilities Management and Control Systems for Smart Disaster Response in Manufacturing: a Case Study in Thailand's Coastal Industries*. J Ambient Intell Human Comput, 17. (2026) 63–76. <https://doi.org/10.1007/s12652-025-05019-6>
- [14] Autodesk Revit (letöltve: 2026. február 17.). <https://www.autodesk.com/hu/products/revit/overview>
- [15] Graphisoft Archicad (letöltve: 2026. február 17.). <https://www.graphisoft.com/hu-hu/plans-and-products/archicad>
- [16] Arduino Nano ESP32-S3 (letöltve: 2026. február 17.). <https://docs.arduino.cc/hardware/nano-esp32/>