

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

MEZŐGAZDASÁGI IDŐJÁRÁS-ÁLLOMÁS LORAWAN KOMMUNIKÁCIÓVAL

Szerző: **Horváth Benedek**
villamosmérnök BSc. szak, IV. évf.

Konzulens: **Borsos Döníz**
tanársegéd

Budapest, 2024.

Tartalomjegyzék

1. Kivonat	4
2. Első verzió	5
2.1. Bevezetés	5
2.2. Specifikáció	6
2.2.1. Mérendő jellemzők	6
2.2.2. LoRaWAN hálózat	6
2.2.3. Tápellátás	7
2.2.4. Időjárásállóság	7
2.3. Logikai rendszerterv	8
2.4. Alkatrészek kiválasztása és áramkörtervezés	9
2.4.1. Mikrokontroller	9
2.4.2. Hőmérséklet és páratartalom szenzor	10
2.4.3. Légnyomás szenzor	12
2.4.4. Szélsebesség és szélirány szenzorok	13
2.4.5. LoRaWAN kommunikációs modul	16
2.4.6. Tápegység	17
2.4.6.1. Méretezés a várható fogyasztásra	17
2.4.6.2. Az akkumulátor kiválasztásának szempontjai	19
2.4.6.3. Napelem	22
2.4.6.4. Töltésvezérlő áramkör	23
2.4.6.5. DC-DC konverter	26
2.5. Fizikai rendszerterv	29
2.6. NYÁK-tervezés és gyártás	30
2.6.1. Kommunikációs panel	30

2.6.2. Tápegység panel	32
2.7. A tartószerkezet és a készülékház felépítése	32
2.8. Szoftver	36
2.9. Tesztelés	39
2.10. A továbbfejlesztés lehetőségei	40
3. Második verzió	41
3.1. Specifikáció	41
3.2. Hardeveres módosítások	41
3.2.1. Bevezetés	41
3.2.2. Szélsebesség és szélirány szenzorok	42
3.2.3. Gyorsulásérzékelő	44
3.2.4. Csapadékmennyiség érzékelő	45
3.2.5. Talajszenzor	46
3.2.6. Töltőáram- és akkumulátorfeszültség-mérés	47
3.2.7. Tápegység	48
3.2.7.1. Méretezés a várható fogyasztásra	48
3.2.7.2. Napelem	50
3.2.7.3. Akkumulátor	50
3.2.8. Fizikai rendszerterv	51
3.2.9. Nyomtatott áramkör	52
4. Összefoglaló	53
Ábrajegyzék	57

1. KIVONAT

A meteorológiai adatok gyűjtése és monitorozása egyre nagyobb szerepet kap a modern mezőgazdasági termelésben. A LoRaWAN technológia lehetőséget nyújt alacsony energiaigényű, emberi beavatkozást nem igénylő adatgyűjtő berendezések létrehozására. A dolgozat fő témája egy olyan, LoRaWAN kommunikációt használó mezőgazdasági időjárás-állomás tervezése és megvalósítása, amely napelemes tápellátással, önműködően végez méréseket és a kapott adatokat egy webalkalmazáson keresztül továbbítja a felhasználóhoz.

