



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

Jászberényi Áron István

LORAWAN ÉS 5G ALAPÚ

VÍZDINAMIKAI

SZENZORHÁLÓZAT

KONZULENSEK

Dr. Cinkler Tibor

Dr. Seres Gergely

Dr. Krámer Tamás

BUDAPEST, 2022

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	4
Abstract	6
1 Bevezetés	8
2 IoT szenzorhálózatok LPWAN megoldásai	9
2.1 Elvárások.....	9
2.2 ISM sávokat használó LPWAN technológiák	9
2.2.1 SigFox.....	10
2.2.2 LoRaWAN.....	10
2.3 Cellás mobilhálózatokat használó LPWAN technológiák	11
2.3.1 NarrowBand IoT (NB-IoT).....	11
2.3.2 Long Term Evolution Category M1 (LTE Cat-M1).....	11
2.3.3 5G LPWAN megoldások.....	12
3 Vízhullámmérés mérése	13
4 A használt szenzorhálózat	14
4.1 Rendelkezésre álló eszközök	14
4.1.1 Mérőmodulok.....	14
4.1.2 5G kommunikációs eszköz	15
4.1.3 Fogyasztásmérő	16
4.2 Mérőmodulok működése	16
4.3 Adattárolás és feldolgozás	17
5 Kommunikáció	19
5.1 LoRaWAN.....	19
5.2 5G.....	20
6 Mérések	21
6.1 Mérőmodulok fogyasztása	21
6.1.1 2 magos munkavégzés	22
6.1.2 Alvó állapot.....	23
6.1.3 Távolságmérés	24
6.1.4 Wi-Fi.....	24
6.1.5 LoRaWAN	26
6.2 WNC hotspot fogyasztása.....	27

6.2.1 Adatkapcsolat megosztása Wi-Fi segítségével	29
6.2.2 USB kapcsolatmegosztás	30
6.3 Kiértékelés	34
7 Összegzés.....	36
Irodalomjegyzék.....	37

Összefoglaló

Manapság egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek az automatizálásra minden munkaterületen. A dolgok internete lehetőséget kínál kiterjedt szenzorhálózatok telepítéséhez és költséghatékony működtetéséhez. Számos alacsony energiafogyasztású, ugyanakkor nagy hatótávolságú kommunikációt lehetővé tevő protokoll jelent meg a piacon, mint például a SigFox és a LoRaWAN. A mobilhálózatok is nyújtanak ilyen szolgáltatásokat, melyekből a legelterjedtebbek a negyedik generációs hálózatokban elérhető Cat-M1 és NB-IoT. Az említett megoldások mind LPWAN kommunikációt biztosítanak, ami alacsony fogyasztás mellett teszi lehetővé a ritkán küldött, kis csomagméretű kommunikációt.

A cellás mobilhálózatok legújabb generációjában bár voltak tervek IoT LPWAN kommunikáció megvalósítására is, jelenleg ilyen szolgáltatások egyelőre nem érhetőek el. Az ötödik generációs mobilhálózatok gyors és megbízható kommunikációt tesznek lehetővé az eszközök között. Bár nem IoT szenzorhálózatok támogatása a célja ezeknek a mobilhálózatoknak, nagy hangsúlyt fektetnek a gépek közötti kommunikációra, ami a dolgok internetének is az alapját képezi. Érdekes tehát megvizsgálni, hogy az ötödik generációs mobilhálózatok mennyire képesek egyes IoT szenzorhálózatok megbízható kommunikációjának biztosítására.

Dolgozatomban egy limonológiai szenzorhálózat optimális működtetését tervezem megvalósítani és a távoli monitorozáshoz és adattároláshoz szükséges kommunikációt biztosítani. A szenzorhálózat feladata felszíni vizek hullámvázának vizsgálata. A mérőmodulok akkumulátoros tápellátással kell méréseket végezzenek minél hosszabb ideig ciklikusan. A mérési eredmények hasznos információt nyújtanak tavaink állapotainak vizsgálatára és a szél által kialakuló változások megismerésére, melyre csak kiterjedt szenzorhálózat segítségével van lehetőségünk. A piacon elérhető hullámvázmérő eszközök komoly beruházást igényelnek, ezért több ponton való mintavételezést nem szoktak velük végezni. Az általam használt eszközök kis költségűek és méretűek, így költséghatékonyan tudunk belőlük többet elhelyezni a vizsgálandó területen, ezáltal teljesebb képet kapva a tó helyzetéről. Komoly kihívást jelent, hogy a kialakítandó mérési

környezetben az LPWAN hálózatoknál megszokottól nagyobb a küldendő nyers adatméret a nagy mérési idő és mintavételezési frekvencia miatt.

Először LoRaWAN hálózat segítségével igyekszem megoldani az adatok elküldését és a minél kisebb fogyasztást, majd az ötödik generációs hálózatot használva is megvizsgálom annak használhatóságát. Az új generációs mobilhálózatot használva először a LoRaWAN hálózatot, mint biztonsági redundáns kommunikációt használom, ezért megtartom az ahhoz használt működési struktúrát. Ezek után a működést módosítva megfigyelem, hogy ritkább, tömbösített adatküldés mellett, mennyire megbízható és energiatakarékos rendszer alakítható ki csak a mobilhálózatot használva.

A dolgozat célja az említett limnológiai mérőrendszer igényeit kielégítő kommunikáció és működés vizsgálata. Először egy legolcsóbb módszert (LoRaWAN), majd pedig egy legmegbízhatóbb módszert (5G) használva.

Abstract

In today's workplace, automation is becoming a bigger focus than ever. The Internet of Things offers the opportunity to deploy and cost-effectively operate extensive sensor networks. Several protocols, including SigFox and LoRaWAN, have entered the market to enable low-power but long-distance communication. Such services are also offered by mobile networks. The most popular ones are Cat-M1 and NB-IoT, which are both available in fourth generation networks. All these solutions provide LPWAN communications, which enable low-power consumption and low-packet size for infrequently sent communications.

Although there have been plans to implement IoT LPWAN communication in the latest generation of cellular mobile networks, such services are not yet available. Fifth generation mobile networks enable fast and reliable communication between devices. Although not designed to support IoT sensor networks, these mobile networks place a strong emphasis on machine-to-machine communication, which is also the basis of the Internet of Things. It is therefore worth examining the ability of fifth generation mobile networks to provide reliable communication for some IoT sensor networks.

In my thesis, I plan to implement the optimal operation of a lake monitoring sensor network and provide the communication required for remote monitoring and data storage. The task of the sensor network is the monitoring of water surface fluctuations. The sensor modules must be battery powered and shall take measurements cyclically for as long as possible. The measurement results will provide useful information to study the conditions of our lakes and to understand the wind-driven changes that can only be achieved with an extensive sensor network. The wave gauges that are currently on the market are expensive and rarely utilized for multi-point sampling. The tiny size and low cost of the tools I use make it possible to deploy a number of them in the survey region, providing a more comprehensive view of the lake. A serious challenge is that the measurement environment to be developed has a larger raw data size to be sent than usual for LPWAN networks due to the long measurement time and high sampling frequency.

First, I will try to solve the problem of data transmission and minimize the consumption by using a LoRaWAN network, and then I will investigate its usability using a fifth generation network. Using the next generation mobile network, I will first use the

LoRaWAN network as a backup redundant communication and therefore keep the same operational structure used for it. I will then observe how to develop a reliable and energy-efficient system that uses only the mobile network, with less frequent data transfers, by modifying the operation.

The aim of this thesis is to investigate the communication and operation to meet the needs of this limnological measurement system. First using a cheapest method (LoRaWAN) and then a most reliable method (5G).

1 Bevezetés

Természetes környezetünk megóvása komoly felelőségünk. A környezetvédelem akkor lehetséges, ha ismerjük a természetben lezajló folyamatokat. Azonban ez sokszor kihívásokat helyez elénk. A környezet tavainkra gyakorolt hatása egy olyan téma, amihez sok diagnosztikai adat szükséges. Felszíni vizeink paramétereinek vizsgálata számos nehézséget rejt magában, hiszen a mérőeszközöknek vízállóknak kell lenniük, valamint a hálózati tápellátás és vezetékes kommunikáció is csak ritkán oldható meg.

Dolgozatomban egy vízhullámvíz mérő szenzorhálózat optimalizált működését valósítom meg, különös figyelmet fordítva a hálózat végpontjainak kommunikációjára. A megvalósított szenzorhálózat végpontjai a tipikus IoT (Internet of Things), azaz dolgok internete, megoldásoknál több adatot generálnak. Először egy tipikus LPWAN (Low Power Wide Area Network), azaz alacsony fogyasztású, nagy kommunikációs távolságú hálózati megoldást próbálok alkalmazni, majd az új generációs mobilhálózat szenzorhálózatokban történő alkalmazhatóságát vizsgálom.

2 IoT szenzorhálózatok LPWAN megoldásai

2.1 Elvárások

Napjainkban egyre több területen használunk szenzoros analízist. Szenzorhálózatok segítségével pontosabban és gyorsabban tudjuk megállapítani a környezeti változásokat, mint csupán emberi megfigyeléssel. A szenzorhálózatok lényege, hogy több helyen történő rendszeres mintavételezéssel végzünk vizsgálatokat. Ahhoz, hogy sok szenzort tudjunk elhelyezni, fontos szempont az alacsony költség. Így bár maguk a szenzorok nagyobb hibahatárral dolgoznak, a többponton vett mintavételezés mégis pontosabb eredményeket hozhat, mint az egy darab pontos minőségi eszközzel történő vizsgálat. Bizonyos esetekben nagy területen kell elhelyezni a szenzorokat és a folyamatos tápellátás sem megoldható. Ilyen körülményeket jelent például a tavak vizsgálata. Ezeknek az IoT szenzorhálózatoknak a kommunikációját hivatottak megvalósítani a különböző LPWAN megoldások, melyek olcsó, nagy kommunikációs távolságú, alacsony fogyasztású kommunikációt tesznek lehetővé. Az LPWAN megoldások hátulütője az alacsony adatsebesség és a gyenge szolgáltatásminőség elérhetősége a kommunikációs hibákkal szemben.

2.2 ISM sávokat használó LPWAN technológiák

Az LPWAN technológiák a kommunikációhoz használhatnak szabadon hozzáférhető, illetve licenszköteles frekvenciatartományokat is. A szabadon hozzáférhető frekvenciatartományok, angolul Industrial Scientific and Medical (ISM) sávok használatát az European Telecommunications Standards Institute (ETSI) intézménye szabályozza Európában [1]. Európában a 868MHz-es ISM tartomány használata elterjedt az LPWAN megoldások között. Fontos, hogy az egyes ISM sávokhoz gyakran úgynevezett Duty Cycle-t, azaz aktív ciklusidőt is rendelnek, ami megadja, hogy az idő hány százalékában lehet aktív kommunikáció az eszközök között. A Duty Cycle a 868 MHz-es tartomány esetében 1%. Két világszerte elterjedt ISM tartományt használó LPWAN megoldás létezik:

- SigFox
- Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)

2.2.1 SigFox

A SigFox egy Franciaországból induló kezdeményezés. Az IoT eszközök az ISM tartományokat használva kommunikálhatnak a bázisállomásokkal. Az eszközök az Ultra Narrow Band (UNB) – ultra keskeny sávú – modulációt használják a kommunikációhoz, amely robosztus megoldás a keletkező zajok ellen. A véletlen hozzáférésű, egyirányú információáramoltatás csökkenti az üzenetváltások számát. Az eszközök az üzenetek ütközésmentes továbbításának valószínűségét véletlen frekvenciát választott ismételt küldésekkel növelik. A rádiós egység, amit a végpontok használnak olcsón előállítható az egyszerűségének köszönhetően [2]. Bár az ISM sáv használata nem díjköteles, a SigFox egy zárt hálózat, aminek a használata előfizetés mellett vehető igénybe [3]. Maximálisan napi 140 darab 12 bájtos üzenet küldhető 100 vagy 600 bit/másodperc adatsebesség mellett [4].

