



**LORA WAN HÁLÓZATON ALAPULÓ AUTOMATIZÁLT
ÉPÜLETFIGYELÉS FIZIKAI TÉR SZABTA KORLÁTAINAK
VIZSGÁLATA MŰEMLÉK ÉPÜLETEKBEN**

**INVESTIGATING THE PHYSICAL SPACE CONSTRAINTS OF
LORA WAN-BASED AUTOMATED BUILDING MONITORING IN
LISTED BUILDINGS**



Bihari Csenge

Csögör Ramón

Témavezető:

Dr. Vidovszky István

2023. november 2.

Abstract

IoT technology is gaining high popularity recently. These systems play a major role in our lives as we can control and monitor our devices from remote distances among many other opportunities. Most of these devices operate with batteries, but the technologies that can connect the devices such as Wi-Fi or Bluetooth require a lot of power, so they are not suitable to operate these systems. LoRa (Long Range) is capable of transferring data to long ranges with low power consumption at the cost of low bitrate, therefore it is used in industry and agriculture. According to several reported measurements, this device can operate in open terrain with a range of up to 10 km, but the connection can be disrupted by a building, tree, or other radio signal. LoRa is a technology that is becoming more widespread today and has been the subject of several studies, but there are still many areas waiting to be explored. We have targeted these areas. In our research, we explore how and at what ranges the device works on-site, how realistic the data revealed in the known literature are, and how LoRa works in a heritage building. In the case of monitoring a monumental building, a LoRa-based system can be used to monitor the building without requiring a continuous human presence. Furthermore, with rising energy prices, reducing energy consumption has become an important issue at facility management, so LoRa can help users in this area as well, as it can be used as a low-powered data transmission technology that keeps the user informed and provides the possibility to detect and solve faults. In this research, by investigating the communication within different sites of a historical building, we seek to answer the question of how the individual building structures, their combinations, and the location of the measuring devices within the building affect the communication capabilities of devices communicating with LoRa technology.

Kivonat

Napjainkban az IoT (Internet of Things) technológia egyre elterjedtebb. Ezek a rendszerek beágyazódtak a mindennapjainkba, ugyanis ezeken keresztül tudjuk távolról figyelni és vezérelni eszközeinket, de emellett sok más lehetőség is rejlik bennük. Sok ilyen eszköz akkumulátorról működik, viszont a legtöbb technológia, ami képes megteremteni az eszközök közötti kapcsolatot, mint például a Wifi vagy a Bluetooth, relatív nagy energiát igényel, és ezért nem alkalmas ezeknek a rendszereknek a működtetésére. A LoRa (Long Range) nagy hatótávolságú, és alacsony energiafelhasználással képes továbbítani adatokat, alacsony bitsebesség árán, ezért ipari és mezőgazdasági használatra is alkalmazzák őket. Egyes mérések szerint egy ilyen eszköz nyílt terepen akár 10 km hatótávolsággal is képes működni, de a kapcsolatot egy épület, fa vagy más rádiójel is megzavarhatja. A LoRa egy napjainkban elterjedőben lévő technológia, mellyel kapcsolatban sok szakirodalmi cikk született, mégis vannak területek, amelyről még nem tudunk mindent. Mi ezeket a területeket vettük célba. Kutatásunkban feltérképezzük, hogy milyen módon és a valóságban milyen hatótávolságokkal működik az eszköz, mennyire valósak a cikkekben feltárt adatok, és hogyan működik a LoRa egy műemléki épületben. Műemléki épületek monitorozása esetén egy LoRa alapú rendszer alkalmas lehet az épület figyelő követésére, anélkül, hogy az folyamatos emberi jelenlétet igényelne. Továbbá a növekvő energiaárak mellett az energiafelhasználás csökkentése a létesítménygazdálkodásban is fontossá vált, a LoRa pedig ezen a területen is a felhasználók segítségére lehet, hiszen alkalmazásával kis energiával működtethető olyan adattovábbító technológia, amely folyamatosan tájékoztatja használóját, illetve lehetőséget nyújt a hibák észlelésére, feltárására és megoldására. Ebben a kutatásban egy történeti épületen belüli helyszínek közötti kommunikáció vizsgálatával arra a kérdésre keressük a választ, hogy az egyes épületszerkezetek, ezek kombinációi, valamint a mérőeszközök épületen belüli elhelyezkedése milyen mértékben befolyásolják a LoRa technológiával kommunikáló eszközök kapcsolatteremtési képességeit.

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	1
1.1	Témaválasztás.....	1
1.2	LoRa (Long Range).....	2
2.	Irodalmi áttekintés	2
3.	Célkitűzések	5
4.	Módszer	5
4.1	Háttér munka a mérések mögött.....	5
5.	Gyakorlati megvalósítás	8
6.	Eredmények / Kiértékelés.....	21
7.	Összefoglalás	24
8.	Irodalomjegyzék	25

Ábrajegyzék

1. ábra Szempontok szerint figyelemreméltó a mért adatok pontossága. (Klein, 2017)	4
2. ábra A felsorolt részekből összerakott eszköz	6
3. ábra Pico LoRa test Slave - vevőhöz tartozó forráskód részlet	6
4. ábra Pico LoRa test Master - adóhoz tartozó forráskód részlet	7
5. ábra Kapcsolat architektúrája	7
6. ábra Első mérésorozat szintváltás nélkül	9
7. ábra Második mérésorozat szintváltással felfelé	11
8. ábra Harmadik mérésorozat szintváltással lefelé	13
9. ábra Negyedik mérésorozat két szintváltással lefelé	15
10. ábra Ötödik mérésorozat három szintváltással lefelé	17
11. ábra Hatodik mérésorozat kültéri helyzetet vizsgálva	19

1. Bevezetés

Jelenleg Magyarországon 15 000 épület áll műemlékvédelem alatt. A műemlék épületek helyzetével számos kutatás foglalkozik. Ezen épületek építőanyagai, építési megoldásai már elavultak, az energia árak pedig egy folyamatos növekvő tendenciát mutatnak, ami megnehezíti az üzemeltetők helyzetét. Így megnyílt a kereslet és az igény olyan alternatívák felé, amelyek segítségével az épület energiafogyasztását csökkenteni lehet.

1.1 Témaválasztás

A dolgozat egy olyan nagy hatótávolságú adattovábbító eszközt mutat be, amely a wifi vagy mobilhálózatra csatlakoztatott eszközök mellett egy alternatív megoldást kínál egy adott épület folyamatos monitorozására. Az épületek energiafogyasztásának optimalizálására, illetve a klimatikus paramétereinek megfigyelésére egyre többen alkalmaznak IoT (Internet of Things) eszközöket, amelyek segítségével távolról figyelhetik az energiafelhasználást. Sok eszköz, amit ebből a célból alkalmaznak akkumulátorral működik, viszont a legtöbb technológia, ami képes megteremteni az eszközök közötti kapcsolatot, mint például a Wifi vagy a Bluetooth, relatív nagy energiát igényel, és ezért nem optimális választás ezeknek a rendszereknek a működtetésére. A LoRa (Long Range) pedig azért lehet a felhasználók segítségére, mert alkalmazásával kis energiával működtethető olyan adattovábbító technológia, amely folyamatosan tájékoztatja használatját, illetve lehetőséget nyújt a hibák észlelésére, feltárására és megoldására. Bár a LoRa egyre elterjedtebb mezőgazdasági és ipari környezetben, épületekben történő használatáról kevesebb adat áll rendelkezésünkre, ezért ebben a tanulmányban LoRa tesztelésével mérjük fel, hogy milyen határai vannak ennek az adattovábbító eszköznek egy műemléki épületben, mik a korlátai és milyen előnyei lehetnek. Az elvégzett mérések segítséget nyújthatnak a későbbiekben létesítménygazdálkodóknak, építészmérnököknek, történészeknek, hogy személyes jelenlét és drága, nagy energiaigényű eszközök nélkül is pontos adatokat kapjanak az általuk felmérni kívánt épületről.

