

# AUTONÓM 5G IOT ÖKOSZISZTÉMA A KRITIKUS INFRASTRUKTÚRA VÉDELMÉBEN

**Szerzők: Somogyi Andrea<sup>1</sup>, Veres Miklós<sup>2</sup>, Csonka Attila<sup>3</sup>, Hermesz Miklós<sup>4</sup>, Kató Arnold<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Sover Unio Fejlesztési Tanácsadó Kft, 1149 Budapest Angol utca 34/a

<sup>4,5</sup> Sysman Informatikai Zrt, 1037 Budapest, Montevideo utca 10. I. em.

## **Absztrakt / Abstract**

A tanulmány egy olyan 5G-képes, autonóm energiaellátású IoT ökoszisztéma kutatását és fejlesztését mutatja be, amelyet kifejezetten kritikus infrastruktúrák, például hidak és speciális építmények szerkezeti állapotának (Structural Health Monitoring – SHM) folyamatos felügyeletére terveztek. A rendszer alapját egyedi fejlesztésű multiszenzoros végpontok, 5G alapú adatátviteli architektúra és egy intelligens Smart IoT Platform (SIP) alkotja. A kutatás kiterjedt a vezeték nélküli töltési technológiákra (RF harvesting, mágneses rezonancia), a burkolati anyagok optimalizálására és a valós körülmények közötti (M0 Hárosi híd, Tiszavirág híd) validációra. Az eredmények igazolják az autonóm mérőhálózat hatékonyságát a szerkezeti anomáliák korai detektálásában.

*The study presents the research and development of an autonomous, 5G-enabled IoT ecosystem specifically designed for the Structural Health Monitoring (SHM) of critical infrastructure, such as bridges and specialized structures. The system is based on custom-developed multi-sensor endpoints, a 5G-based data transmission architecture, and an intelligent Smart IoT Platform (SIP). The research involved extensive testing of wireless charging technologies (RF harvesting, magnetic resonance), optimization of housing materials, and validation under real-world conditions (M0 Hárosi Bridge, Tiszavirág Bridge). Results confirm the effectiveness of the autonomous sensor network in early detection of structural anomalies.*

**Kulcsszavak:** IoT, 5G, Kritikus infrastruktúra védelem, SHM, Autonóm szenzorhálózatok.

## **Bevezetés**

Az életünkhöz nélkülözhetetlen infrastruktúra-rendszerek biztonságos fenntartása kiemelt feladat. A jelenlegi SHM rendszerek korlátja gyakran a vezetékes tápellátás és adatátvitel igénye, ami nehezen hozzáférhető helyeken (pl. alaptestek) akadályozza a telepítést. A projekt célja egy olyan autonóm IoT ökoszisztéma létrehozása volt, amely képes a szerkezeti elváltozások (nedvesség, korrózió, nyúlás, rezgés) detektálására és az adatok 5G hálózaton keresztüli továbbítására.

## **Rendszerarchitektúra és implementáció**

A rendszer három fő komponensből áll:

1. Végponti elemek: Saját fejlesztésű mérőegységek, amelyek integrált gyorsulásmérőket (pl. IIS3DWB, IIS2DH), nyúlásmérőket, páratartalom- és hőmérséklet-szenzorokat tartalmaznak.
2. Átjátszóállomás (Bridge): Raspberry Pi 4 alapú egység, amely 4G/5G routeren keresztül biztosítja a kapcsolatot a végpontok és a központi szerver között.
3. Smart IoT Platform (SIP): Egy felhőalapú dashboard, amely lehetővé teszi az eszközök menedzselését, az adatok vizualizációját (FFT spektrumok, spektrogramok) és az anomália-detekciós algoritmusok futtatását.

## **Technológiai kutatások**

A kutatás során vizsgáltuk az autonóm energiaellátás lehetőségeit. Kísérletek történtek mágneses rezonancián alapuló töltésre, valamint RF harvesting technológiára (rádiófrekvenciás energia lecsapolása), amely 915 MHz-es tartományban képes energiát kinyerni. A burkolatanyagok vizsgálata során összehasonlítottuk az alumínium és a műanyag (ABS) dobozok rezgésátviteli képességeit. Az eredmények alapján az alumíniumházas konfiguráció, speciális kötőanyagokkal rögzítve, pontosabb rezgésmérést tett lehetővé betonfelületeken.