2.2.2 LoRaWAN

A LoRAWAN a 443 MHz-es és a 868 MHz-es ISM tartományt használhatja Európában. A SigFoxhoz képest sokkal kisebbek a felhasználói limitációk. A LoRaWAN a Longa Range (LoRa) modulációt használja az LPWAN kommunikáció megvalósításához. A LoRa a Chirp Spread Spectrum (CSS), azaz csipogó szórt spektrum modulációt használja a gép-gép kommunikáció során. Az ortogonális szórt tényezők használatának köszönhetően különböző adatsebességek állíthatók be a kommunikációhoz. Azonban minél nagyobb adatsebességet választunk, annál kisebb a maximális kommunikációs távolság. Az adatsebesség változtatásával a küldhető adatméret is változik. Alacsonyabb adatsebesség mellett 51 bájt, míg maximális adatsebesség mellett 222 bájt a maximális adatméret. Lehetőség van az alkalmazkodó sebesség állításra is, ami az észlelt jelerősség függvényében állítja a végpontok által használt adatsebességet. Az IoT alkalmazások számára a csillagtopológiát használó LoRaWAN protokoll használható. LoRaWAN hálózatot számos operátor üzemeltet több országban, de akár személyes zárt magánhálózat is kialakítható, így külön előfizetés sem szükséges a használatához. A rádiós egységek a végpontokban olcsón beszerezhetőek és viszonylag egyszerűek, azonban a bázisállomások drágábbak és bonyolultabbak. A LoRaWAN hálózatban a végpontok többféle működési módban kommunikálhatnak, akár a beérkező csomagok nyugtázása is lehetséges. Fontos, hogy az adattovábbítás titkosítva történik a végpontok és a szerver között [5].

2.3 Cellás mobilhálózatokat használó LPWAN technológiák

Az IoT a Long-Term Evolution (LTE) szabvány megjelenésekor kapott nagy hangsúlyt a cellás mobilhálózatokban. Ekkor merült fel az LPWAN megoldások támogatásának igénye is. A 3rd Generation Partnership Project (3GPP) szabványba is belekerültek a különböző IoT megoldások, mint például a Long Term Evolution Category 1 (LTE Cat-1), illetve a Long Term Evolution Category 0 (LTE Cat-0) is. Később megjelentek az LPWAN kommunikációhoz alacsonyabb fogyasztást és adatsebességet kínáló megoldások is, melyek a NarrowBand IoT (NB-IoT) és a Long Term Evolution Category M1 (LTE Cat-M1). A mobilhálózatok esetében a kommunikáció a licenszköteles frekvenciatartományokban történik, amit az egyes szolgáltatók vesznek meg és a használhatóság feltételeit maguk szabják meg, tehát nincsen külön aktív ciklusidő megkötés. Az említett IoT kommunikációs technológiák használatához, mindenképp valamelyik szolgáltató hálózatát tudjuk csak használni előfizetés ellenében.

2.3.1 NarrowBand IoT (NB-IoT)

A NarrowBand IoT a 3GPP 13. kiadásában (Rel. 13) lett definiálva [6]. A szabvány alapján az LTE védősávokat és az LTE sávokat képes használni. 200 kHz keskeny-sávú modulációt használ az NB-IoT. Kis költségű rádiós egységekkel biztosítható az alacsony fogyasztás és a nagy kommunikációs távolság. A maximális adatsebesség 250 kilobit/másodperc. A napi üzenetek limitálását a szolgáltatók adják meg, azonban ez általában napi 1-2 üzenetet jelent szenzoradatok esetében [7].

2.3.2 Long Term Evolution Category M1 (LTE Cat-M1)

A Long Term Evolution Category M1 szabvány a NarrowBand IoT-val együtt a 3GPP 13. kiadásában (Rel. 13) lett definiálva [6]. A hálózati késleltetés 10-15 milliszekundum közötti. A kínált le- és feltöltési sebesség 1 Mbps. A használt sáv szélesség 1,4 MHz. Az NB-IoT-hoz hasonlóan a rádiós egységek olcsón beszerezhetőek és nagy kommunikációs távolságot biztosítanak. Az eszközök fogyasztása változó, 100-200 milliamper körüli is lehet [8][9].

2.3.3 5G LPWAN megoldások

Az LTE Cat-M1 és NB-IoT szabványok az új generációs mobilhálózatokban továbbra is elérhetővé válnak. Az LPWAN technológiáknak kétféle telepítési módja lehetséges az 5. generációs hálózatokban:

- Cat-M1/NB-IoT kettős üzemmódú
- NB-IoT együzemmódú

A kettős üzemmódú telepítés sokoldalú felhasználhatóságot kínál a két LPWAN megoldást ötvözve. Kettős üzemmód esetében a Cat-M1 térerő csökkenésekor lehetőségessé válik az NB-IoT kommunikációra való átállás. Ezáltal biztosított a nagy kommunikációs lefedettség és a viszonylag nagy átviteli sebesség.

A Cat-M1 és NB-IoT eszközök 5. generációs mobilhálózatokhoz való csatlakoztathatóságát a 3GPP 16. kiadása (Rel. 16) határozza meg [10]. Az újabb előírások megvalósítása kihívást jelenthet a költségérzékeny cellás mobilkommunikációt alkalmazó IoT piac számára, nemcsak a megnövekedett összetettség, hanem a piac széttagoaltsága miatt is [11]. Jelenleg még ezek a megoldások nem használhatóak és bár valószínűleg jobb szolgáltatás minőséget képesek nyújtani, számos kihívást is rejtenek magukban [12].

3 Vízhullámzás mérése

A tógazdálkodási feladatok számos része csak akkor okosítható fel, ha folyamatosan nyomon tudjuk követni a tó aktuális állapotát. Hosszútávú megfigyelésekkel pedig az előrejelzések is pontosíthatóak. A különböző vízmonitorozó rendszereknek a szélsőséges környezetben (például orkán erejű viharban, és szélsőséges vízállásnál) is működőképesnek kell lenniük, ezért komoly beruházást jelentenek. A magas eszköz költségek miatt a tavak egyidejűleg több helyszínen történő vizsgálata egyidőben csak nehezen megoldható. Hazánk legnagyobb taván, a Balatonon, jelenleg sincs operatív hullámzásmérés, csupán kutatási célból voltak időszakos mérések több pontban [22].

A tavak limonológiai modellezése a hagyományos értelemben vett átlagos LPWAN IoT szenzorhálózatoktól kissé eltérő igényekkel bír. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék munkatársainak ajánlása alapján a mérések feldolgozásához a mérési ciklusokban a mintavételezések sűrűsége nagyjából 8 Hz kell legyen tavainknál, hogy a Nyquist–Shannon mintavételezési tétel értelmében rekonstruálható legyen a hullámzás. A mérési ciklus során gyűjtött minták száma a gyors Fourier-transzformáció miatt célszerűen kettő hatványa kell legyen, de legalább 1024 minta, mert a statisztikák számításához ez szolgálat elegendő számú – a szakirodalmi ajánlások szerint legalább 100 db – hullámot. Az ekkora mintaszám miatt keletkező adatmennyiség az internetes sáv szélességnek csupán elhanyagolható részét használja ki, ugyanakkor egy LPWAN IoT hálózat számára igen megterhelő.

A hullámzás mérésére számos lehetőség van. Lehetséges a vízfelszínen úszó mechanikus in situ bójak és vízmércék használata, illetve víznyomás alapú eszközök igénybevétele is. A hullámzást távérzékeléssel is lehet vizsgálni, amikor is a mérőmodulok a vízfelszín felett, vagy alatt fixen elhelyezve ultrahangos távolságmérő segítségével figyelik a vízfelszín változását. A megfelelően mintavételezett mérésekből könnyen kiszámíthatóak a különböző hullámparaméterek, mint például a szignifikáns hullámmagasság és a periódusidő. Az eredményekből a Pierson-Moskowitz, vagy JONSWAP spektrum használható a kifejlett hullámzás modelljeként [13].

4 A használt szenzorhálózat

4.1 Rendelkezésre álló eszközök

4.1.1 MÉRŐMODULOK

A használt mérőmodulok magját egy-egy ESP32-es System on a Chip (SoC), azaz egy chipre integrált rendszer (mikrokontroller) adja. Ehhez csatlakoznak a különböző mérőmodulok és működést segítő eszközök:

- 3 darab DS18B20 vízálló hőmérő modul
- JSN-SR04T vízálló ultrahangos távolságérzékelő modul
- DS3231 RTC óramodul
- Napelem + töltésvezérlő
- NCR18650B Li-ion akkumulátor

Az eszközök a modulhoz készített nyomtatott huzalozású lemezen helyezkednek el. A mikrokontroller típusa: LILYGO TTGO LORA32 V2.0 868/915MHz [21]. A mikrokontrollerbe az alábbi vezeték nélküli technológiák vannak integrálva:

- Wi-Fi
- Bluetooth
- LoRa

A mérőmodulokat összeszerelt állapotban kaptam kézhez. A 4.1. ábra szemlélteti a modulok kialakítását és terepen való elhelyezését.



4.1. ábra Limnológiai műszer Csopak kikötőjében

4.1.2 5G kommunikációs eszköz

A piacon számos 5G kommunikációra alkalmas mobiltelefon van már jelen, azonban különálló 5G modulok még csak nehezen elérhetőek hétköznapi használatra. Sajnos nem sikerült beszerezni olyan 5. generációs mobilhálózatokhoz való kommunikációs modult, amit az ESP32 mikrokontrollerhez lehetne integrálni. Az 5G hálózatra való csatlakozáshoz egy mobil hotspot állt rendelkezésemre. A Wistron NeWeb Corporation (WNC) cég által készített mobil hotspot a 4.2. ábrán látható.



4.2. ábra 5G mobil hotspot

Az eszköz a középsávós 5G nem önálló (non-standalone (NSA)) architektúráját használja, illetve a nagy teljesítményű LTE-hozzáférést is támogatja. Universal Serial Bus (USB), illetve Wi-Fi kapcsolat segítségével lehet hozzá kapcsolódni. Dolgozatomban feltételeztem, hogy a későbbiekben a különálló 5G kommunikációs modulok is elérhetőek lesznek majd a technológia használatának terjedésével. A hotspothoz a mérőmodulok Wi-Fi segítségével csatlakoznak jelenleg. A méréseket és számításokat igyekeztem úgy végezni, hogy modellezni tudjam azt az állapotot, amikor a mikrokontrollerhez közvetlenül csak a kommunikációs modult csatlakoztatnánk, tehát a Wi-Fi kapcsolat és a hotspot különálló fogyasztása nem lenne jelen.

A hotspot Android alapú, menüje nagyon egyszerű és az alábbi módokat lehet benne beállítani:

- Repülőgép üzemmód (nincs rádiós kapcsolat)

- Mobil adatkapcsolat
- Wi-Fi hotspot
- USB tethering (kapcsolat megosztás USB-n keresztül)

A kommunikációhoz az Ericsson Magyarország Kft. és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem közös kutatási és fejlesztési együttműködése által kialakított 5G teszhálózatot használtam.

4.1.3 Fogyasztásmérő

A mérőmodulokkal szemben az egyik legfontosabb kritérium az alacsony fogyasztás, hiszen a célunk, hogy az eszközök minél hosszabb ideig tudjanak mérni, mivel az állandó felügyeletük és tápellátásuk nem megoldható.

Ahhoz, hogy az eszközök működési fogyasztásáról átfogó képet kapjak, minél sűrűbben kell mintavételeznem az aktuális fogyasztást, tekintettel arra, hogy az egyes eszközállapotok (például adatküldés) nagyon rövid idő alatt zajlanak le és változnak. A kézi multiméterekkel az ilyen fajta mérés nem megoldható. Mivel terepen kellett a méréseket elvégezni, így oszcilloszkóp használata sem volt lehetséges tápellátás hiánya miatt.

A fogyasztásmérésekhez végül egy ESP8266 SoC modulra épülő Wemos D1 mini pro mikrokontrollerrel vezérelt INA226 nagy pontosságú fogyasztásmérő modult használtam 0,01 Ohm sőtellenállással. Az eszköz megfelelő felprogramozása után nagyjából 35 milliszekundumos mintavételezési gyakoriságot és 0,1 milliamper felbontást értem el.