1.2 LoRa (Long Range)

A tárgyak kommunikációs követelményeinek kielégítésére számos protokoll és technológia jelent meg, ilyenek az alacsony energiaigényű, nagy kiterjedésű hálózatok (LPWAN= Low Power – Wide Area Network). A z LPWAN hálózat bázisállomások segítségével (nagyon) nagy területre kiterjedő rádiós lefedettséget biztosít, és az átviteli sebességet, átviteli teljesítményt, modulációt, munkaciklusokat úgy alakítja, hogy a végberendezéseknek nagyon alacsony energiafogyasztásuk legyen a csatlakozás miatt. A LoRa WAN (Long Range Wild Area Network) egy ilyen LPWAN protokoll, amely a jelen tanulmány tárgyát képezi. A LoRa mozaikszó az angol Long Range szavakra utal, ami egy új rádiómodulációs eljárást jelent. A LoRa moduláció szórt spektrumú frekvenciamodulált rádióhullámokat használ és digitális eljárások segítségével az eddig használt eljárásokhoz képest jelentős hatékonyságjavulást eredményez. A LoRa olyan telepítéseket céloz meg, ahol a végberendezések korlátozott energiával rendelkeznek (például akkumulátorral működnek), ahol a végberendezéseknek nem kell egyszerre néhány bájtól többet továbbítaniuk, és ahol az adatforgalmat vagy a végberendezés kezdeményezheti (például, ha a végberendezés egy érzékelő), vagy egy külső egység, amely kommunikálni kíván a végberendezéssel (például, ha a végberendezés egy működtető). A LoRa nagy hatótávolságú és alacsony fogyasztású jellege miatt érdekes jelölt a polgári infrastruktúrákban (például az egészségmegőrzés, az intelligens mérés, a környezetfelügyelet). (Augustin, 2016)

2. Irodalmi áttekintés

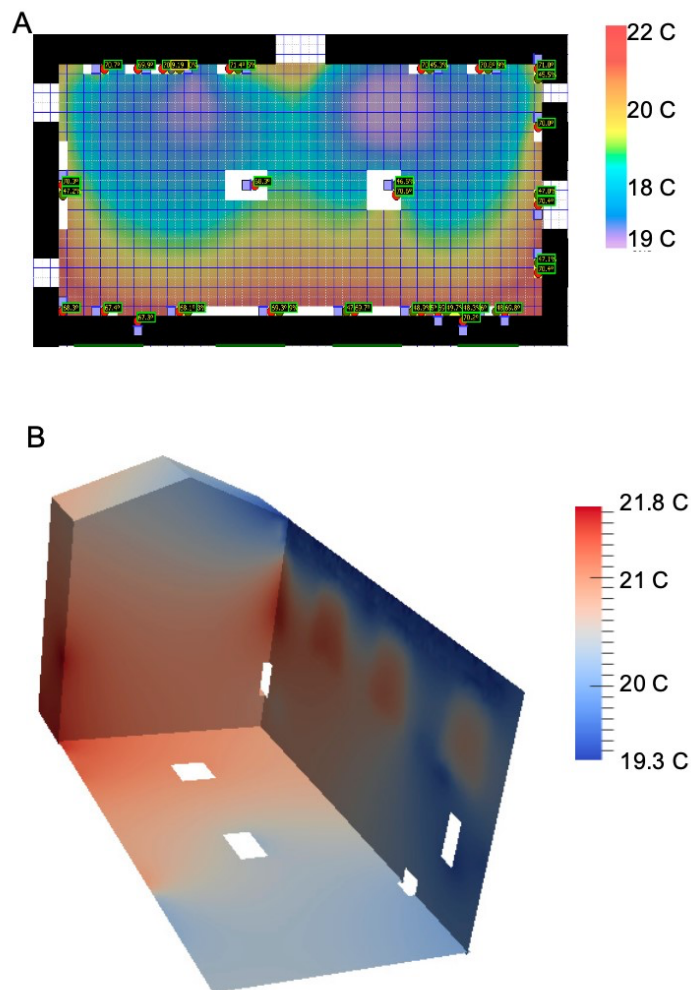
A LoRa népszerűvé válása okán, sok elemző szakirodalmi cikk született. Augustin Alosy et al. cikkében a felvázolt kísérlet célja a LoRa hálózati lefedettségének tesztelése. *„A kísérlet célja a LoRa hálózati lefedettségének tesztelése. A teszteket Párizs egyik külvárosában végeztük, ahol főként alacsony lakóházak találhatóak. A hőmérséklet 15 °C, a környezeti páratartalom pedig 55% volt. A kapu egy ház második emeletén, az ablakon kívül volt elhelyezve. Öt különböző vizsgálati pontot választottunk ki... A végberendezés a tesztek során egy autóban volt.”* (Augustin, 2016) A tesztek célja a LoRa fizikai réteg lefedettségének tesztelése volt különböző terjedési faktorok használatával. A teszt során a LoRaWAN protokollt használó valós LoRa-hálózatban a végberendezések képesek voltak automatikusan növelni a szórás tényezőt, ha az alacsonyabb szórás tényezővel történő adatátvitel sikertelen volt. A cikk középpontjában nem a mérési távolságok kikövetkeztetése

volt az elsődleges cél, hanem a LoRa adat továbbítók közötti adatátviteli kapcsolat vizsgálata. A tesztek jól mutatják, hogy a LoRa kültéri használat közben előnyös kapcsolatot tud fenntartani a kiszolgálóval, de az álló helyzetben lévő autó miatt nem került akadályozó tényező a kiszolgáló és a gazdagép közé, így a cikk csak használati szempontból ad releváns információkat. Ha az autó mozgásban lett volna, valósabb képet kaphatnánk arról, hogyan működik a LoRa más és más távolságok esetén és hogyan hat a kapcsolatra egy-egy zavaró tényező.

Sanchez-Iborra, R. e. által írt cikkben az előző cikkhez hasonlóan hosszasan kitér a LoRa adatátviteli eszközök közötti kapcsolati hálóra, de a mérések melyek a teszt során elvégeztek már egy pontosabb képet adnak az eszközről. *A fentieknek megfelelően különböző LoRaWAN PHY réteg konfigurációkat teszteltünk három környezetben, amelyeket a vezeték nélküli átvitelre vonatkozó sajátos körülmények különböztetnek meg. Ezt az ellenállást az egyes akadályok száma és sűrűsége határozza meg. Így a következő forgatókönyveket vettük figyelembe: i) városi: magas ellenállás a vezeték nélküli körülményekkel szemben; ii) külvárosi: közepes ellenállás a vezeték nélküli körülményekkel szemben; és iii) vidéki: alacsony ellenállás a vezeték nélküli körülményekkel szemben.* (Sanchez-Iborra, 2018) Az általuk elvégzett mérések kimutatták, hogy a városi és külvárosi környezetben az eszköz hatótávolsága körülbelül 7 km-t biztosított, még vidéki környezetben 19 km-volt a maximális hatótávolság. A vidéki mérések során elért eredmények az akadályok teljes hiánya olyan figyelemreméltó maximális hatótávolságot tett lehetővé, amelyet a hagyományos IoT kommunikációs technológiák általában nem érnek el. Ezek a mérések már adnak egy sokkal közelebbi képet az eszközről. Bár a mérések itt is kültéren történtek, ezért az eszköz hatékonysága beltéren továbbra is kérdéses, mivel alkalmanként felmerülő zavaró tényezők esetén a hatótáv az eszközök között több mint a felére csökkent.

A következő szakirodalmi forrásban a kutatók a méréseket 3 éven keresztül a New York-i Metropolitan Művészeti múzeumban végezték el. *A platform több mint 200 érzékelőből áll, amelyeket öt galériában osztottak el a hőmérséklet és a légáramlás felmérésére, valamint a mikroklíma változásainak számszerűsítésére fizikai alapú és statisztikai modellek segítségével. A vezeték nélküli érzékelőhálózat adatai nagyon stabil környezetet mutatnak a galériákon belül, míg a sűrű megfigyelés lehetővé teszi a levegőminőségi tendenciák finom változásainak és a látogatók mikroklíma-állapotokra gyakorolt hatásának lokális megfigyelését. A nagy térbeli és időbeli felbontású adatok alapvizsgálatként szolgálnak a látogatók és az épület üzemeltetése által a műtárgyak hosszú távú megőrzésére gyakorolt*

hatások megértéséhez. (Klein, 2017) Az elhelyezett műszerek nagyon pontos képet tudtak adni az előre kiválasztott teremben.