A kutatás során az anomália-detekció egy többlépcsős folyamat keretében valósult meg, amely a nyers gyorsulásmérő adatok FFT (Fast Fourier Transformation) algoritmussal történő feldolgozásával kezdődött. Az adatokon végzett elemzés az alábbi algoritmusokat és eljárásokat érintette:

### ***Dimenziócsökkentő eljárások***

Több módszert teszteltünk, hogy megtaláljuk azt az ábrázolási módot, amely a legjobban elkülöníti a nyugalmi és a gerjesztett állapotokat:

A kutatás során végzett tesztek alapján az MDS (Multi Dimensional Scaling) dimenziócsökkentési eljárás vált be a legjobban.

Több lineáris (PCA, NMF) és nemlineáris (MDS, LLE, Isomap, Spectral Embedding, t-SNE) módszert is megvizsgáltunk azzal a céllal, hogy megtaláljuk azt az ábrázolást, amely a leginkább képes elkülöníteni a vizsgált rendszerek nyugalmi és gerjesztett állapotát. Az összehasonlítás során az alábbi tapasztalatokat rögzítettük:

- Az LLE, az Isomap és a Spectral Embedding eljárások nem tartották eléggé egyben a mintát.

- A t-SNE algoritmus alkalmazása rendkívül nagy számítási igényvel járt.
- Az MDS módszer ezzel szemben hatékonyan és jól elkülönítette a két állapothoz tartozó adatpontokat, így ez bizonyult a legalkalmasabbnak a projekt céljaira.

A kutatás során az 1 class SVM (Support Vector Machine) algoritmus az outlier detection (kiugró érték keresés) folyamatában játszott kulcsszerepet.

Szerepének és jelentőségének főbb pontjai a következők:

- A legjobb teljesítményű algoritmus: A vizsgálat során több kiugró érték kereső algoritmust is teszteltek (isolation forest, local outlier factor, 1 class SVM), és az összehasonlító mérések alapján az 1 class SVM mutatta a legjobb eredményeket az anomáliák felismerésében.
- Határvonal meghatározása: Az algoritmus feladata az volt, hogy a dimenziócsökkentés és klaszterezés után kijelöljön egy határt a pontthalmaz körül. Ez a határ határozza meg, hogy egy adott mérési adatpont még a normál minta részének tekinthető-e, vagy az eltérés mértéke alapján már anomáliának minősül.
- Riasztási alapfeltétel: Az algoritmus által meghatározott határvonal közvetlen alapját képezi a mesterséges intelligencia alapú felügyeleti rendszernek. A rendszer két paramétert figyel:
  1. A gerjesztett állapothoz tartozó pontthalmaz súlypontjának elmozdulását.
  2. A határvonalon (1 class SVM által kijelölt határon) kívül eső adatpontok számát, amely a szerkezet állapotának romlásával növekszik.

Összességében az 1 class SVM volt az a döntési mechanizmus, amely a feldolgozott rezgésadatok alapján képessé tette a rendszert a kritikus infrastruktúrák (hidak) szerkezeti elváltozásainak automatikus és pontos detektálására.

### ***Klaszterezési algoritmusok***

A dimenziócsökkentés után automatizált módon kellett beazonosítani az állapotokat. A kipróbált módszerek a következők voltak:

- Affinity propagation, Agglomerative clustering, Birch, DBSCAN, k-Means és Mean shift.
- Kiválasztott algoritmus: A Gaussian Mixture algoritmust választották a végleges modellhez, mert a minta jól modellezhető Gauss-eloszlásokkal.

### ***Outlier Detection (Kiugró érték keresés)***

Miután a klasztereket elkülönítettük, meg kellett határoznunk azokat a határértékeket, amelyek felett anomáliáról beszélünk. Ehhez három algoritmust vizsgáltunk:

- Isolation forest, Local outlier factor és 1 class SVM.
- A tesztek alapján az 1 class SVM mutatta a legjobb eredményeket az anomáliák felismerésében.

### ***Szakirodalomban említett egyéb módszerek***

A hipotézis validációja során más, a területen alkalmazott egyéb eljárásokra is vizsgáltunk, mint például:

- Mahalanobis Distance outlier detection (gyakran ARMA modellel kombinálva).
- Mahalanobis-Taguchi rendszer (MTS), többváltozós kiugró-érték-elemzési eljárás.