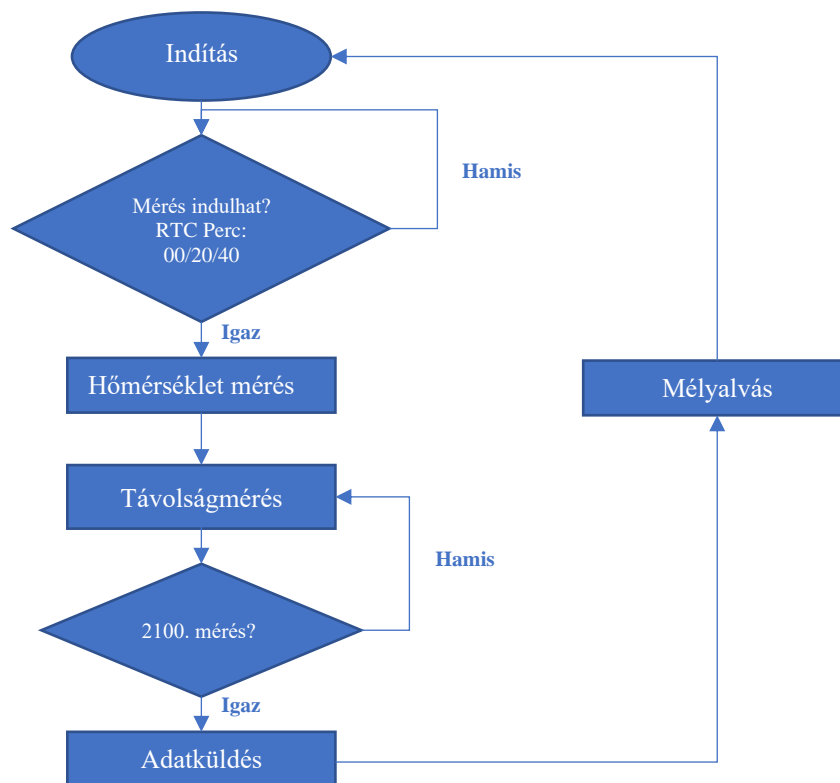
4.2 Mérőmodulok működése

A mérőmodulok kiinduló mérési modelljét szakdolgozatomban dolgoztam ki alapvető LoRaWAN kommunikáció megvalósításához [14]. A mérés során használt rendszerhez kisebb módosításokat vittem végbe. A mérőmodulok mintavételezési paraméterei:

- 20 perc/mérési ciklus kezdés
- 2100 mérés/mérési ciklus, azaz 4,4 perc, a ciklus 22 százaléka
 - később 1050 mérés/mérési ciklus

- 8Hz mintavételezési frekvencia (távolságmérő)

Az eszközök a mérések elvégzése után LoRaWAN, vagy pedig 5G (Wi-Fi) hálózaton keresztül továbbítják az adatokat egy PostgreSQL adatbázisba. Amikor a modulok nem végeznek méréseket, illetve adatküldést, mélyalvó üzemmódba kerülnek energia megtakarítás céljából. A mérőmodulok egyszerűsített folyamatábrája a 4.3. ábrán látható.

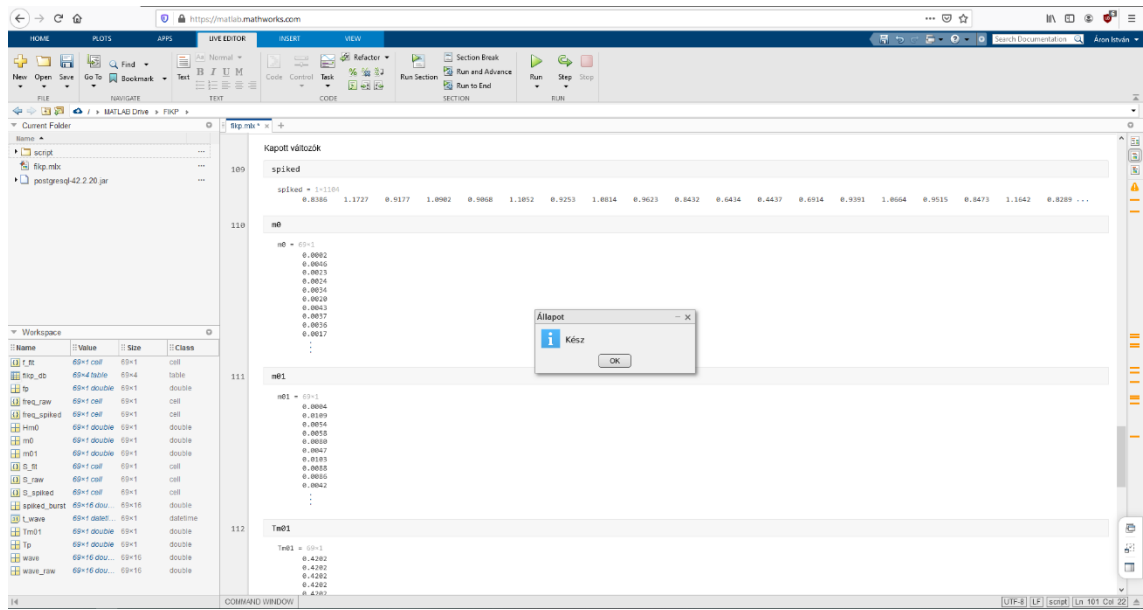


4.3. ábra Mérőmodul folyamatábra

4.3 Adattárolás és feldolgozás

Bár két különböző adatküldési megoldást alkalmazok, az adatokat minden esetben egy PostgreSQL adatbázisban tárolom. A `vm.smallville.cloud.bme.hu` virtuálisgép szolgáltatását használva valósítottam meg és futtatom az adatbázist Linux környezetben.

A tárolt adatok feldolgozása a Matlab Online szolgáltatás segítségével történik [15]. Az adatbázis-kapcsolat létrehozásához a Database Explorer alkalmazást használtam [16]. Az alkalmazás Java Database Connectivity (JDBC) alapon lehetővé teszi a PostgreSQL adatbázishokhoz való kapcsolódást. Végül pedig egy Matlab szkript segítségével megosztható módon végezhetőek el a kívánt adatfeldolgozási számítások. A Matlab Online kelelőfelülete a 4.4. ábrán látható.



4.4. ábra Matlab Online kezelőfelület

5 Kommunikáció

Az adatok továbbítására a mérőmodulok és a PostgreSQL adatbázis között kétféle kommunikációs megvalósítást implementáltam. Az egyik a LoRaWAN hálózaton történő továbbítás, míg a másik az 5G hálózaton történő kommunikáció. A Cat-M1 használata egy egyértelműen megfelelő választás lenne, azonban ennek a dolgozatnak a célja, hogy megvizsgálja a további kommunikációs megoldások használhatóságát. A SigFox a napi limitáció mellett nem lenne alkalmas ennyi mérés elküldésére. A LoRaWAN használata nem kizárt és egy olcsóbban fenttartható hálózatot jelentene, hiszen nem vagyunk rászorulva sem szolgáltatás előfizetésre, sem frekvencia használati díj fizetésére. Az 5G hálózat használata nem LPWAN megoldás, azonban kellően nagy kommunikációs lefedettséget és megbízható adattovábbítást biztosít, így érdemes megvizsgálni, hogy a tárgyalt szenzorhálózat számára megfelelő kommunikációt tud-e nyújtani. Az 5G használatának terjedésével, egyre több kommunikációs modul lesz várhatóan elérhető és az árak is csökkenni fognak, ami a szenzorhálózatokban történő használatot is kedvezőbbé teszi.

5.1 LoRaWAN

A végpontok a mért eredményeket egy általam korábban (szakdolgozatom során) telepített LoRaWAN hálózat felé továbbítja [14]. A LoRaWAN hálózat internet kapcsolaton keresztül továbbítja az adatokat a PostgreSQL adatbázisba.

A LoRaWAN hálózat nem ilyen nagy adatkommunikációra van kitalálva, hiszen 1% aktív ciklus idő engedélyezett csupán. Illetve a csomagméret is maximálisan 222 bájt hasznos adat lehet. A használt távolságmérő milliméteres felbontású, de csupán ± 1 centiméteres pontossággal dolgozik [17]. A távolságmérőt nem szabad túl közel helyezni a vízfelszínhez, mivel nagy vízszint ingadozásokkal kell számolni. Amennyiben több, mint 1 méter távolságban helyezük el az eszközt, úgy a távolság 1000 milliméter, azaz 4 bájt adatot jelent egy mérés. A küldéskor a méréseket valahogy el kell egymástól különíteni, ami szintén 1 bájt plusz adatot jelent. A méréseket több héten át célszerű végezni ideiglenes kihelyezés esetén is, mivel nem tudjuk, hogy a mérés során biztosan lesznek-e mértékadó szelek. Minden mérési ciklushoz szükséges elküldeni a ciklus kezdetének idejét az évszámot leszámítva, illetve a hőmérsékletet is a távolságméréseken kívül. A küldendő adatméret az 5.1 képlet alapján több, mint 1 kilobájt.

$$2_{(idő)} \cdot 6 + 1_{(vessző)} + \sim 5_{(hőmérséklet)} + (1_{(vessző)} + 4_{(távolság)}) \cdot 2100 = 10518 B \quad (5.1)$$

Ekkora adatmennyiséget 48 részletben tudunk csak elküldeni. Mivel a hálózatban 5470 bit/másodperc a maximális küldési sebesség, így 15,4 másodpercet vesz igénybe az adatsor továbbítása. Azonban az aktív ciklusidő szabályozását is figyelembe kell venni, ami alapján csupán az idő 1%-ában használhatjuk a kommunikációs csatornát, tehát 26 perc a teljes ciklus elküldése a ciklusidők kiváráásával. A 20 perces ciklusokba ez nem fér bele. A távolság adatokat 3 digités hexadecimális számmá konvertáltam, így 8418 bájt lett csak a küldendő adat az 5.1 képletet felhasználva. A küldési idő így kevesebb, mint 21 percre csökken. A teljes adatsor így sem küldhető el, azonban ha 1050 mérést továbbítunk csak, akkor kevesebb, mint 11 perc a küldési idő. Ebben az esetben is elvégezhetjük a 2100 mérést, ami kicsit több, mint 4 percet vesz igénybe és a teljes mérési sort el tudjuk menteni memóriakártyára, illetve egy használható (1024+ minta) adatmennyiséget tudunk továbbítani feldolgozásra is. Az eszköz az egyes csomagküldések között alvó állapotba lép.

5.2 5G

Az 5. generációs mobilhálózat használatának esetében nincsen aktív ciklus idő megkötés, így akár folyamatosan is elküldhetjük egyben a 2100 mérési adatot. Ráadásul a küldési idő is jóval kisebb. Fontos figyelembe venni, hogy az 5G hálózattal való kommunikációhoz ki kell építeni a két irányú kapcsolatot. Ha a mérési eredményeket nem fontos élőben lekövetnünk, akkor praktikus lehet csupán napi egyszer kiépíteni a kapcsolatot és egyben elküldeni az aznapi méréseket. Az 5.1 fejezet alapján egy mérés ciklus 8418 bájt adatot jelent. Mivel óránként 3 ciklus van, így egy nap alatt összesen 606096 bájt adat keletkezik, ami nagyjából 0,6 megabájt adatot jelent, ami könnyedén továbbítható a hálózaton keresztül.

A PostgreSQL adatbázisba az adatokat közvetlenül nem tudom behelyezni, így megoldást kellett találnom az adattárolás problémájára. Végül a PostgREST nyíltforráskódú webservert használata mellett döntöttem [18]. A webservert az adatbázisomat is futtató virtuális gépre telepítettem. A PostgREST a PostgreSQL-adatbázist közvetlenül RESTful API-vá alakítja. Olyan API-t szolgál ki, amely a mögöttes adatbázis struktúrája alapján testreszabható. Létrehoztam egy megbízható felhasználót, amelyet egy token segítségével tudok azonosítani és így POST kérésekkel tudom az adatokat a mikrokontrollerről az adatbázisba eljuttatni.

6 Mérések

Az eszközök fogyasztását az INA226 mérőmodul segítségével figyeltem meg és rögzítettem. Igyekeztem átfogó mérési eredményeket rögzíteni a mikrokontroller és a hotspot minden működési fázisáról. A méréseket hosszabb ideig végeztem el több, véletlen módon választott eszközön. Az aktuális fogyasztás nagyjából 35 milliszekundumonként lett rögzítve.

6.1 Mérőmodulok fogyasztása

A mérőmodulok esetében a közel statikus fogyasztásnak tekinthető mérési átlagokat a 6.1. táblázat tartalmazza.