1. ábra Szempontok szerint figyelemreméltó a mért adatok pontossága. (Klein, 2017)

A mérési adatok jól mutatják, hogy az általunk is vizsgált adattovábbító mennyire hasznos része az épületüzemeltetésnek. De fontos megjegyezni, hogy túlzottan sok eszköz került elhelyezésre, és felmerül a kérdés, hogy egy-egy eszközből, amely képes akadályok esetén akár 7 km-t is áthidalni, miért van rá szükség, hogy az eszközök egymáshoz közel, ilyen sűrűn legyenek elhelyezve.

A cikkekben felvázolt mérések összehasonlítása közben árnyaltabb képet kaphatunk arról, hogy a LoRa milyen környezetben hogyan viselkedik. A szakirodalmi cikkekből jól kivehető, hogy nem véletlenül áll a LoRa egyre nagyobb figyelem középpontjában, de cikkekben készült mérések nem hiánypótlóak minden téren.

3. Célkitűzések

A kutatásunk során az alábbi pontokban felsorolt célokat szeretnénk elérni a mérések által:

- a LoRa működésének feltérképezése és kiértékelése egy műemlék épületben vizsgált viselkedése során,
- az eszköz korlátainak méréssel történő meghatározása,
- az észlelt korlátok számszerűsített vizsgálata, egy valós kép meghatározása, abban a tekintetben, hogy miként hat az eszközök közötti kapcsolatra az épületben található falak, nyílászárók jelenléte a két LoRa egység (gazdagép és kiszolgáló) között,
- a mérések által egy olyan tapasztalat megszerzése, amely később kiegészülve további mérésekkel hasznos információkat szolgáltatathat az eszköz hatékony alkalmazásához.

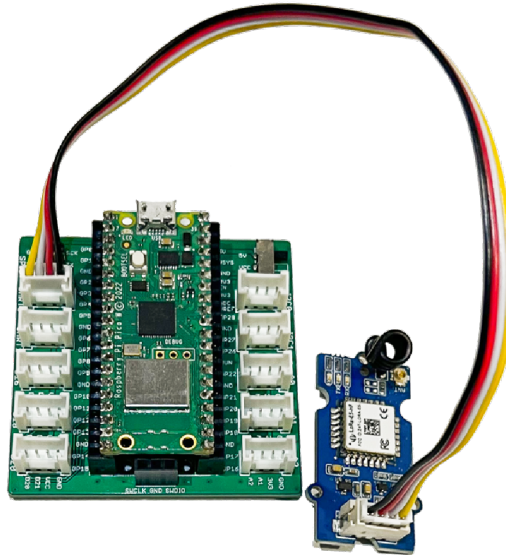
4. Módszer

A méréseket a Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi egyetem épületében végeztük. A helyszín összetett és változatos, így a forrásokban fel nem lelhető kiindulási pontot ad a LoRa feltérképezéséhez. Az épület biztosít számos olyan elemet, ami elképzelhető akadály lehet egy műemlék épület monitorozása során: vastag teherhordó falak, az egymás mellett sorakozó terek falai, összetett födém szerkezetek. A mérések során arra kerestük a választ, hogy mekkora a hatótávolság két LoRa eszköz között, és az akadályozó tényezők miként csökkentik a kapcsolat erősségét.

4.1 Háttér munka a mérések mögött

A mérések elvégzéséhez két laptopra és két LoRa rádiós adattovábbító eszközre volt szükségünk. A két LoRa-E5 használatával lehetővé válik, hogy üzeneteket cseréljünk az eszközök között anélkül, hogy szükség lenne egy LoRaWAN-ra (és így egy LoRaWAN átjáróra). Ahhoz, hogy LoRa valójában egy számítógéphez csatlakoztatható eszköz legyen a következő alkatrészekre volt szükség:

- Grove - LoRa-E5
- Grove Shield a Raspberry Pi Pico-hoz
- Raspberry Pi Pico W mikrokontroller



2. ábra A felsorolt részekből összerakott eszköz

Az így összeállított eszközöket egy USB kábel segítségével csatlakoztattuk a számítógépekhez. A gépekre az Arduino IDE programozó környezetet telepítettük, amely segítségével az eszközt programozni tudtuk. A programkód, amivel az eszközöket programoztuk eltérő volt attól függően, hogy melyik eszköz lesz a gazda (master) és melyik a kiszolgáló (slave) gép, és soros monitor segítségével tudtuk követni a két eszköz közötti kommunikációt.

```
//Rp Pico LoRa test Slave 2023

# include <Arduino.h>

#define NODE_SLAVE

static char recv_buf[512];
static bool is_exist = false;

static int at_send_check_response(char *p_ack, int timeout_ms, char*p_cmd, ...)
{
    int ch = 0;
    int index = 0;
    int startMillis = 0;
    va_list args;
    memset(recv_buf, 0, sizeof(recv_buf));
    va_start(args, p_cmd);
    Serial1.printf(p_cmd, args);
    Serial.printf(p_cmd, args);
    va_end(args);
    delay(200);
    startMillis = millis();
}
```

3. ábra Pico LoRa test Slave - vevőhöz tartozó forráskód részlet

```

//Rp Pico LoRa test Master 2023

# include <Arduino.h>

//#define NODE_SLAVE

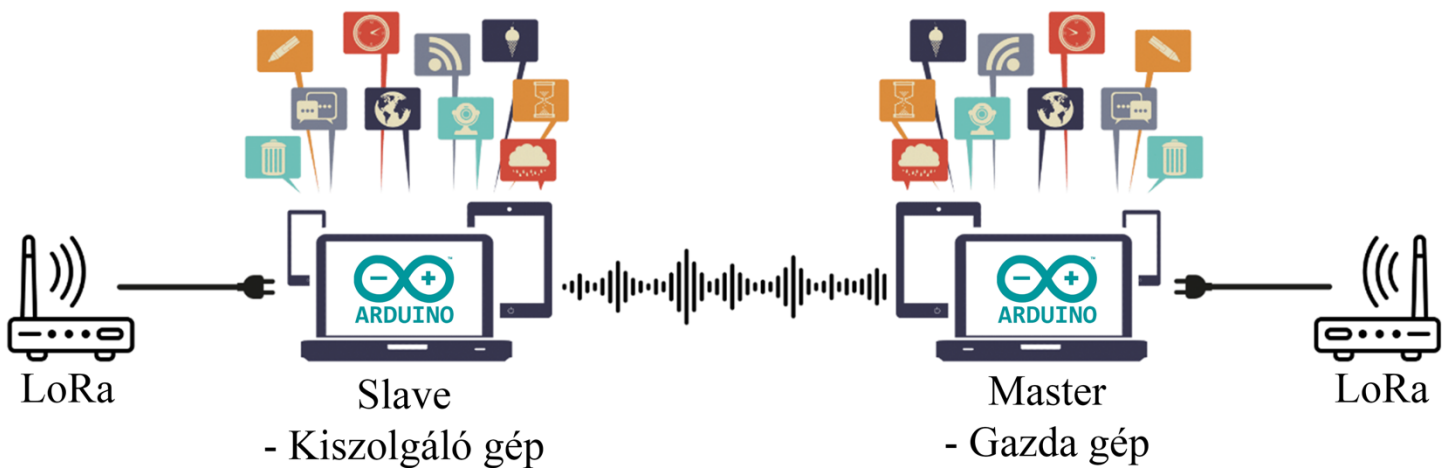
static char recv_buf[512];
static bool is_exist = false;

static int at_send_check_response(char *p_ack, int timeout_ms, char*p_cmd, ...)
{
    int ch = 0;
    int index = 0;
    int startMillis = 0;
    va_list args;
    memset(recv_buf, 0, sizeof(recv_buf));
    va_start(args, p_cmd);
    Serial1.printf(p_cmd, args);
    Serial.printf(p_cmd, args);
    va_end(args);
    delay(200);
    startMillis = millis();
}

```

4. ábra Pico LoRa test Master - adóhoz tartozó forráskód részlet

A továbbiakban már csak a két eszközt különböző távolságokban kellett elhelyeznünk, az Arduino segítségével pedig egy folyamatos képet kaptunk arról, hogy van-e kapcsolat.