A kutatás eredményeként összeállított mesterséges intelligencia algoritmus alapja végül a gerjesztett állapothoz tartozó pontthalmaz súlypontjának elmozdulása, valamint a határon kívül eső adatpontok számának figyelése lett.

### **Kísérleti validáció**

A rendszert valós körülmények között teszteltük:

#### ***M0 Hárosi Duna-híd***

Az M0 Hárosi Duna-hídon végzett éles tesztek elsődleges célja a kifejlesztett mérőrendszer validálása volt a hídon már korábban üzemelő, a BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke által telepített monitoring rendszer adataihoz viszonyítva, prototípust a már meglévő monitoring rendszerrel párhuzamosan telepítettük validáció céljából.

A mérések legfontosabb eredményei az alábbiak:

- Jel-zaj viszony: A mérések igazolták, hogy a mérőeszköz saját zaja  $0,15 \text{ m/s}^2$  tartományba esik, miközben a legkisebb hídkilengések is elérik a  $0,2 \text{ m/s}^2$  értéket. Ez azt jelenti, hogy a rendszer alkalmas az érdemi jelek detektálására anélkül, hogy azok elvesznének a zajban.
- Mintavételezés: A tesztek során megállapítottuk, hogy bár kezdetben 500 Hz-es mintavételezést használtunk, a 200 Hz-es beállítás hatékonyabbnak bizonyult, mivel így az 5 Hz alatti, hidakra jellemző rezgések intenzívebben láthatók.
- Sajátfrekvenciák azonosítása: Az FFT (gyors Fourier-transzformáció) elemzés segítségével pontosan azonosítottuk a hídra jellemző frekvenciacsúcsokat.
  - Az első sajátfrekvenciát 1,7 Hz-nél,
  - további jelentős frekvenciacsúcsokat detektáltunk 3,5 Hz-nél és 4,2 Hz-nél.

- Validáció: A mért gyorsulásértékek abszolút reálisnak bizonyultak, és a kapott frekvenciaértékek összhangban voltak a korábbi kutatásokkal és a híd elméleti dinamikai jellemzőivel.

A mérésekhez a végponti elemeket mágneses rögzítéssel helyeztük el a híd belső szekrénytartóinak kereszttartóin, a meglévő rendszer szenzoraival ellentétes oldalon, így biztosítva az adatok összehasonlíthatóságát.

### ***Szolnoki Tiszavirág híd***

A Szolnoki Tiszavirág gyalog hídon végzett vizsgálatok célja volt a prototípus gyalog hídon történő, éles körülmények közötti tesztelése, a folyamatos adatgyűjtés validálása és az adatelemző algoritmusok számára történő adatbázis-építés.

Alpintechnikai módszerrel telepített végpontokkal vizsgáltuk a szerkezet dinamikai válaszait. Az adatok kiértékelése során FFT (Fast Fourier Transformation) algoritmust használtunk a frekvenciatartomány elemzésére, és különböző klaszterezési (pl. Gaussian Mixture) eljárásokat az anomáliák felismerésére.

A mérések legfontosabb eredményei és jellemzői az alábbiak:

- Telepítési technológia: A mérőrendszert a híd tartószerkezetére, a járólapok alá telepítettük alpintechnikai módszerrel. Ez igazolta, hogy a rendszer a híd megbontása vagy a forgalom korlátozása nélkül is sikeresen kihelyezhető.
- Mintavételezési hatékonyság: A szenzorok mintavételezési frekvenciáját 200 Hz-re állítottuk be. Mivel a Tiszavirág híd első 20 sajátfrekvenciája 5 Hz alatt van, ez a beállítás 5 Hz-ig negyvenszeres túlmintavételezést biztosított, ami kiváló minőségű, de kezelhető méretű adatbázist eredményezett.
- Folyamatos monitorozás: Két egymással párhuzamos monitoring rendszer működött. Az egyik rendszer minden óra nulladik másodpercében egy 180 másodperces mérési ciklust indított, míg a másik végponti elem „stream” módban működött, azaz folyamatosan küldte a gyorsulás- és rezgésadatokat a központi szerverre.
- Valós idejű megjelenítés és riasztás: A mért adatokat webböngészőben, valós időben követhettük. Igazoltuk, hogy a rendszer képes arra, hogy egy előre programozott, szabvány szerinti határérték átlépése esetén azonnal riasztást generáljon.
- Dinamikai jellemzők: Az FFT (gyors Fourier-transzformáció) elemzés segítségével a hídra jellemző frekvenciagörbéket állítottunk elő, amelyek alkalmasak a szerkezet állapotának hosszú távú nyomon követésére.