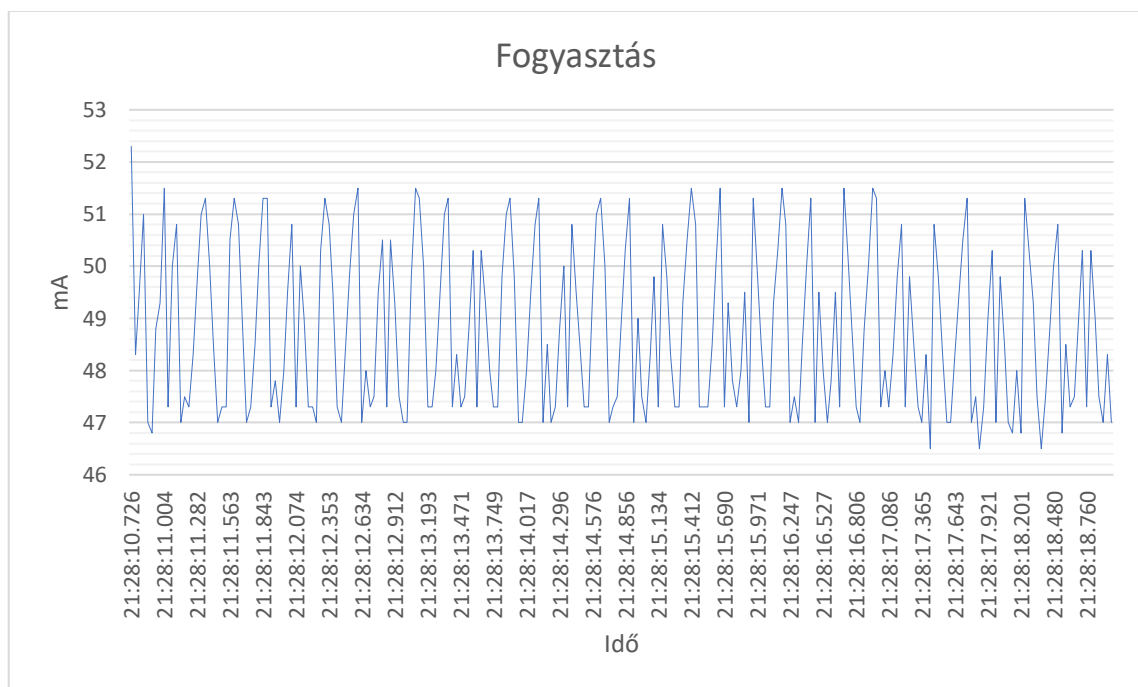
Modul	Áramfelvétel
ESP32 _{Számítás}	48,8 mA
ESP32 _{Számítás + RTC_{Tétlen}}	51,3 mA
ESP32 _{Számítás + Távmérés_{Tétlen}}	53,7 mA
ESP32 _{Számítás + RTC_{Tétlen} + Távmérés_{Tétlen}}	56,2 mA
ESP32 _{2magos számítás}	52,9 mA
ESP32 _{2magos számítás + RTC_{Tétlen} + Távmérés_{Tétlen}}	58,5 mA
ESP32 _{Tétlen}	73,8 mA
ESP32 _{Tétlen + RTC_{Tétlen} + Távmérés_{Tétlen}}	77,5 mA
ESP32 + Kijelző	83 mA

6.1. táblázat Mérőmodul fogyasztás

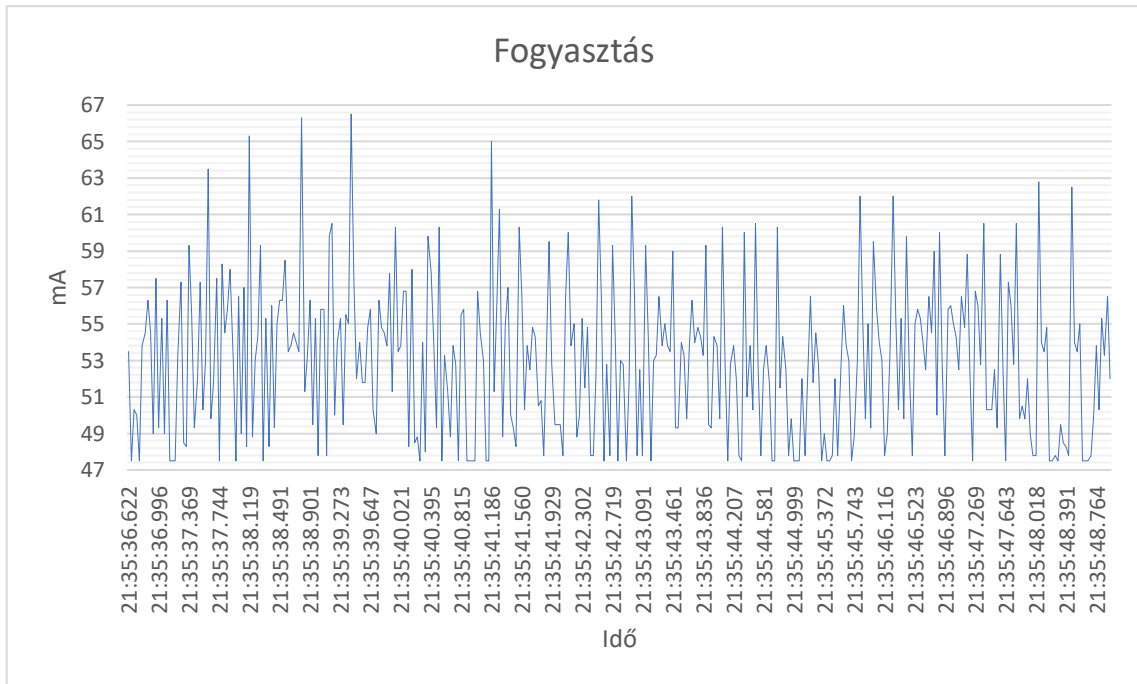
Az eszközöket arduino környezetben programoztam fel az Arduino IDE szoftvert használva [19]. Érdekes tapasztalat volt számomra, hogy amikor az eszközöknek semmilyen komolyabb számítási feladatot sem adtam, csupán annyit, hogy működjenek, jóval nagyobb volt a fogyasztás, mint számítási feladatok esetében. A hőmérők nem növelik a fogyasztást.

6.1.1 2 magos munkavégzés

Az ESP32 SoC 2 processzor maggal rendelkezik, így megfigyeltem számításos terhelésnél, hogy mi történik akkor, ha mindkét mag valamilyen feladatot kap. Számításnak egy-egy matematikai műveletet adtam meg. A kétmagos terhelés az egymagoshoz képest észlelhetően, de kismértékben növeli az átlagfogyasztást. A fogyasztás ingadozása kétmagos munkavégzés esetében sokkal egyenletlenebbé válik, ahogy ez a 6.1. és 6.2. ábrákon is látszik.



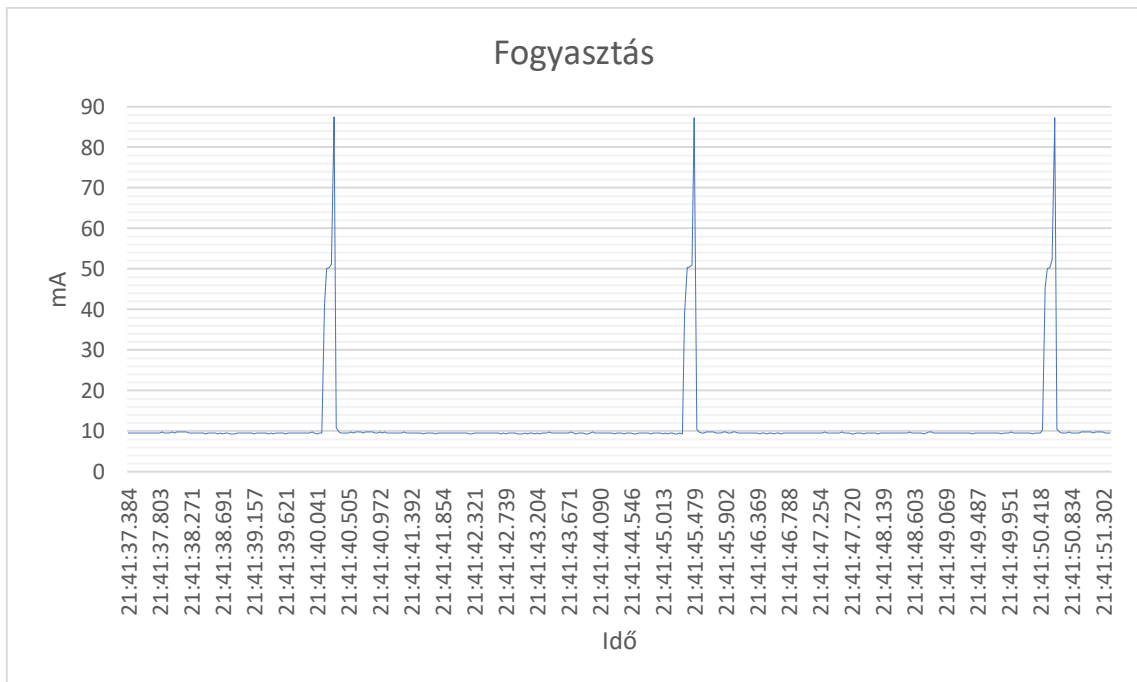
6.1. ábra ESP32 egymagos munkavégzés



6.2. ábra ESP32 kétmagos munkavégzés

6.1.2 Alvó állapot

Az eszközök alvóállapotban történő fogyasztása jelentősen kisebb a működés közben való fogyasztásnál. A 6.3. ábrán megfigyelhető, hogy 5 másodpercenként egy-egy nagyobb fogyasztási impulzus jelenik meg.

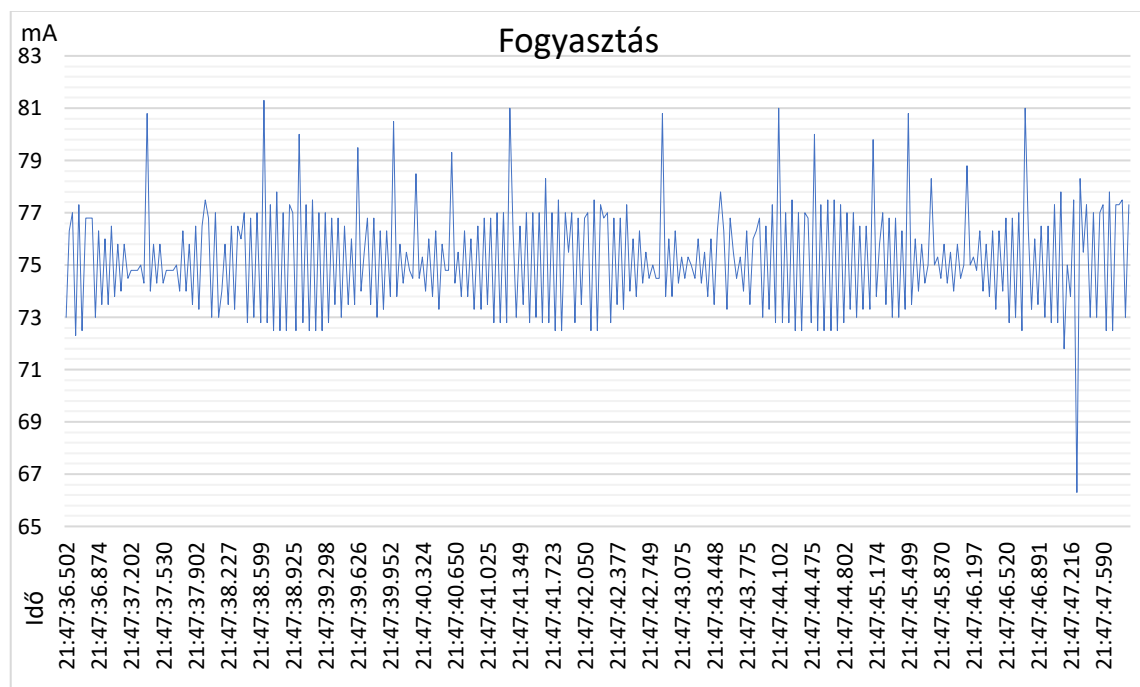


6.3. ábra Mérőmodul fogyasztása alvó állapotban

A mikrokontroller önmagában 3,4 milliampert, míg az impulzussal együtt átlagosan 5,3 milliampert fogyaszt mélyalvó módban. Amennyiben az RTC óra és a távolságmérő is csatlakoztatva van az eszközhöz, akkor azok extra fogyasztást visznek be a rendszerbe, ami jelentősen megnöveli az alvás közbeni fogyasztást. Leállításuk erre az időszakra nem lehetséges. Az eszközök jelenléte mellett a mérőmodulok alap fogyasztása 9,5 milliampert, míg az impulzust is számítva 11,3 milliampert alvómódban. Amennyiben a plusz fogyasztó eszközök tápellátása szüneteltethető lenne, úgy kevesebb, mint fele ekkora lenne a mélyalvó módban történő fogyasztás.