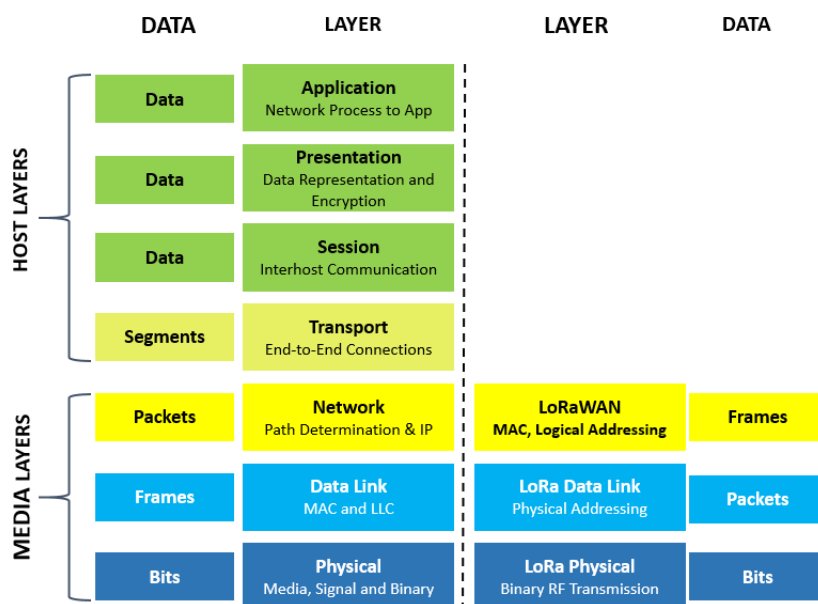
Az eszköz egy kommunikációs és mérésadatgyűjtő, valamint egy tápellátást biztosító részegységből áll. A dolgozat részletesen ismerteti a felhasznált alkatrészek kiválasztását, ezen részegységek tervezési folyamatát és legyártását, illetve az ezek során felmerülő problémákat és azok megoldásait. Ismertetésre kerül a napelemes töltésvezérlő által használt MPPT (Maximum Power Point Tracking, maximális munkapont követés) algoritmus és ennek előnyei más töltési módokhoz viszonyítva. Az időjárás állomás mikrokontrollerén futó szoftver, valamint a mérési adatok fogadását és megjelenítését végző NodeRED alkalmazás felépítése is tárgyalásra kerül. Végül a dolgozat összegzi, értékeli az eszköz tesztelése során kapott eredményeket és a jövőbeni fejlesztési lehetőségeket.

Az első prototípus megvalósítása során szerzett tapasztalatok alapján egy második hardververzió is elkészült, új szenzorokkal, funkciókkal, és jelentősen alacsonyabb fogyasztással. A dolgozat második felében ezen változtatások és új fejlesztések kerülnek bemutatásra.

2. ELSŐ VERZIÓ

2.1. Bevezetés

A LoRa¹ és LoRaWAN² olyan vezeték nélküli technológiák, amelyek az IoT³ eszközök közötti adatkommunikációra specializálódtak. Legfőbb előnyük az alacsony energiafogyasztású és nagy hatótávolság, ami különösen olyan környezetekben hasznos, ahol az eszközök nagy távolságra vannak egymástól és nem elérhető a hagyományos vezeték nélküli hálózati infrastruktúra. A LoRa a fizikai réteget fedi le, míg a LoRaWAN a hálózati protokollt biztosítja a LoRa-kompatibilis eszközök számára. A LoRa technológia a 868 MHz és 433 MHz-es ISM⁴ sávokat használja. A zavarokkal szembeni ellenállóságot pedig a CSS⁵ moduláció biztosítja.



2.1. ábra. LoRa és LoRaWAN az OSI modellben [1]

¹Long Range - nagy hatótávolságú

²Long Range Wide Area Network - nagy hatótávolságú, nagy kiterjedésű hálózat

³Internet of Things - a dolgok internetje

⁴Industrial, Scientific and Medical - ipari, tudományos és orvosi

⁵Chirp Spread Spectrum - „csiripelő” szórt spektrumú moduláció

2.2. Specifikáció

A feladat egy olyan eszköz létrehozása, amely képes mérni a meghatározott időjárási jellemzőket és a mért adatokat LoRaWAN hálózaton keresztül a felhasználóhoz eljuttatni.

2.2.1. Mérendő jellemzők

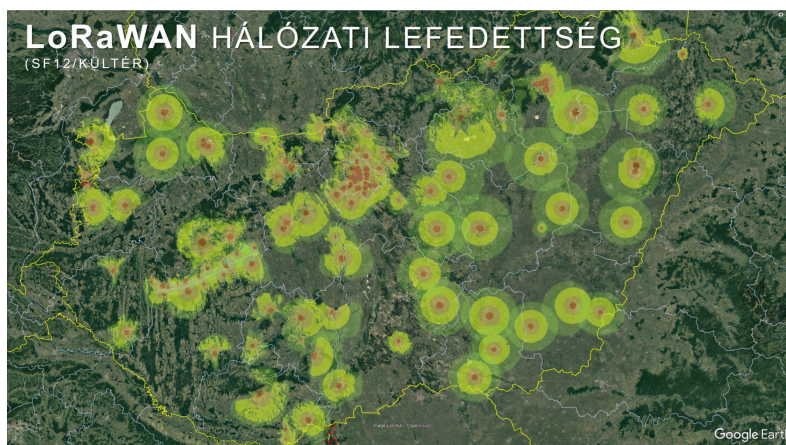
Ahhoz, hogy a kapott meteorológiai adatok felhasználhatóak legyenek, a következő jellemzőket mindenképpen mérni szükséges:

- Hőmérséklet
- Páratartalom
- Légnyomás
- Szélsebesség
- Szélirány

Ezen kívül az időjárás-állomást olyan módon kell megtervezni, hogy a későbbiekben további szenzorok csatlakoztatásával könnyedén bővíthető legyen a mért jellemzők listája.

2.2.2. LoRaWAN hálózat

A kommunikációhoz az Antenna Hungária által biztosított LoRaWAN hálózatot használom, ami tíz végpont üzembe helyezését teszi lehetővé. A hálózat jelenleg a megyeszékhelyek, fontosabb turisztikai régiók és nagyobb városok tágabb környezetében biztosít lefedettséget. Ez az elkészült eszköz teszteléséhez megfelelő, de a későbbiekben a telepítés helyétől függően szükség lehet saját hálózat kialakítására.



2.2. ábra. Az Antenna Hungária LoRaWAN hálózatának jelenlegi lefedettsége (2024.04.06.) [2]

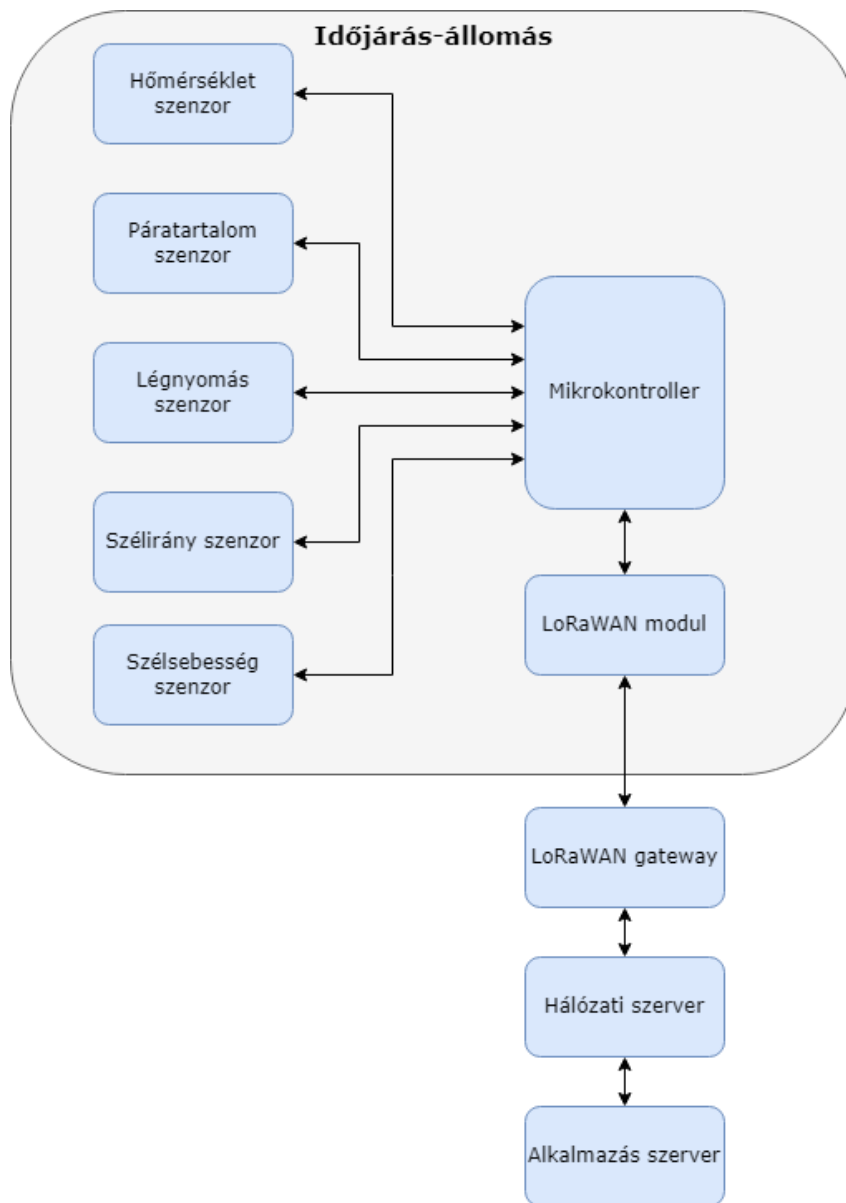
2.2.3. Tápellátás

A mezőgazdasági időjárás-állomások telepítési helyén jellemzően nem áll rendelkezésre villamos hálózat, ezért a tápellátást más módon kell megoldani, így a választás egy napelemes rendszerre esett. A napelem panel egy töltésvezérlő áramkörön keresztül tölti az akkumulátort, a megfelelő tápfeszültséget pedig DC-DC konverter állítja elő. Így az eszköz folyamatosan képes működni akkor is, amikor a napelem nem termel.

2.2.4. Időjárásállóság