A vizsgálattal igazoltuk hogy a kifejlesztett 5G IoT ökoszisztéma alkalmas a gyalogoshidak speciális dinamikai viselkedésének pontos és folyamatos felügyeletére.

## **Eredmények és konklúzió**

A kifejlesztett 5G IoT ökoszisztéma alkalmas a kritikus infrastruktúra elemeinek folyamatos, emberi beavatkozás nélküli, távoli felügyeletére. A rendszer hatékonyságát az M0 Hárosi Duna-hídon végzett validációs mérések igazolták, ahol a szenzorok  $0,15 \text{ m/s}^2$ -es saját zaja mellett is pontosan detektálhatók voltak a szerkezet  $0,2 \text{ m/s}^2$ -t elérő alaprezgései, valamint az 1,7 Hz-es, 3,5 Hz-es és 4,2 Hz-es sajátfrekvenciák. A Szolnoki Tiszavirág hídon végzett tesztek bizonyították, hogy a rendszer alpinechnikai módszerrel, a forgalom korlátozása nélkül is telepíthető, az adatok pedig valós idejű stream módban, 200 Hz-es mintavételezés mellett is stabilan továbbíthatók a központi Smart IoT Platformra (SIP).

A kutatás egyik legjelentősebb eredménye a nehezen hozzáférhető szerkezeti elemek, például beton alaptestek monitorozhatóságának igazolása. A kísérletek során a Bluetooth LE jelek még 15–27 cm vastag betonrétegen, sőt 25 cm-es vasbeton födémen keresztül is detektálhatók maradtak, ami lehetővé teszi a beágyazott szenzorok utólagos adatlekérését. A rádiófrekvenciás mérések meghatározták azokat az optimális frekvenciatartományokat (400–800 MHz, 1800–2300 MHz és 2700–3200 MHz), amelyek a legkisebb csillapítással hatolnak át a betonon, megalapozva a jövőbeni beágyazott energiaátviteli megoldásokat.

A mesterséges intelligencia alapú anomália-detekció terén az MDS (Multi Dimensional Scaling) dimenziócsökkentési eljárás és a 1 class SVM algoritmus kombinációja bizonyult a leghatékonyabbnak, amely képes a szerkezeti válaszjelek súlypont-elmozdulása és a határértéken kívül eső adatpontok száma alapján automatikus riasztást generálni. Az acél gerendákon végzett szakítógépes mérések igazolták, hogy a rendszer képes különbséget tenni a rugalmas alakváltozás és a maradandó szerkezeti károsodás (feszültségállapot-változás) között.

Az ökoszisztéma autonómiáját a 2000 mAh-s Li-Po akkumulátorok és az opcionális napelemes csepptöltés biztosítja, amely alvó üzemmódban (deep sleep) minimális áramfelvétel mellett minimum egyéves, de optimális esetben 2-3 éves gondozásmentes üzemet tesz lehetővé. A burkolatvizsgálatok alapján az alumíniumházas kialakítás speciális kötőanyagokkal (6-os típusú ragasztó) kombinálva nyújtja a legjobb rezgésátviteli tulajdonságokat és környezeti ellenállóságot, amit a sópermetkamrás és klímakamrás tesztek is visszaigazoltak.

Igazolható, hogy a projekt eredményeként létrejött egy olyan skálázható, költséghatékony és moduláris monitoring megoldás, amely kiváltja a hagyományos vezetékes

rendszereket, és képes a kritikus infrastruktúrák preventív védelmére még a legzordabb környezeti körülmények között is.

### **Köszönetnyilvánítás**

A szerzők ezúton szeretnék megköszönni a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2021-00317 azonosítószámú kutatás-fejlesztési projekt támogatását

### **Irodalomjegyzék**

A publikáció a „2020-1.1.2-PIACI-KFI-2021-00317” számú projekt kutatási dokumentációjában rögzített mérési eredményekre és technológiai leírásokra támaszkodik.