6.1.3 Távolságmérés

A 6.4. ábrán látható, hogy a mérőmodulok a távolságmérő szenzor használatakor korántsem egyenletes áramfelvétel mellett dolgoznak. Átlagosan 75,2 milliampert a fogyasztás távolságmérés közben.

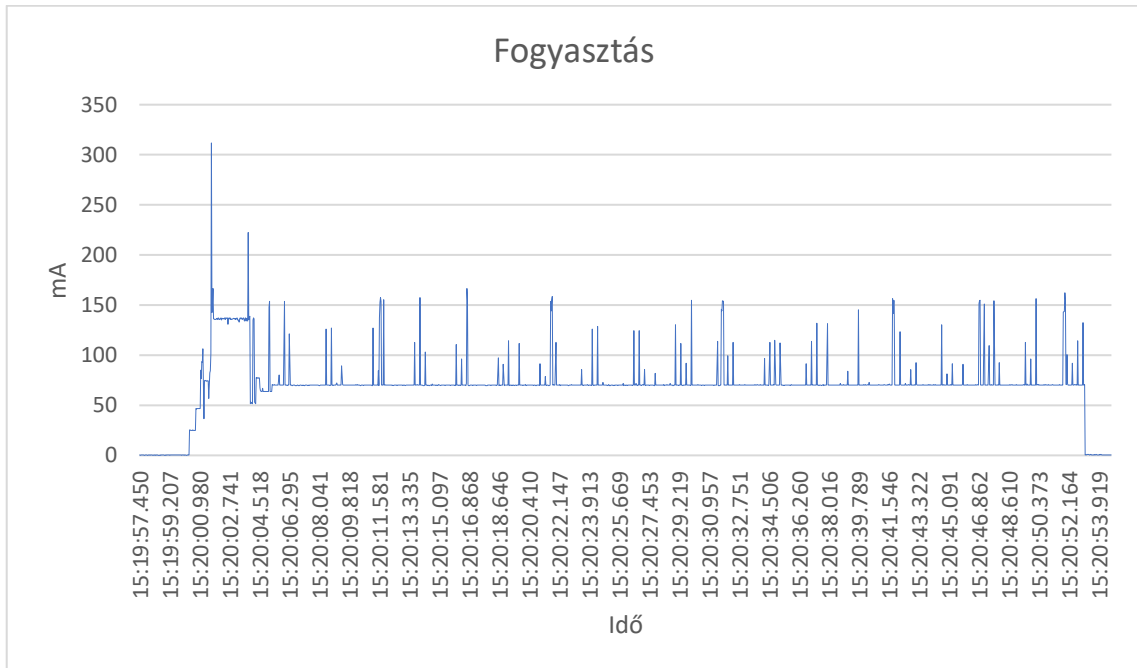


6.4. ábra Mérőmodul fogyasztása távolságméréskor

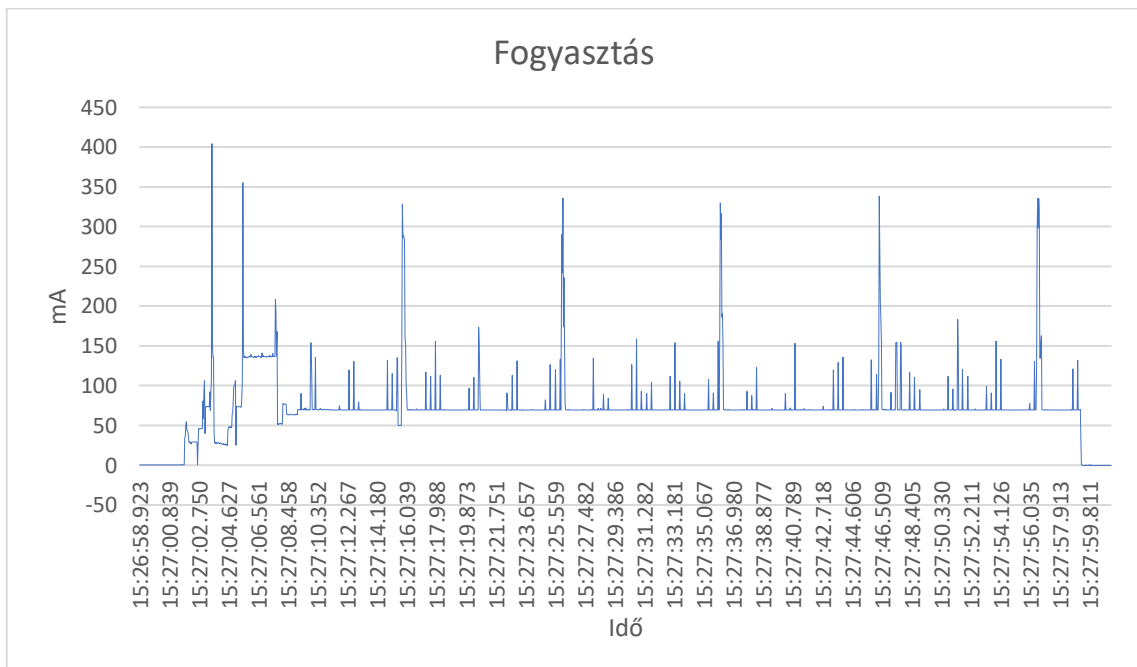
6.1.4 Wi-Fi

Bár a Wi-Fi nem biztosít sem nagy kommunikációs távolságot, sem alacsony energiafogyasztást, jelenleg ez volt elérhető a hotspothoz való kapcsolódáshoz. Mivel a végleges működési kódnak része a Wi-Fi kapcsolat létrehozása így ezt a kommunikációt is megvizsgáltam részletesebben. A vizsgálatok során egy olyan területet választottam, ahol csupán egy-két Wi-Fi hozzáférési pont sugárzott az eszközömmön kívül a 2,4 GHz-es

tartományban. A mérőműszer fogyasztását megfigyeltem jó jelerősség mellett, illetve a hotspottól távol, gyenge jelminőség mellett is. A mérés eredményeit a 6.5. és 6.6. ábrák szemléltetik.



6.5. ábra Mérőmodul fogyasztás erős Wi-Fi jel mellett



6.6. ábra Mérőmodul fogyasztás gyenge Wi-Fi jel esetén

Mindkét esetben a mikrokontroller bekapcsol, csatlakozik a Wi-Fi hálózathoz és 5 mérés ciklust küld el egymás után 10 másodpercenként. A 6.6. ábrán megfigyelhető, hogy

gyenge jel esetén a hálózathoz való kapcsolódás nehezkesebb és kicsivel több energiát igényel a jó jelerősségnél történő csatlakozáshoz képest. Erős jel mellett 85 milliampér, míg gyenge jel esetében 264 milliampér adatküldéskor az áramfelvétel növekedése. A Wi-Fi használat nagyjából 14 milliampér áramot fogyaszt folyamatosan.

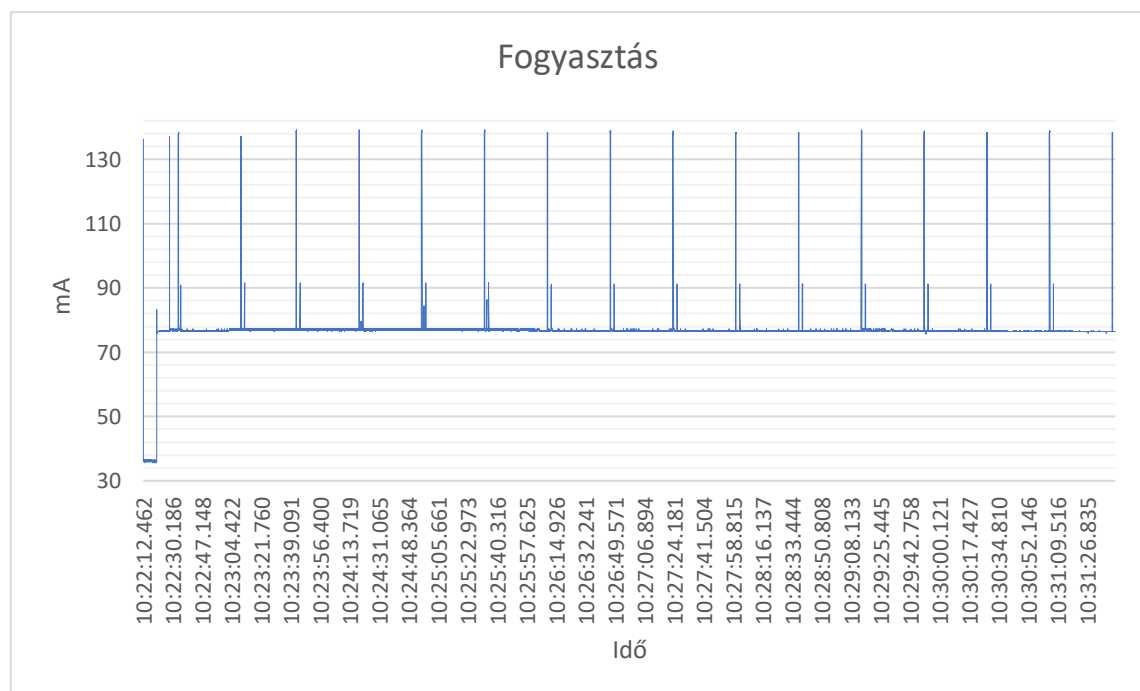
6.1.5 LoRaWAN

A LoRaWAN kapcsolat fogyasztásának méréséhez olyan működést definiáltam a mérőeszközöknek, hogy bekapcsolás után a modulok Over The Air Authentication (OTAA) módon csatlakoznak a LoRaWAN hálózathoz, ami azt jelenti, hogy az első adatküldés előtt eszköz regisztráció és dinamikus címkiosztás történik. Ezek után a modul 220 bájttal adatot küld, majd az aktív ciklusidő leteltével ismétli az adatküldést. A küldés sikerességéről nyugtát nem vár vissza.

Az adatküldés paraméterei:

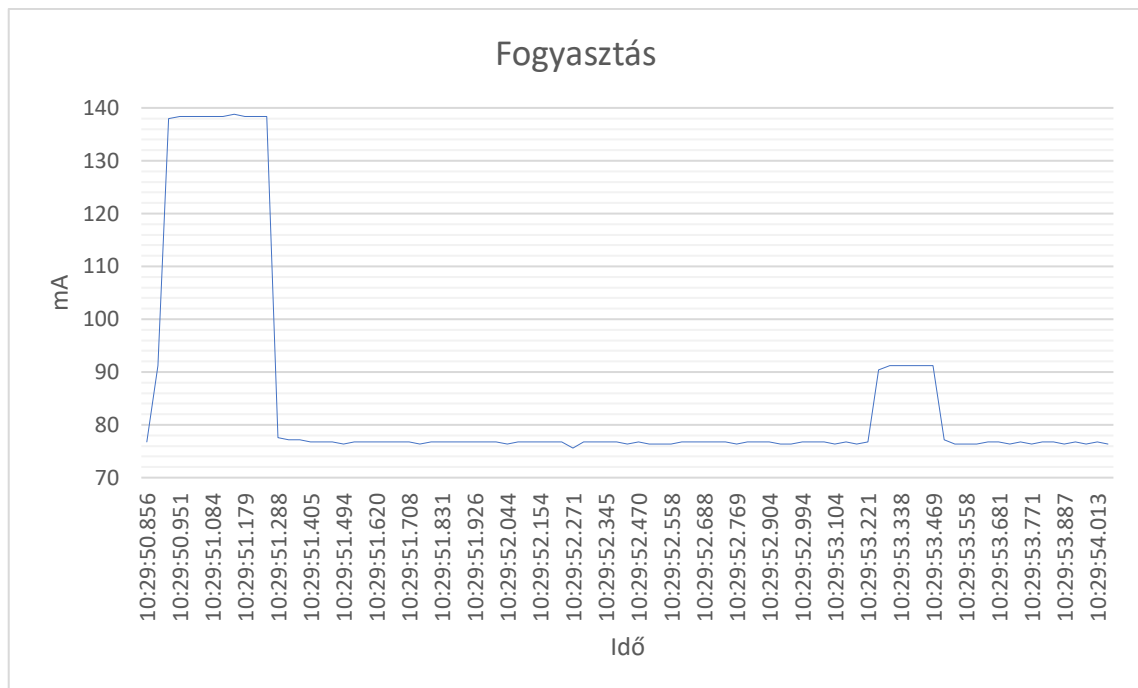
- Terjedési tényező (SF): 7
- Sáv szélesség (BW): 125 kHz
- Hibajavító kód (CR): 4/5
- Frekvencia tartomány: 868 MHz (ISM)

A mérések eredményét a 6.7. ábra szemlélteti.