5. ábra Kapcsolat architektúrája

5. Gyakorlati megvalósítás

A mérések során a gazda szerepében lévő gép végig az egyetem 2. emeleti Építéstechnológia és Építésmenedzsment Tanszék egyik beltéri szobájában helyeztük el. A mérések során egyáltalán nem került mozgatásra, és végig négy fal közé volt zárva.

Az első mérésorozat során a kiszolgáló szerepében lévő LoRa modul végig mozgásban volt, de a fix pozícióban tartott gazdagéppel ellentétben mozgattuk a 2. emeleten.

Az első mérések során meglepő eredmények születtek. Bár az előzetes forráselemzés során kiderült, hogy a tesztüzem alapján a LoRa több kilométeres hatótávolságot is képes áthidalni, de a vizsgált körülmények között, a kapcsolatot zavaró épületszakaszok miatt, a hatótáv mértéke jelentősen csökkent.

A 30-as folyosón elindulva a kapcsolat közel olyan erős volt, mint amikor a két eszköz egymás mellett volt. A két eszköz között elhelyezkedő két belső teherhordó fal és a közöttük lévő válaszfalak és nyílászárók még nem okoztak különösebb gondot a kapcsolat fenntartása szempontjából.

Egyenesen tovább haladva az 1-es folyosót jelentő kerengőbe érve a kapcsolat szakadozni kezdett. Ezen a ponton a két eszköz távolsága már közel 60-70 méter volt és a jelet három belső teherhordó fal is zavarta, illetve már nőtt a gazda és kiszolgáló között a válaszfalak száma is. Nem elhanyagolható az a tény sem a kerengőben található a büfé is és a folyosókon sétáló hallgatók száma is jelentősen nő. Körbejárva a kerengőt az tapasztaltuk, hogy a vevőhöz közelebbi folyosó részre befordulva a kapcsolat megmaradt, de ehhez képest a túloldalt a kapcsolat teljesen legyengült, pedig a két pont távolsága nem haladta meg a 20 métert. Ez is azt bizonyítja, hogy a teherhordó falak jelentősen befolyásolják az két eszköz közötti teljesítményt.

Egyenesen tovább sétálva a 70-es folyosóra a jelerősség a minimálisra csökkent, a folyosó közepén mérve pedig már egyáltalán nem volt kapcsolat. A két eszköz között 4-re nőtt a belső teherhordó falak száma, a távolság pedig megközelítette a 100 métert. Ebből a mérésből már jól látszik a LoRa hatékonyságának csökkenése a belső térben alkalmazva.

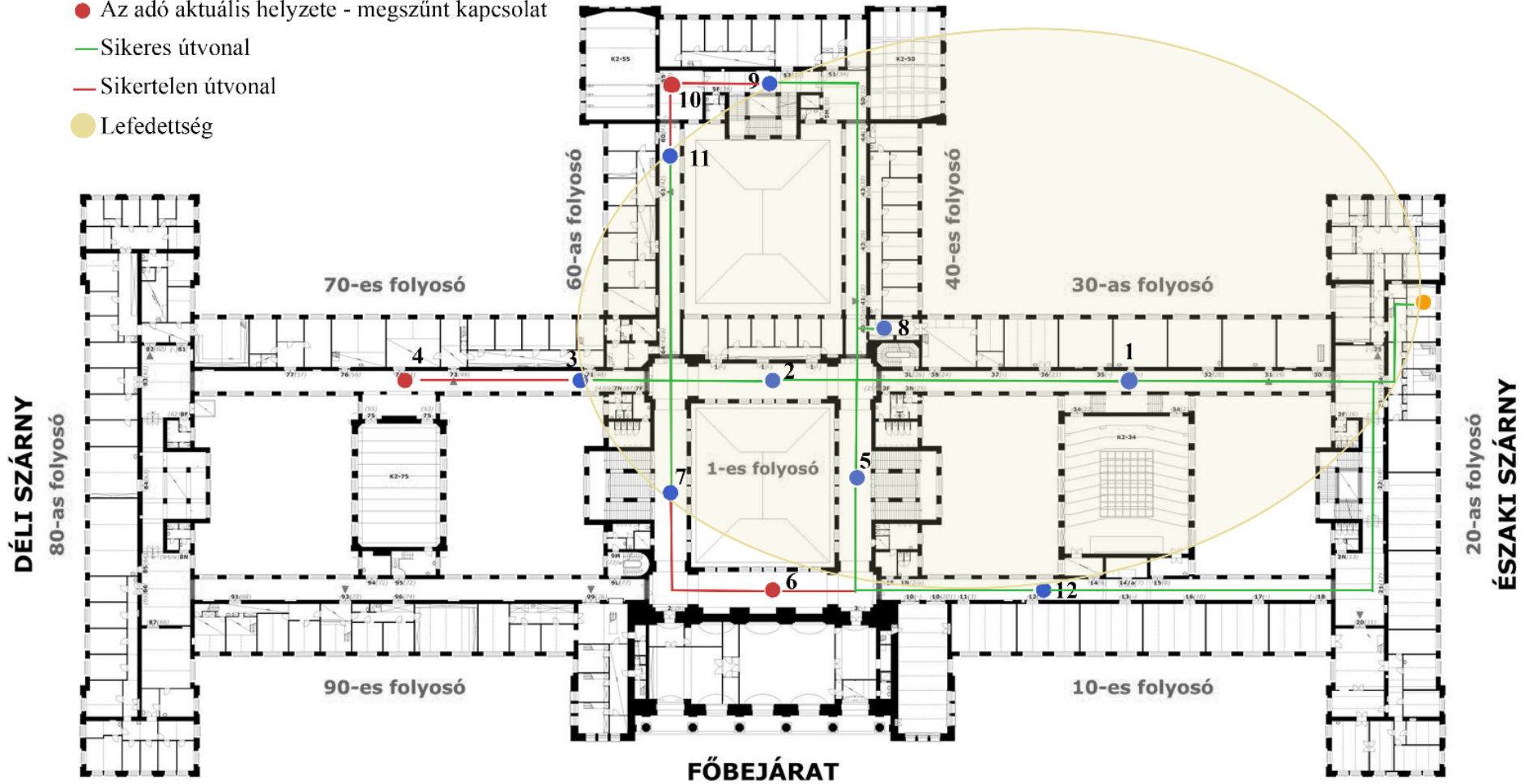
BME K ÉPÜLET

II. EMELET

KÖNYVTÁR

50-es folyosó

- A Vevő helye
- Az adó aktuális helyzete
- Az adó aktuális helyzete - megszűnt kapcsolat
- Sikeres útvonal
- Sikertelen útvonal
- Lefedettségi terület



A 40-es folyosón a gazda betért egy tanszéki szobába, hogy kísérletet tegyünk arra, hogyan viselkedik a LoRa ha az eszköz négy fallal határolt térben helyezkedik el, de ilyen körülmények között kiváló eredményeket tapasztaltunk, a kapcsolat erős volt. Ennél a mérésnél is két külső és belső teherhordó fal, de sokkal több nyílászáróval volt jelen így ebben a helyzetben arra lehet következtetni, hogy a nyílászárók nem törték meg úgy a kapcsolatot, mint a falak.

Az 50-ös folyosóhoz hasonlóan az eszközök között 2 külső és belső teherhordó fal volt jelen, de ebben a helyzetben már a kiszolgáló sokkal inkább takat helyzetben volt, egy zártabb térbe érkezett, a kapcsolat pedig az 5-ös folyosó közepén meg is szűnt.