6.7. ábra Mérőmodulok fogyasztása LoRaWAN kommunikáció mellett

Jól látható, hogy az adatok küldésekor a rádiós egység fogyasztása mindig ugyanakkora. A modulok állandó fogyasztása 76,9 milliampere, ami adatküldéskor 61,1 milliamperevel növekszik. A 6.8. ábra egyetlen adat elküldés közben és után mutatja a fogyasztást.



6.8. ábra Modulok fogyasztása egyetlen adat elküldésekor (LoRaWAN)

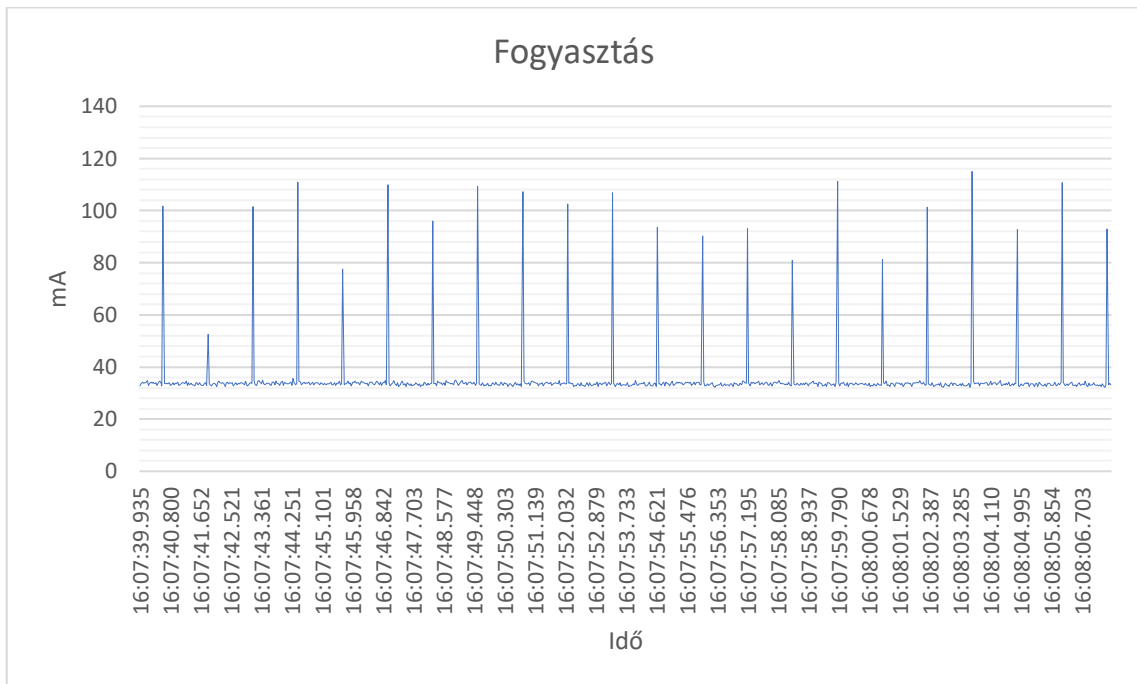
A 6.8. ábrán jól látható, hogy az adatok küldése hosszabb ideig tart, de a rádiós fogyasztás egyenletes. Bár az adatküldések után a rádiós egységet nem használom, minden küldés után megfigyeltem egy 14,3 milliampere rövid ideig tartó fogyasztás növekedést is. A LoRaWAN hálózathoz történő csatlakozás kivételével minden rádiós kommunikáció után nagyjából 2 másodperccel megjelenik és 6 mintavételezés (6*35 milliszekundum) ideig van jelen. Mivel a fogyasztás nagysága és ideje és a küldés után történő megjelenés ideje is közel azonos, ezért feltehetően a rádiós egység tevékenységéhez köthető fogyasztás.

6.2 WNC hotspot fogyasztása

A mérések során több WNC hotspot eszköz fogyasztását átlagoltam. Kezdetben megnéztem az alapfogyasztást repülőgép üzemmódot használva, majd csatlakozva a mobilhálózathoz. Végül pedig a Wi-Fi hotspotot is bekapcsoltam.

Repülőgépes üzemmódban az eszközök átlagos fogyasztása 32,2 milliampere. Amennyiben bekapcsoljuk a mobilkapcsolatot, akkor ha nincs extra adatforgalom, az állandó fogyasztás 36,6 milliampere. Megfigyelhető továbbá, hogy másodpercenként van

egy-egy nagyobb impulzus, melyek olyan rövidek, hogy mindig csak egy mintavétel hosszan jelennek meg, tehát 35-70 milliszekundum nagyságúak. A kiugrásokat is számításba véve az eszközök átlagfogyasztása 37,5 milliamper, amennyiben nincsen adatforgalom, csupán a kiépített kapcsolat. A rádió használata ezek alapján 5,3 milliamper fogyasztás növekedést jelent. A 6.9. ábra szemlélteti az 5G kapcsolat létrejötte utáni fogyasztást, amennyiben nincs generált adatforgalom az eszközön keresztül.



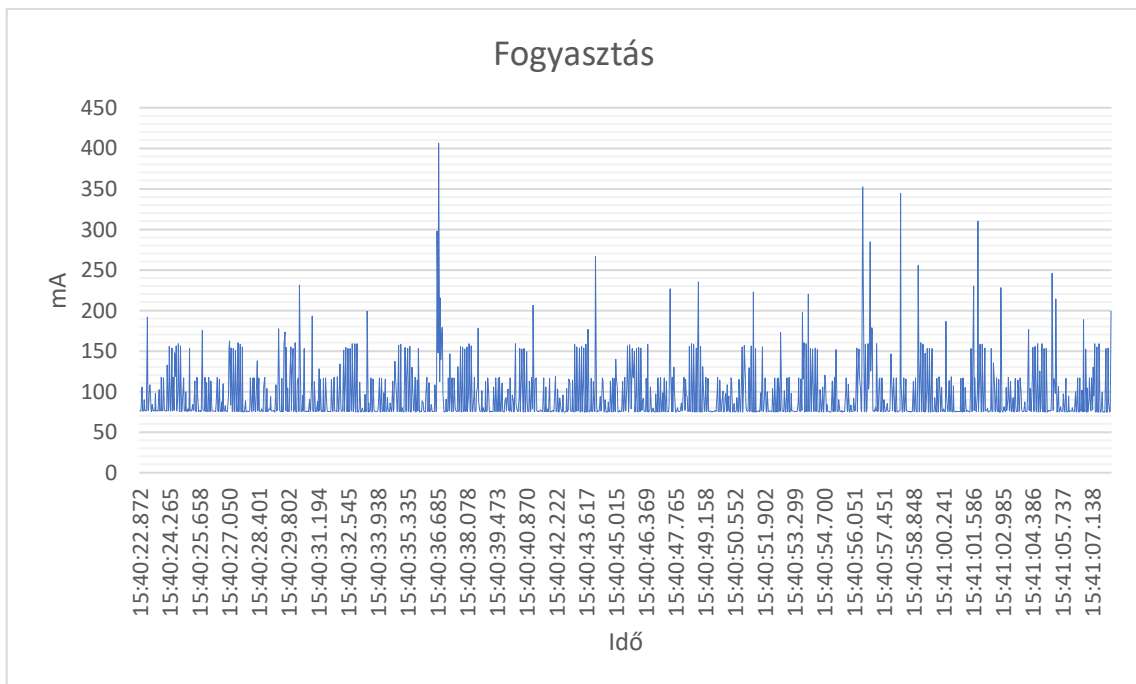
6.9. ábra WNC hotspot 5G kapcsolat közben (Nincs generált adatforgalom)

A későbbiekben a 6.9. ábrán is jól látható fogyasztásmegugrásokat kerestem a hálózati kapcsolat létrejöttekor referenciaként.

Az 5G kapcsolat használata közben történő fogyasztást a Wi-Fi mérésekhez hasonlóan 2 mérési környezetben vizsgáltam meg. Megfigyeltem a rádiós cellákhoz közel, ahol a jelerősség általában -74 dBm volt, valamint a cellahatár szélénél is, ahol -125 dBm volt a jelerősség.

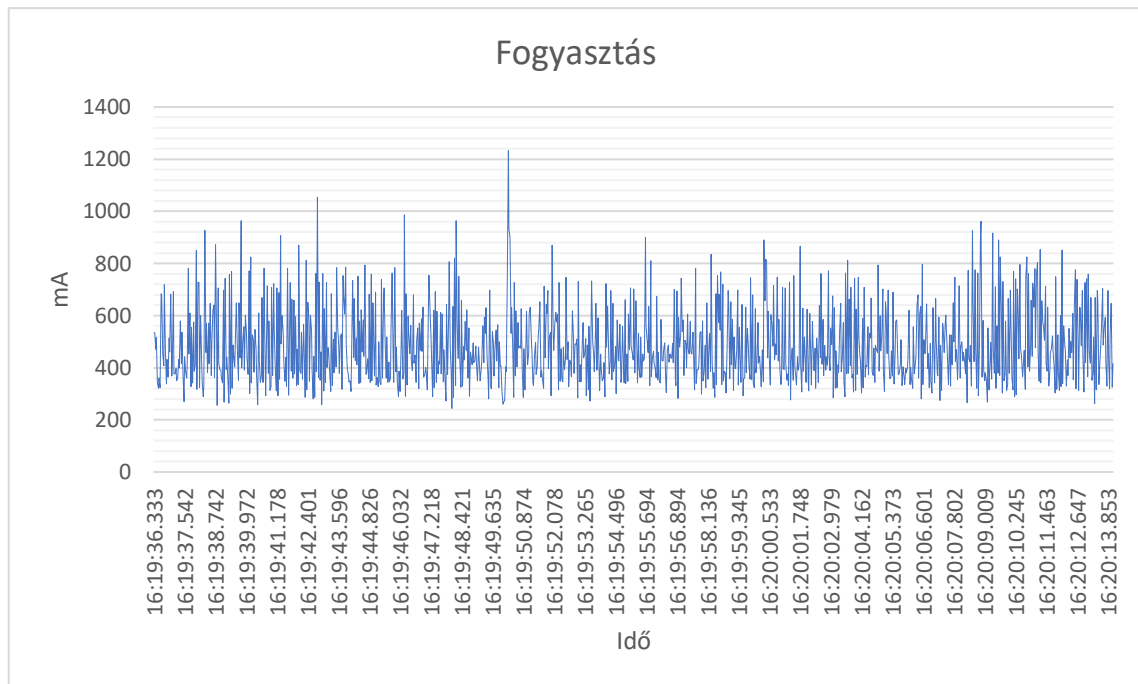
6.2.1 Adatkapcsolat megosztása Wi-Fi segítségével

A hotspot Wi-Fi kapcsolatát használva a mikrokontrollerrel való kommunikációhoz reméltem, hogy valamilyen szinten ketté fogom tudni a Wi-Fi és 5G kommunikáció által létrejött fogyasztás változásokat. Sajnos ahogy ez a 6.10. ábrán is látszik, a Wi-Fi bekapcsolása mellett még az eszközök csatlakozása nélkül is nagyon változó fogyasztást eredményez.



6.10. ábra WNC fogyasztás Wi-Fi adatforgalmazás nélkül

Abban az esetben, amikor a hotspot csatlakozott az 5G hálózathoz és a mérőmodul pedig Wi-Fi segítségével a hotspothoz, a fogyasztás mérések rendkívüli mértékben zavarossá váltak. Csupán annyit tudtam megállapítani, hogy a cellahatár szélén az átlag fogyasztás észrevehetően megnövekedett. A 6.11. ábra szemléltet egy zajos mérést.