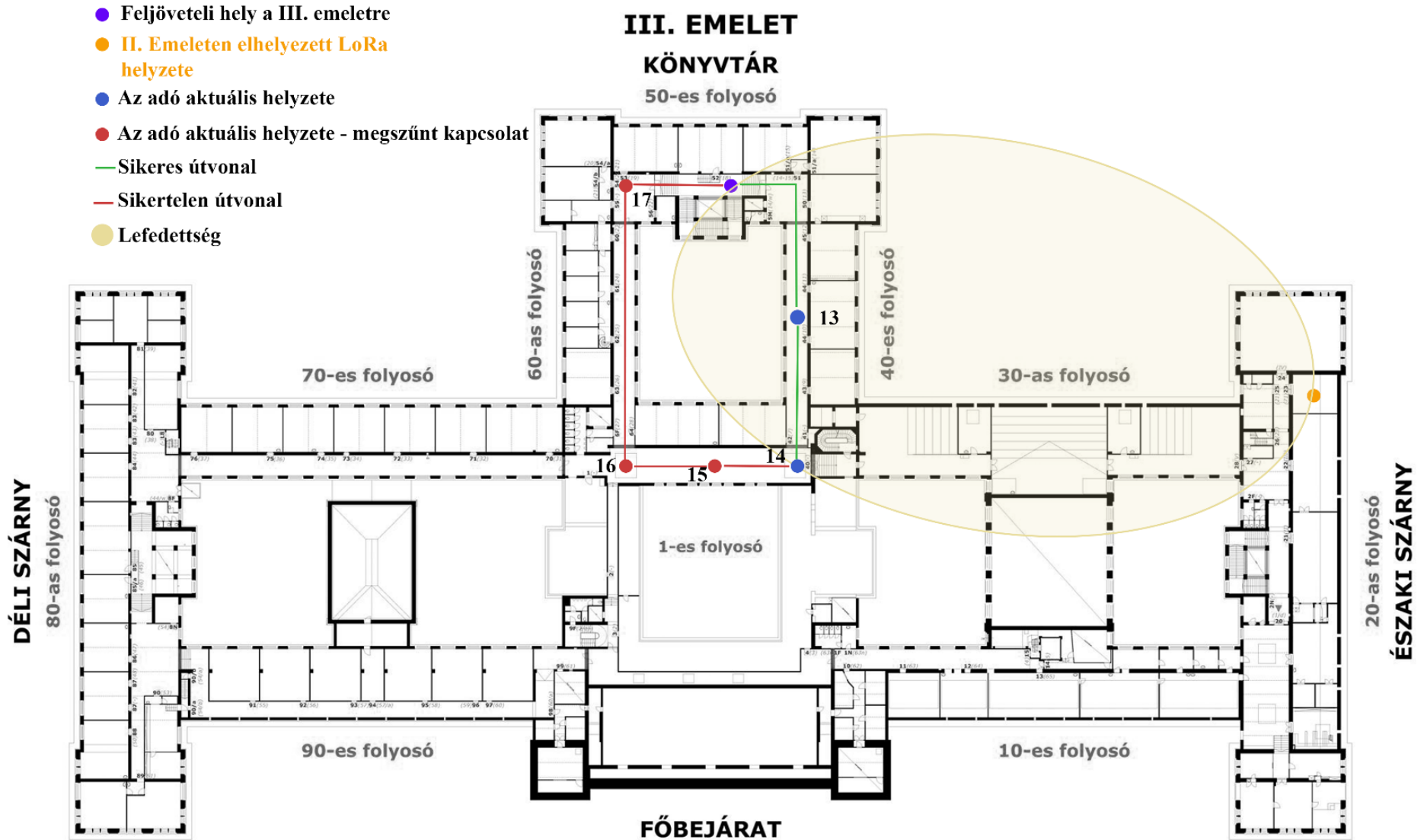
A gazdától nézve a 30-as 20-as és 10-es folyosón végig haladva a kapcsolat végig megmaradt, a legtávoliból ponton gyengült a kapcsolat, de ettől a ponttól távolodva a jel tovább erősödött.

BME K ÉPÜLET

III. EMELET

KÖNYVTÁR

50-es folyosó



- Feljöveteli hely a III. emeletre
- II. Emeleten elhelyezett LoRa helyzete
- Az adó aktuális helyzete
- Az adó aktuális helyzete - megszűnt kapcsolat
- Sikeres útvonal
- Sikertelen útvonal
- Lefedettségi terület

A második mérés sorozatnál a gazda és a kiszolgáló kapcsolatát úgy vizsgáltuk, hogy míg a gazda eszköz a II. emeleten maradt a tanszéki szobában, addig a kiszolgáló gép felkerült a mérésekhez a III. emeletre, így azt tudtuk vizsgálni miként rontja vagy esetleg javítja a kapcsolatot, ha a két eszköz között egy földem is elhelyezkedik.

A 40-es folyosón végighaladva a mérési eredmények hasonló képet mutattak, mint amikor mindkét eszköz egy szinten helyezkedett el: a folyosó közepén volt a legstabilabb a jel, viszont a folyosó végéhez érve a kapcsolat szakadozni kezdett. A két eszköz között a szintváltás miatt elhelyezkedett egy földem, két külső és egy belső teherhordó fal. A földem zavaró hatása több szintváltás esetén fog relevánsabb eredményt adni, ennél a méréssorozatnál a kapcsolat jelentősebb romlása a távolság miatt adódott.

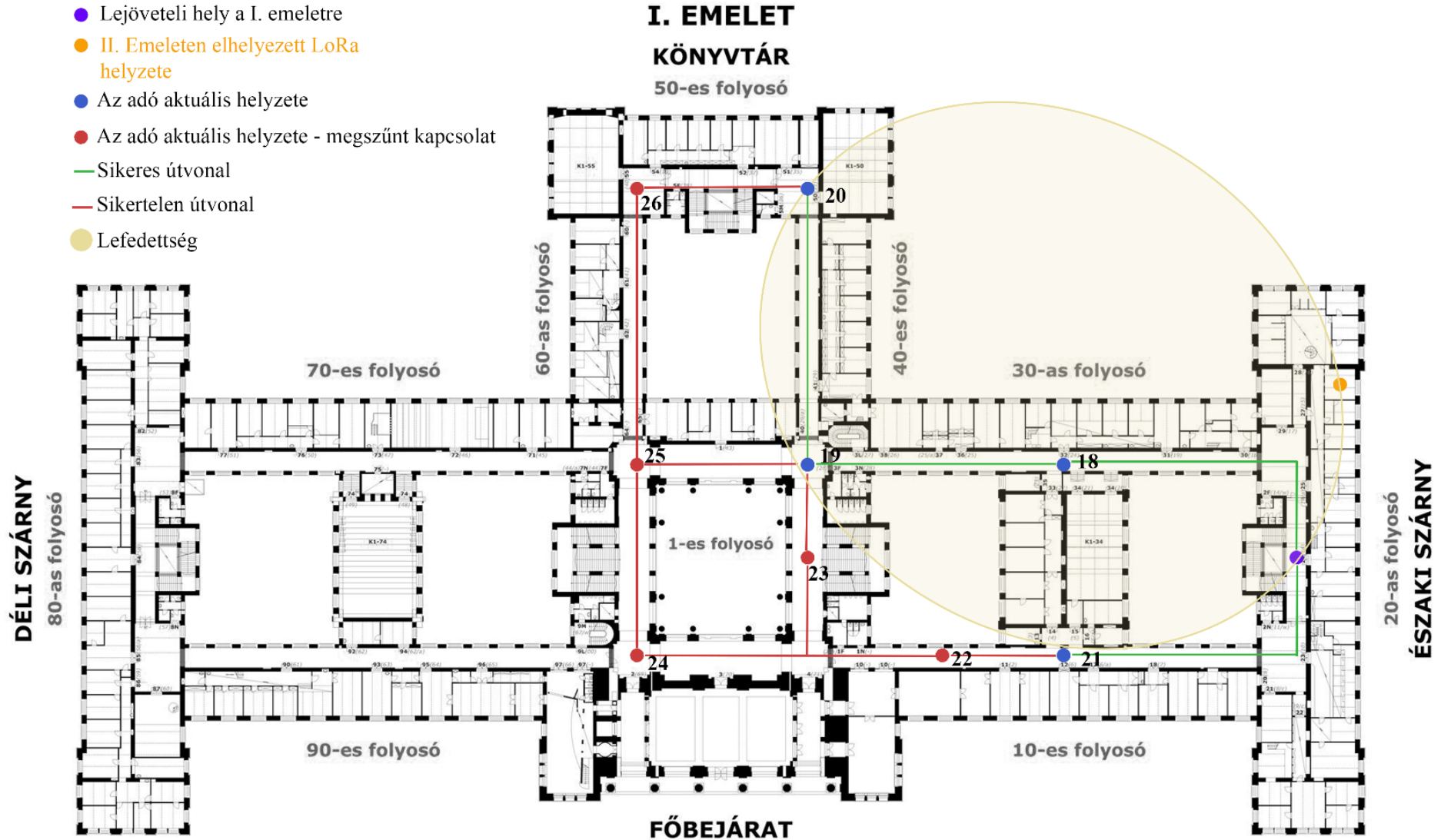
Az 50-es folyosón a 60-as folyosó irányába mozgatva a kiszolgáló LoRa-t a kapcsolat teljesen megszűnt, ami az újabb megjelenő teherhordó falak és a távolság miatt történt.

Az 1-es folyosón egyáltalán nem volt kapcsolat, mivel itt nem volt szerepe újabb szerkezeti elemeknek ez a távolságnak tulajdonítható.

BME K ÉPÜLET

I. EMELET KÖNYVTÁR

50-es folyosó



A harmadik mérésorozat hasonló volt, mint a második, azzal a különbséggel, hogy a szintváltás itt már lefelé történt egy szinttel.

A 20-as folyosón mozgatott kiszolgáló egységstabil kapcsolatot biztosított. Ez azt bizonyítja, hogy egy födém önmagában kevésbé zavarja a jelet, mint egy tartószerkezeti fal.

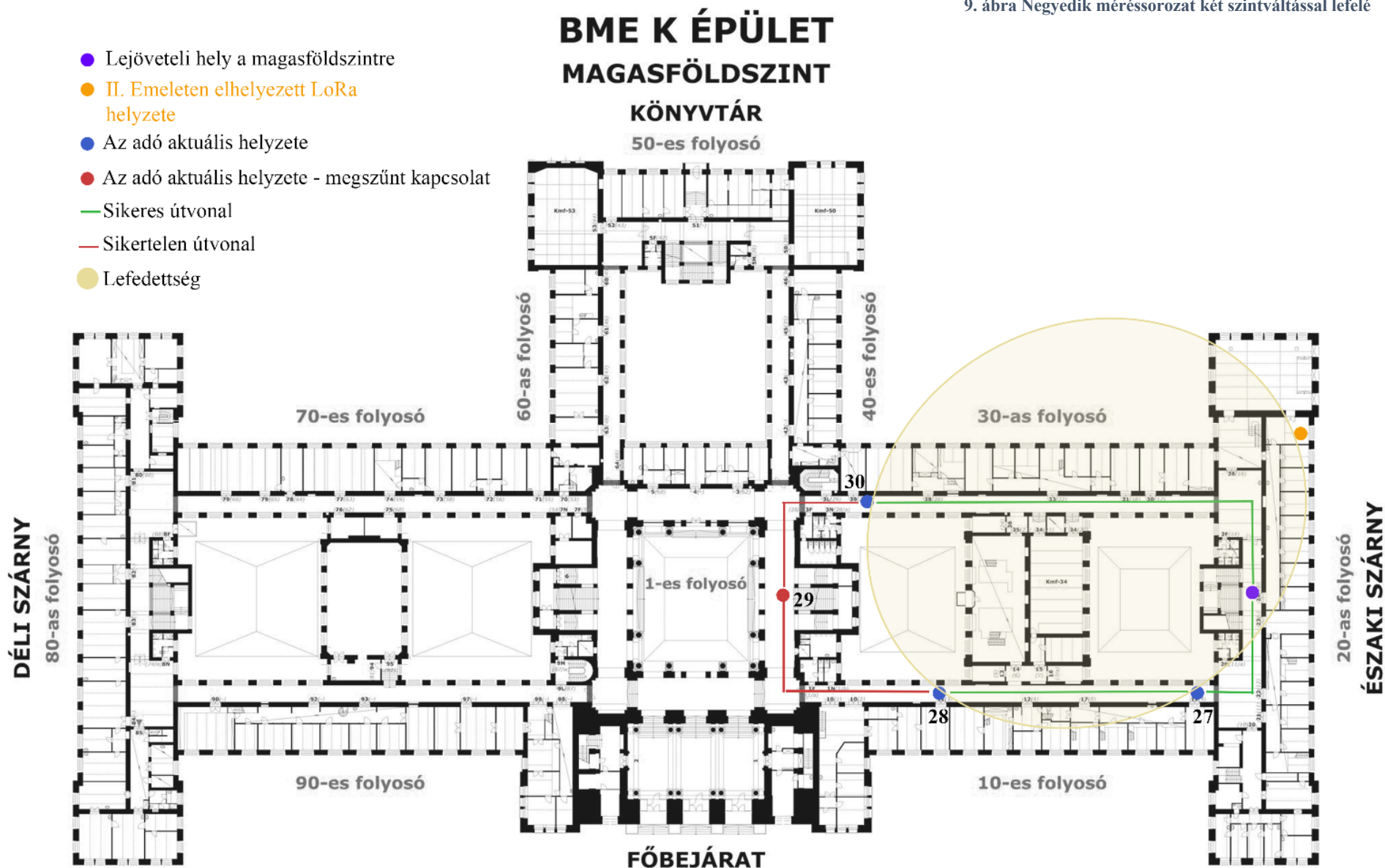
A 30-as folyosón végighaladva a kapcsolat végig fennállt az eszközök között, de a folyosó legvégén az 1-es folyosóra kiérve a kapcsolat megszűnt. Bár ezen a folyosón az eszközök között egy külső és egy belső teherhordó fal volt jelen és egy a két szintet elválasztó födém, a távolság a födém jelenléte miatt jelentősen befolyásolta a kapcsolat erősségét.

A 40-es folyosóra ráfordulva a kapcsolat fennmaradt az eszközök között, a kapcsolat a folyosó közepén volt a legerősebb. Ez leginkább annak köszönhető, hogy bár a kiszolgáló és a gazdagép között két külső és két belső teherhordó fal is jelen volt a nyílászárókkal megtört külső és belső falak nem gátolták a jel erősségét. A folyosó végén viszont megszűnt a kapcsolat, érdemes összehasonlítani az első mérésorozattal: amikor nem történt szintváltás az 50-es folyosó közepéig ért el a kapcsolat, ami közelítőleg csak 10 méterrel van messzebb, mint az itt mért utolsó kapcsolódási pont. Ebből az esetből következtethetünk arra, hogy a födém önmagában nem döntő tényező a kapcsolat létrejöttének szempontjából, csak kis mértékben erősíti a falak okozta gyengítő hatást.

A 60-as folyosón már egyáltalán nem volt kapcsolat, ami nem meglepő annak fényében, hogy a két eszköz között két külső és két belső teherhordó fal van jelen és egy nagy előadóterem is.

Az 1-es folyosón, a kerengőben a 40-es és a 30-as folyosó találkozási pontján egyáltalán nem volt kapcsolat. A 40-es folyosóval ellentétben a kapcsolat megromlása már jóval jelentősebb volt. A két eszköz közé került 5 belső teherhordó fal és egy nagyméretű előadóterem, ami teljesen elzárta a kapcsolatot. Ez már olyan méretű gátló hatást jelent az eszközök számára, amit nem tudnak áthidalni.

9. ábra Negyedik méréssorozat két szintváltással lefelé



A kiszolgáló szerepében lévő LoRa a 20-as folyosón érkezett meg a magasföldszintre, míg a gazda továbbra is a II. emeleti tanszéki szobában maradt.

A 20-as folyosón végighaladva megfelelő erősségű kapcsolatot tapasztaltunk, a két földem nem befolyásolta mértékadóan a kapcsolatot, de igaz, hogy itt az eszközök szinte függőlegesen csatlakoztak egymáshoz.

A 30-as folyosón haladva fokozatosan szakadozott a kapcsolat és pár méterrel a folyosó vége előtt meg is szűnt. A jelet zavarta két földem és két belső teherhordó fal, és már a távolság mértéke sem elhanyagolható szempont.

A folyosók végén és az 1-es folyosóra kiérve a kapcsolat teljesen megszűnt.