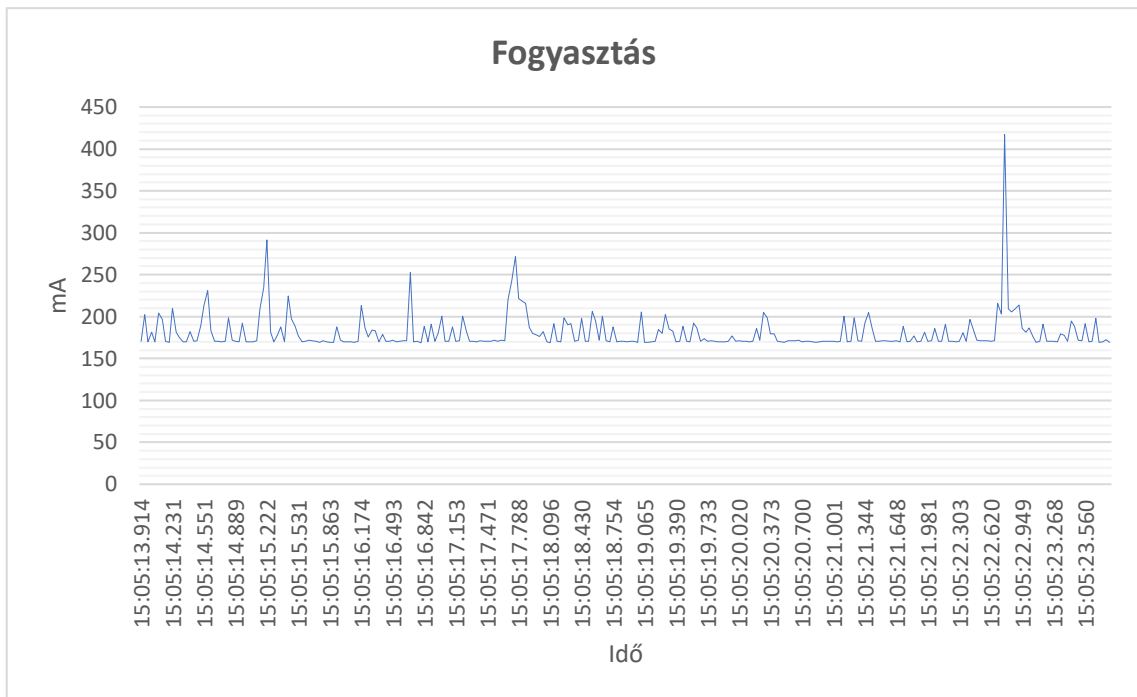
6.11. ábra WNC fogyasztás a rádiós cella szélén

Sajnos ezekből a mérési eredményekből nem választható szét a Wi-Fi és 5G rádiós modul fogyasztása.

6.2.2 USB kapcsolatmegosztás

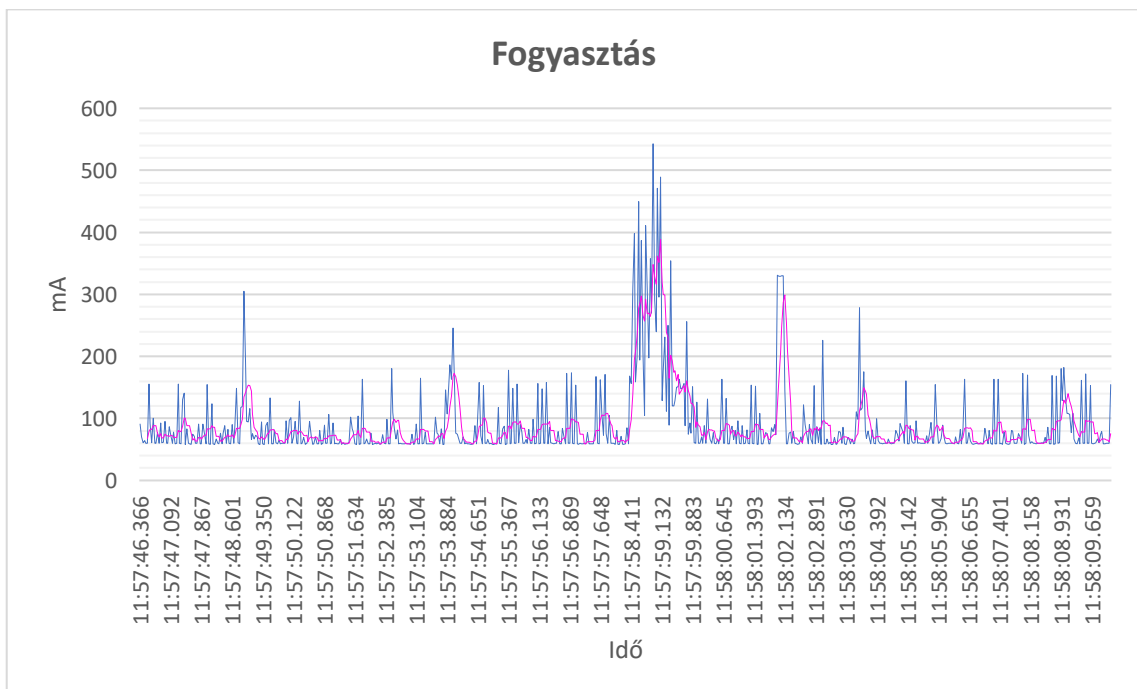
A Wi-Fi használat mellett sajnos a tervezett elemzéshez használhatatlanok lettek az eredmények, ezért megpróbálkoztam a Wi-Fi kapcsolat nélkül. Az USB tethering segítségével notebook használatával tudtam adatokat küldeni a WNC-n keresztül. Az adatbázisba Windows parancssorból küldtem el 10 mérési eredményt a fogyasztás mérések során. Sajnos a számítógéphez való csatlakozáskor a WNC elkezd az akkumulátorát tölteni, amit nem lehet letiltani egyik oldalról sem. A mérések során azt tapasztaltam, hogy nagyjából 600 milliamper töltést ad a számítógépem USB portja, így a mérési eredményeket egységesen ennyivel növeltem, hogy ne legyen mínusz fogyasztás megjelenítve.

Az USB kapcsolat mellett sajnos a számítógép nem tud egyenletesen tölteni, ami a mérési eredményeken észrevehető zajt eredményez. A 6.12. ábrán megfigyelhető, hogy repülőgép üzemmódban, ami akkumulátoros üzem mellett szinte konstans fogyasztású, sok kisebb és néhány nagyobb áramfelvétel megugrás is keletkezik.



6.12. ábra WNC fogyasztás repülőgép üzemmódban (USB csatlakozás mellett)

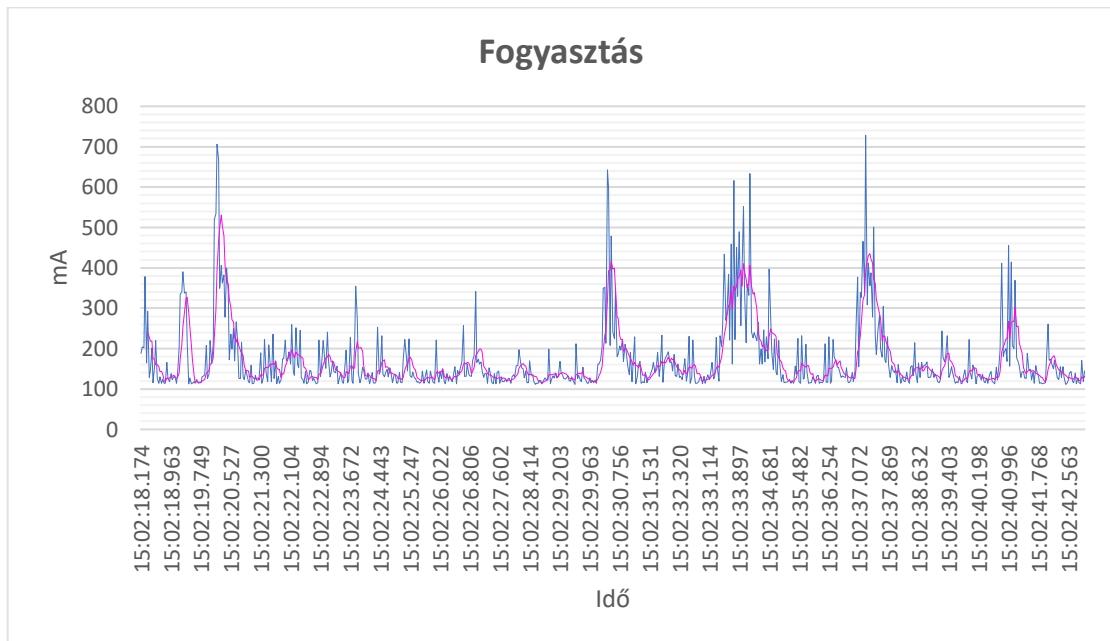
Bár a zajok erőteljesen jelen vannak, a kommunikációból adódó fogyasztás változások még kivehetőek több esetben. A 6.13. ábra szemlélteti azt a helyzetet, amikor az 5G kapcsolat létrejött, de a számítógépről nem küldünk semmilyen extra adatot.



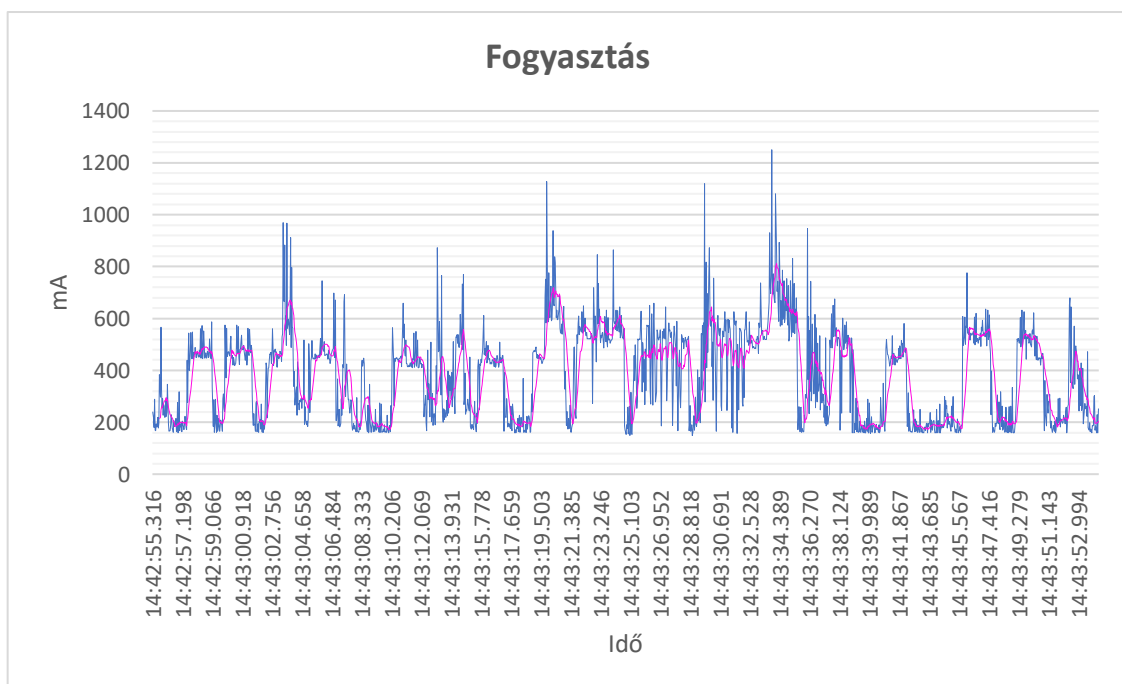
6.13. ábra WNC fogyasztás nyugalmi 5G kapcsolat mellett (USB csatlakozás mellett)

A magenta színű vonal a mozgóátlagból képzett kiegyenlítő görbe. A másodpercenkénti fogyasztásmegugrások sok esetben jól kivehetők a gyenge és erős térerősség mellett is. Referenciaként a 6.9. ábrán szemléltetett mérések tekinthetők, ahol nincs sem Wi-Fi, sem USB kapcsolat, ezért tisztán látható a rádiós fogyasztás.

A 6.14. ábra az erős, a 6.15. ábra pedig a gyenge 5G jel mellett történő fogyasztást mutatja, amikor adatküldés is történik az adatbázisba.