A 10-es folyosón hordozva a LoRa-t, szinte végig egy gyengébb jelet tapasztaltunk, ami a folyosó felét elhagyva pár méterrel meg is szűnt. Már az eddig mérések is alátámasztották az itt mért adatokat, a jelet zavarta két földem, négy belső teherhordó fal és egy nagyméretű előadóterem

10. ábra Ötödik méréssorozat három szintváltással lefelé

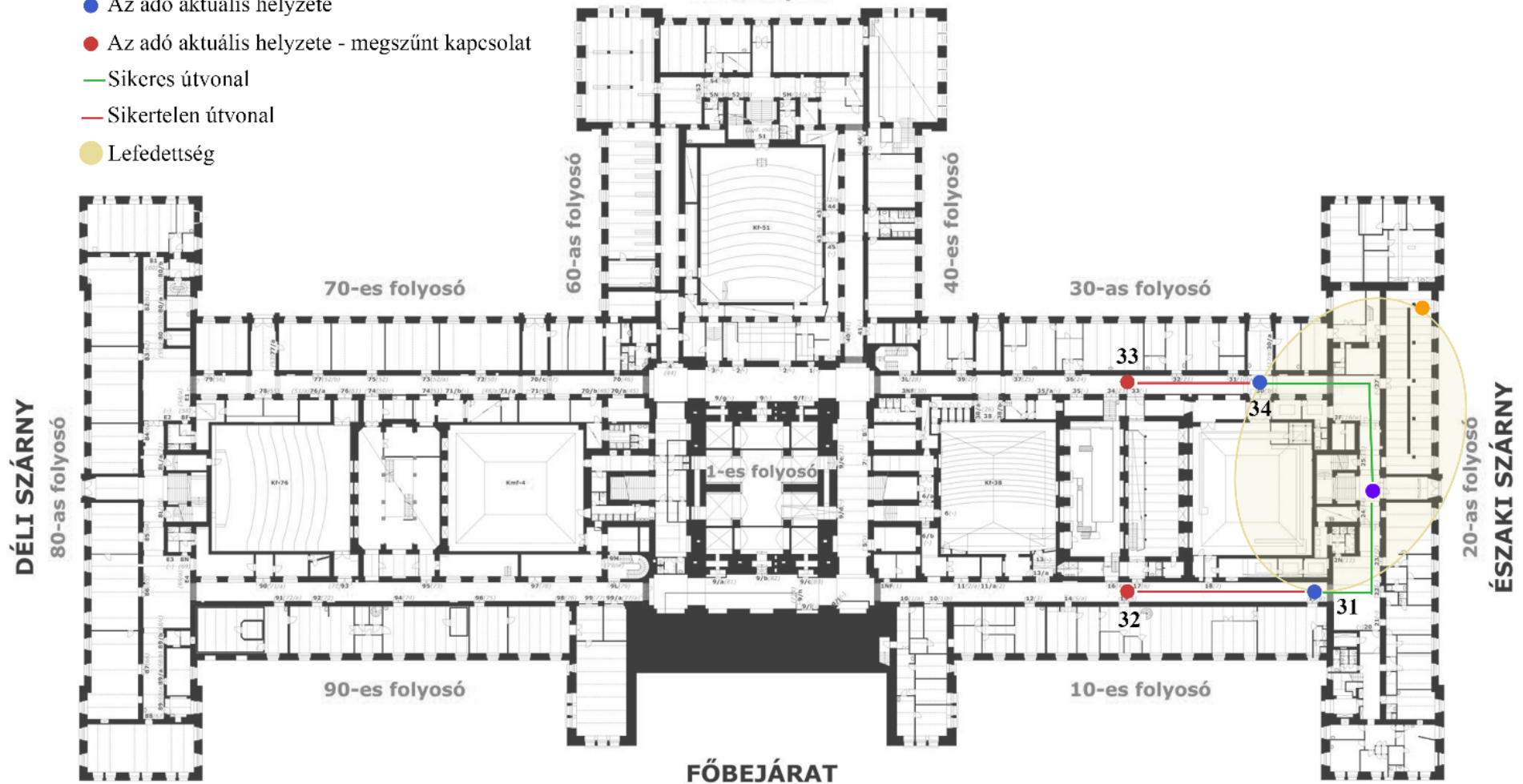
BME K ÉPÜLET

FÖLDSZINT

KÖNYVTÁR

50-es folyosó

- Lejöveteli hely a földszintre
- II. Emeleten elhelyezett LoRa helyzete
- Az adó aktuális helyzete
- Az adó aktuális helyzete - megszűnt kapcsolat
- Sikeres útvonal
- Sikertelen útvonal
- Lefedettségi terület



Az ötödik méréssorozatnál a földszintre a 20-as folyosón keresztül érkezett a LoRa, míg a másik eszköz továbbra is a tanszéki szobában volt a II. emeleten. A földszinten a mérések már egy alacsony területre korlátozódtak, mivel itt már az épületszerkezet mérete és mennyisége miatt a távolság kevésbé volt áthidalható.

A 20-as folyosó teljes egészén mozogva volt kapcsolat az eszközök között, de a jelátvitel már itt is szakadozott. A két LoRa között ezen méréssorozat során már három födém helyezkedett el.

A 30-as folyosón egy pár méter erejéig gyenge jel volt a két eszköz között, de ezután teljesen megszűnt. A jelet zavara három födém, két belső teherhordó fal és a jelentős távolság.

A 10-es folyosón kizárólag az első pár méteren sikerült jelet fogni. A földszinten mozogva a fent jelölt területen kívül nem volt az épületen belül semmilyen kapcsolat az eszközök között.

BME K ÉPÜLET

11. ábra Hatodik méréssorozat kültéri helyzetet vizsgálva



A hatodik méréssorozat félig beltéren félig kültéren zajlott, a gazda szerepében lévő LoRa továbbra is a II. emeleten lévő tanszéki szobában volt elhelyezve, még a másik LoRa-t a 20as folyosóról kivittük az egyetem kertjébe, a következő mérések során pedig végig itt mozgattuk.

Az 20-as folyosóval párhuzamosan sétálva mindkét irányba tökéletes volt a kapcsolat az eszközök között. Mért pontokban a két eszközt egy külső teherhordó fal választotta el. A sokszorosán nyílászárókkal áttört fal semmilyen érzékelhető módon nem akadályozza a kapcsolatot, az eszközök közötti fal vastagságától függetlenül.

Tovább haladva a Könyvtár irányába a kapcsolat továbbra is stabil volt. A 30-as folyosó magasságában elhaladva a két eszköz között egy belső és egy külső teherhordó fal volt az akadály és a jelentősen növekvő távolság volt az, amitől azt vártuk, hogy a kapcsolati jelet gátolja, de meglepő módon (bár a kapcsolat gyengébb lett) továbbra is stabil maradt.

A jelet a Könyvtárhoz érve tapasztaltuk utoljára. Ebben az esetben már két külső és két belső teherhordó fal volt a két eszköz között és egy jelentős távolság, ami a legnagyobb volt azok közül a távolságok közül, ahol még sikeres kapcsolatot tapasztaltunk.

6. Eredmények / Kiértékelés

Első mérésorozat			
Mérések	Szerkezetek	Távolság (légvonalban)	Kapcsolat
1	2 belső teherhordó fal + válaszfal	kb. 30 m	Erős
2	3 belső teherhordó fal + több válaszfal	kb. 70 m	Közepes
3	4 belső teherhordó fal + több válaszfal	kb. 100 m	Gyenge
4	4 belső teherhordó fal + több válaszfal	kb. 120 m	Nincs jel
5	3 belső 2 külső teherhordó fal + több válaszfal	kb. 70 m	Közepes
6	2 belső 4 külső teherhordó fal + több válaszfal	kb. 80 m	Nincs jel
7	5 külső 2 belső teherhordó fal + több válaszfal	kb. 90 m	Gyenge
8	2 belső teherhordó fal + válaszfal	kb. 50 m	Erős
9	2 külső 2 belső teherhordó fal + több válaszfal	kb. 80 m	Gyenge
10	2 külső 2 belső teherhordó fal + válaszfal	kb. 100 m	Nincs jel
11	1 külső 2 belső teherhordó fal + válaszfal	kb. 90 m	Gyenge
12	2 belső 3 külső teherhordó fal + több válaszfal	kb. 80 m	Erős
Második mérésorozat			
13	1 födém + 2 belső 2 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 60 m	Közepes
14	1 födém + 3 belső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 60 m	Gyenge
15	1 födém + 3 belső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 70 m	Nincs jel
16	1 födém + 3 belső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 80 m	Nincs jel
17	1 födém + 2 belső 2 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 100 m	Nincs jel
Harmadik mérésorozat			
18	1 födém + 2 belső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 30 m	Közepes
19	1 födém + 3 belső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 60 m	Gyenge
20	1 födém + 2 belső 2 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 90 m	Gyenge
21	1 födém + 1 belső 2 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 40 m	Gyenge
22	1 födém + 2 belső 3 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 50 m	Nincs jel
23	1 födém + 3 belső 2 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 70 m	Nincs jel
24	1 födém + 3 belső 2 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 100 m	Nincs jel
25	1 födém + 3 belső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 80 m	Nincs jel
26	1 födém + 2 belső 4 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 100 m	Nincs jel