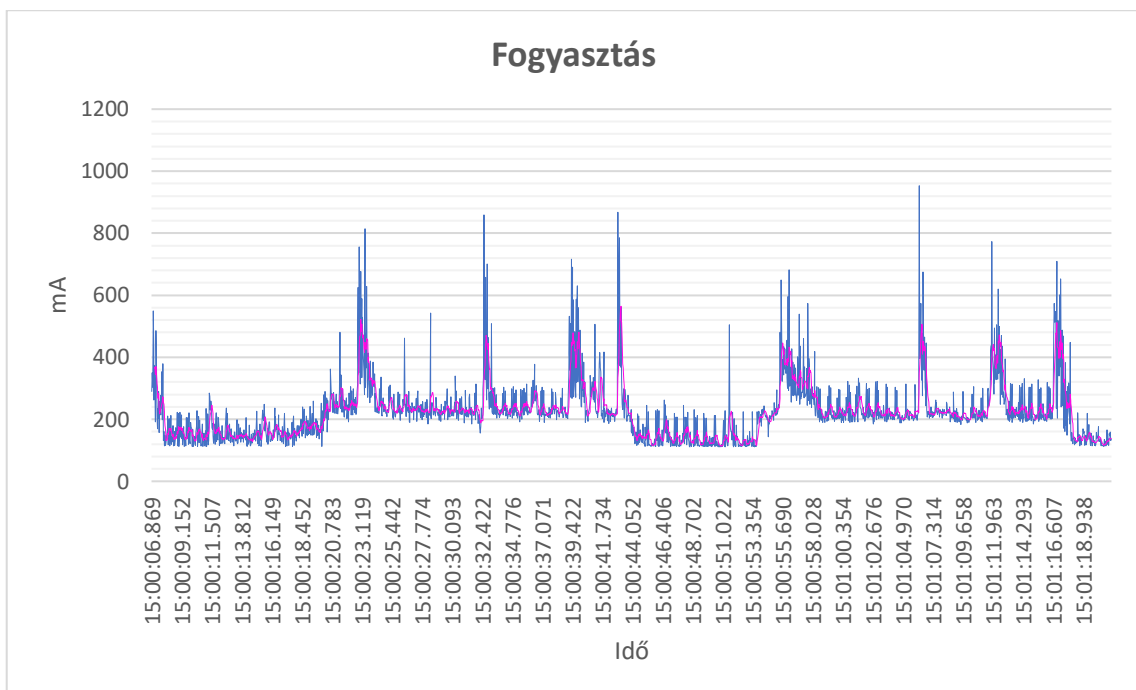
6.14. ábra WNC fogyasztás erős jel mellett (USB csatlakozás mellett)



6.15. ábra WNC fogyasztás gyenge jel esetén (USB csatlakozás mellett)

A magenta színű vonal a mozgóátlagból képzett kiegyenlítő görbe. Közeli adatkapcsolat esetében nem kivehető a 10 adatküldés, csupán egy megemelkedett alapfogyasztás. A távoli gyenge kapcsolat esetében azonban megfigyelhető, hogy nemcsak az alapfogyasztás növekszik, hanem tovább tartanak a nagyfogyasztású műveletek. A kiegyenlítő görbe alapján látható, hogy nagyjából mekkora a fogyasztásnövekedés kommunikáció közben.

A Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóság internetes sebességteszt mérő szolgáltatását használva is megfigyeltem, hogy folyamatos terhelés alatt mekkora a fogyasztás [20]. A megfigyelt fogyasztásnövekedés közel azonos, mint a kis adatok küldése során, ahogy ez a 6.16. ábrán is látható.



6.16. ábra WNC fogyasztás erős jel esetén, folyamatos kommunikáció mellett (USB csatlakozás)

Erős jel esetén a kommunikáció 98 milliamper, gyenge jel esetén pedig 281 milliamper fogyasztás növekedést is jelenthet. A hálózaton megfigyeltem azt is, hogy amennyiben tömbösítve küldöm el az adatokat, úgy távoli kapcsolat esetén hosszabb ideig tart a nagyfogyasztású állapot az esetleges újraküldések miatt, azonban az energiaszint nem növekszik.

6.3 Kiértékelés

A mérőmodulok fogyasztását egy teljes ciklusra célszerű kiszámolni, hiszen akkor megkapjuk az átlagfogyasztást. A számítás során 20 perces ciklust veszek figyelembe 1050 darab 8 hertzes méréssel. A mérések elvégzéséhez ezek alapján 131,25 másodperc szükséges. Ez alatt az idő alatt az ESP32 és a távolságmérő is aktív. Ezután az adatküldés jön, majd a fennmaradó időben alvó módba kerül a mikrokontroller. A távolságmérések miatt keletkezett adatmennyiség 4218 bájt. 125 kHz sávszélesség és 7-es terjedési tényező mellett a LoRa adatküldési sebesség 5470 bit/másodperc, tehát a teljes adatmennyiség elküldési ideje 6,17 másodperc. A 20 perces ciklus alatt a fogyasztás 18,94 milliamper LoRaWAN kommunikáció esetén a 6.1 számítás alapján.

$$\frac{131,25}{20 \cdot 60_{mp}} \cdot 75,2_{mA} + \frac{6,17}{20 \cdot 60_{mp}} \cdot 138_{mA} + \frac{1062,58}{20 \cdot 60_{mp}} \cdot 11,3_{mA} = 18,94 \text{ mA/ciklus} \quad (6.1)$$

5G kommunikáció esetében az adatsebesség jóval nagyobb. Az általam használt rendszerben az internetkapcsolat a szűk keresztmetszet, amely korlátozva van. Méréseim alapján nagyjából 25 megabit/másodperc az én esetemben a feltöltési sebesség. Az adatok küldési ideje így 1,29 milliszekundum. Ekkora adatsebesség mellett olyan rövid a küldési idő, hogy a cella szélén való használat sem okoz észrevehető fogyasztás növekedést a mérőmodulaink számára a 20 perces ciklusban, ahogy ez a 6.2 és 6.3 számításoknál látható.

$$\begin{aligned} \frac{131,25}{20 \cdot 60_{mp}} \cdot 75,2_{mA} + \frac{0,00129}{20 \cdot 60_{mp}} \cdot (75,2 + 5,3 + 98)_{mA} + \frac{1068,7487}{20 \cdot 60_{mp}} \cdot 11,3_{mA} \\ = 18,29 \text{ mA/ciklus} \end{aligned} \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{131,25}{20 \cdot 60_{mp}} \cdot 75,2_{mA} + \frac{0,00129}{20 \cdot 60_{mp}} \cdot (75,2 + 5,3 + 281)_{mA} + \frac{1068,7487}{20 \cdot 60_{mp}} \cdot 11,3_{mA} \\ = 18,29 \text{ mA/ciklus} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Cat-M1 használatakor az adatok küldési ideje 0,03 másodperc lenne. 200 milliamper fogyasztással számítva közel azonos eredményt kapunk, mint 5G esetében, ahogy ez a 6.4 számításban látszik.

$$\begin{aligned} \frac{131,25}{20 \cdot 60_{mp}} \cdot 75,2_{mA} + \frac{0,03}{20 \cdot 60_{mp}} \cdot (75,2 + 200)_{mA} + \frac{1068,72}{20 \cdot 60_{mp}} \cdot 11,3_{mA} \\ = 18,295 \text{ mA/ciklus} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Bár az 5G kommunikációnál kisebb fogyasztás lett számítva, mint LoRaWAN esetben, Fontos figyelembe venni, hogy 5G esetében kapcsolatkiépítés is kell és kétirányú kommunikáció történik. Ezeken kívül, mivel a mérési eredmények kissé zajosak, ezért előfordulhat kisebb eltérés

a valóságtól az utólagos zajszűrés ellenére. Az 5G hálózatot használva a napi egyszeri hálózati kapcsolat kiépítése és adatküldés egy optimális és biztos megoldás lehet.

7 Összegzés

A szenzorhálózatok egyre több területen jelennek meg. Segítségükkel megismerhetjük és automatizálhatjuk környezetünket. A vízhullámzást mérő szenzorhálózatok fontos szerepet tölthetnek be a vízgazdálkodás mindennapi problémáinak megoldásában. Dolgozatomban egy vízmonitorozó IoT szenzorhálózat működését valósítottam meg, különös figyelmet fordítva a kommunikációra. A mérőmodulok részletes fogyasztásvizsgálatát és elemzését is elvégeztem.

A vízhullámzás mérése a hagyományos LPWAN IoT szenzorhálózatoknál nagyobb adatmennyiséget generál, ami az ISM sávokat használó LPWAN technológiák használatakor komoly tervezést és adattömörítést kíván meg.

LoRaWAN hálózatban a megfelelően átgondolt adatstruktúra mellett használható mennyiségű mérési adat továbbítható az aktív ciklusidő betartása mellett. Az eszközfogyasztás pedig jól kiszámítható.

5G hálózat használatakor a nagy adatsebességnek köszönhetően a kommunikáció által keletkezett pillanatnyi magas fogyasztás szinte elhanyagolható egy 20 perces mérési ciklus esetében, annak ellenére, hogy a rádiós cellahatár széléhez közeledve jelentősen megnő a fogyasztás. Mivel az adatküldéshez szükséges a kapcsolatkiépítés is, célszerűbb napi egyszer tömbösítve elküldeni minden mérési eredményt. Az egyirányú LoRaWAN kommunikációval szemben az 5G hálózatot használva biztosítva van az elküldött adatok adatbázisba való juttatása.

A kialakított mérési struktúrában a Cat-M1 használata valószínűleg az 5G-hez képest jelenleg egy olcsóbb megoldást, de nem sokkal rosszabb szolgáltatásminőséget tudna nyújtani.

Irodalomjegyzék

- [1] European Telecommunications Standards Institute: ETSI EN 300 220-1, 2012. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW; Part 1: Technical characteristics and test methods.
- [2] SIGFOX: Sigfox Technical Overview. 2018. 01.
- [3] Sigfox SA: Sigfox. <https://www.sigfox.com/> (Ellenőrizve: 2022. október 9.).
- [4] Sigfox SA: Sigfox build. <https://build.sigfox.com/study> (Ellenőrizve: 2022. október 9.).
- [5] Semtech Corporation: LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview. Technical paper, 2019, Semtech Corporation.
- [6] 3rd Generation Partnership Project: Overview of 3GPP Release 13. <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-13> (Ellenőrizve: 2022. október 26.).
- [7] T Mobile: Narrowband IoT Solution Developer Protocols Guide, 2019. 02.
- [8] Timothy Woo: SIM7000-LTE-Shield Current Consumption, <https://github.com/botletics/SIM7000-LTE-Shield/wiki/Current-Consumption> (Ellenőrizve: 2022. október 26.).
- [9] Nhu Ho: LTE-M vs NB-IoT: 5 Considerations for Your IoT Solutions, <https://www.emnify.com/blog/lte-m-nb-iot>, (Ellenőrizve: 2022. október 26.).
- [10] 3rd Generation Partnership Project: Overview of 3GPP Release 16. <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-16> (Ellenőrizve: 2022. október 26.).
- [11] Zaidi Ali – Bränneby Anders – Nazari Ala – Hogan Marie – Kuhlins Christian: Cellular IoT in the 5G era. GFMC-20:000025 Uen. Jelentés, 2020. 02, Ericsson.
- [12] Y. Chen, Y. A. Sambo, O. Onireti and M. A. Imran, "A Survey on LPWAN-5G Integration: Main Challenges and Potential Solutions," in IEEE Access, vol. 10, pp. 32132-32149, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3160193.
- [13] Homoródi Krisztián: Investigation and modelling of wind induced waves in shallow water. 2012.
- [14] Jászberényi Áron István: Okos-tó szenzoradatainak gyűjtése LoRa/LoRaWAN felett és megjelenítése IoT platformon. Szakdolgozat 2020.
- [15] MathWorks: Matlab Online. <https://matlab.mathworks.com/> (Ellenőrizve: 2022. október 26.).

- [16] MathWorks: Database Explorer.
<https://www.mathworks.com/help/database/ug/databaseexplorer-app.html>
(Ellenőrizve: 2022. október 26.).
- [17] JahanKit: JSN-SR04T-2.0 20-600 cm Ultrasonic Waterproof Range Finder,
Műszaki leírás
- [18] Nelson Joe – Chavez Steve: PostgREST. <https://postgrest.org/en/stable/>
(Ellenőrizve: 2022. október 26.).
- [19] Arduino: Arduino IDE, <https://www.arduino.cc/>, (Ellenőrizve: 2022. október 26.).
- [20] Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóság: Szelessáv.net, <https://szelessav.net/>
(Ellenőrizve: 2022. október 26.).
- [21] Shenzhen Xin Yuan Electronic Technology Co, Ltd: LILYGO®TTGO LORA32
V2.0 433/868/915Mhz ESP32 LoRa OLED 0.96 Inch SD Card Display Bluetooth
WIFI ESP32 Module With Antenna, Product Description.
http://www.lilygo.cn/prod_view.aspx?TypeId=50003&Id=1319 (Ellenőrizve:
2022. október 26.).
- [22] Muszkalay László: A Balaton Vizének Jellemző Mozgásai. Vízgazdálkodási
Tudományos Kutató Központ, 1973