Negyedik méréssorozat			
27	2 födém + 1 belső 1 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 30 m	Gyenge
28	2 födém + 2 belső 3 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 50 m	Gyenge
29	2 födém + 3 belső 2 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 70 m	Nincs jel
30	2 födém + 2 belső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 50 m	Gyenge
Ötödik méréssorozat			
31	3 födém + 2 belső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 40 m	Gyenge
32	3 födém + 2 belső 2 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 60 m	Nincs jel
33	3 födém + 2 belső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 40 m	Nincs jel
34	3 födém + 2 belső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 30 m	Gyenge
Hatodik méréssorozat			
35	1 külső teherhordó fal	kb. 30 m	Erős
36	1 külső teherhordó fal + válaszfal	kb. 50 m	Erős
37	1 belső 1 külső teherhordó fal + válaszfal	kb. 60 m	Erős
38	1 belső 1 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 20 m	Erős
39	1 belső 3 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 50 m	Közepes
40	2 belső 3 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 110 m	Gyenge
41	3 belső 3 külső teherhordó fal + válaszfalak	kb. 120 m	Nincs jel

12. ábra Mérések összefoglalása

A mérések átláthatósága érdekében készítettünk egy táblázatot, hogy egy kompakt és érthető formában tudjuk összehasonlítani az eredményeket. A táblázatban minden mérésnél 3 fő szempontot vizsgáltunk: az eszközök között lévő szerkezetek számát, a távolságot és hogy az előbbi szempontok miként változtatták meg a kapcsolat erősségét. Bár a távolság zavaró tényezők nélkül nem akadály a LoRa-nak, szerkezeti elemek előre nem várt csökkenést eredményeztek a kapcsolatban.

A szerkezeti elemek, melyek befolyásoló hatással voltak a mérésekre:

- kb. 77 cm széles kisméretű tömör téglából épült külső főfal
- kb. 64 cm széles kisméretű tömör téglából épült belső főfal
- kb. 12 cm széles kisméretű tömör téglaválaszfal

- poroszsüveg földem feltöltéssel és habarcsba ágyazott cementkötésű terazzo lap burkolattal

Összességében megfigyelhető, hogy tartószerkezeti szerepet betöltő függőleges elemek (teherhordó falak) befolyásolják a leginkább a kapcsolatot, de ezen belül is a külső teherhordó falak azok, amelynek a jelentős szerkezeti vastagsága okozza a legnagyobb romlást a kapcsolatban. A földemek is befolyásolták a kapcsolatot, és a lefedettség a két eszköz között szintről szintre lefelé haladva egyre kisebb területre korlátozódott.

A táblázat önmagában nem ad elég információt egy eszköz telepítési koncepcióhoz, de segítséget nyújt abban, hogy milyen irányban induljon el, mit vegyen figyelembe az, aki a LoRa használata mellett dönt egy történeti épületben. A táblázat további mérésekkel kiegészítve, például olyanokkal, ahol a kiszolgáló gép más és más helyzetekben van, olyan hasznos információ adatbázissá nőhetné ki magát, amelyből már egy következő szintre lehetne lépni.

Az elért eredményekből az a következtetés vonható le, hogy a rendszer kiépítése előtt értékelni kell a telepítési koncepcióban az eszközök kommunikációs feltételeit, hogy kompromisszumot lehessen kötni a hálózat robusztussága és az adatátviteli sebesség között.

7. Összefoglalás

Ez a dolgozat a következő kérdésekre kereste a választ:

- √ mi az a LoRa,
- √ milyen lehetőségek rejlenek benne beltéren alkalmazva,
- √ hogyan viselkedik az eszköz egy műemlék épületben,
- √ hogyan lehet felépíteni egy kapcsolatot két eszköz között,
- √ mik a határai egy ilyen népszerű adattovábbító eszköznek.

A jelentős mennyiségű szakirodalom sok szempontból erős háttérrel biztosíthat a LoRa használatához, ipari környezetben, és vidéken páratlanul teljesít, így nem véletlen, hogy széleskörben kezdett el terjedni. De a hiány, amit éreztünk a forráskutatás során, hogy a LoRa technológia használatát kevés esetben vizsgálták beltérben, nem bizonyult alaptalannak. Kérdéses, hogy ennek a háttérében mi állhat, de leginkább arra lehet következtetni, hogy bizonyos környezetben magas színvonalon teljesít, így a az eddigi használatok zöme is inkább ebben a környezetben zajlott, így a vizsgálatunk megtalálta azt a rést, ahol érdemes vizsgálatokat végezni. A méréseink során kiderült, hogy az általunk vizsgált eszköz beltérben a zavaró tényezők miatt messze nem tud olyan távolságokat áthidalni, mint kültéren, de az előzetes ismeretek alapján erre nem is lehetett számítani. Ettől függetlenül, ha egy felhasználó a LoRa technológia használata mellett dönt épületének monitorozásához, nem fog rossz döntést hozni, de az eszközök telepítése előtt szükség van az adott épület falain belül a kapcsolat lehetőségeinek az épületszerkezetekkel összevetett tanulmányozására, amihez valamilyen mértékben ezek az eredmények is felhasználhatók. Összességében a LoRa egy fejlett, gyors, kompakt, alacsony energiaigényű, hosszú élettartamú adattovábbító eszköz, ami a jövőben az épületmonitorozás legfontosabb elemévé nőheti ki magát.

8. Irodalomjegyzék

- Sanchez-Iborra, R. e. (2018). "Performance evaluation of LoRa considering scenario conditions." . *Sensors* 18.3 , 772.
- Lee, H.-C. a.-H. (2018). "Monitoring of large-area IoT sensors using a LoRa wireless mesh network system: Design and evaluation." . *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 67.9 , 2177-2187.
- Georgiou, O. a. (2017). "Low power wide area network analysis: Can LoRa scale?." . *IEEE Wireless Communications Letters* 6.2 , 162-165.
- Liando, J. C. (2019). "Known and unknown facts of LoRa: Experiences from a large-scale measurement study." . *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)* 15.2 , 1-35.
- Croce, D. e. (2018). "Impact of LoRa imperfect orthogonality: Analysis of link-level performance." . *IEEE Communications Letters* 22.4 , 796-799.
- Sundaram, J. P. (2019). "A survey on lora networking: Research problems, current solutions, and open issues." . *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 22.1 , 371-388.
- Atanasovski, V. a.-G. (2015). "Future access enablers for ubiquitous and intelligent infrastructures." . *Cham, Switzerland: Springer* 159 .
- Augustin, A. e. (2016). "A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things." . *Sensors* 16.9 .
- Haxhibeqiri, J. e. (2017). "LoRa scalability: A simulation model based on interference measurements." . *Sensors* 17.6 , 1193.
- Klein, L. J. (2017). "Wireless sensor platform for cultural heritage monitoring and modeling system." *Sensors* 17.9 (2017): 1998. *Sensors* 17.9 .
- Pasolini, G. e. (2018). "Smart city pilot projects using LoRa and IEEE802. 15.4 technologies." . *Sensors* 18.4 , 1118.
- Petäjäjärvi, J. e.-p.-a. (2017). "Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage." . *International Journal of Distributed Sensor Networks* 13.3 (.
- Perles, A. e. (2018). "An energy-efficient internet of things (IoT) architecture for preventive conservation of cultural heritage." . *Future Generation Computer Systems* 81, 566581.