Az eszköz kitett az időjárás viszontagságainak, ezért fontos hogy a készülékház megfelelő víz és por elleni védelemmel rendelkezzen, valamint a borkulat alkatrészei a napból érkező UV sugárzás hatására ne károsodjanak. Számításba kell még venni a működési hőmérséklet-tartományt is, mert a szélsőséges hőmérsékleti viszonyok hatással lehetnek a helyes működésre – különös tekintettel az akkumulátorra. A készülékház belsejére vonatkozó működési hőmérséklet-tartományt -20°C – 50°C -ban határoztam meg.

2.3. Logikai rendszerterv



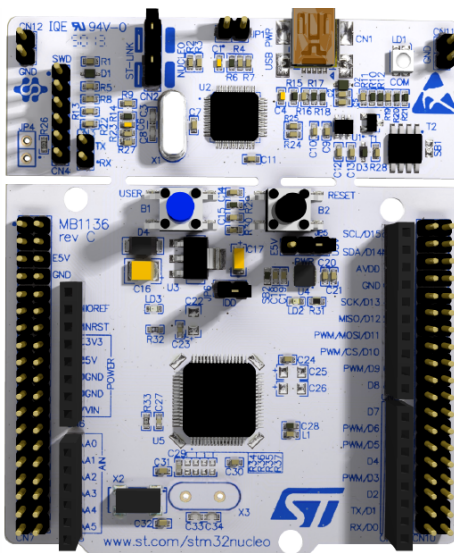
2.3. ábra. Logikai rendszerterv

2.4. Alkatrészek kiválasztása és áramkörtervezés

2.4.1. Mikrokontroller

A feladathoz egy STM32F103RBT6 mikrokontrollert választottam, amit prototípus elkészítéséhez az STM32 NUCLEO-F103RB fejlesztőpanel formájában használok.

Az STM32F103RB egy 32-bites ARM Cortex-M3 architektúrát használó mikrokontroller, amelyet a STMicroelectronics gyárt. Az eszköz 128KB FLASH és 20KB SRAM memóriát tartalmaz. Számos kommunikációs interfész áll rendelkezésre: 2db SPI, 2db I²C, 2db UART, USB 2.0 full-speed, és rendelkezik 2 darab 12 bites AD átalakítóval is. Lehetőség van egy 7 csatornás DMA (Direct Memory Access) controller használatára is.



2.4. ábra. STM32 NUCLEO-F103RB

A fejlesztőpanel beépítve tartalmazza az ST-LINK programozó és debugger eszközt, valamint lehetőséget nyújt bővíítőpanelek csatlakoztatására az ST morpho és Arduino UNO kompatibilis tűskesorokon keresztül.

2.4.2. Hőmérséklet és páratartalom szenzor



2.5. ábra. AM2301 hőmérséklet és páratartalom szenzor [3]

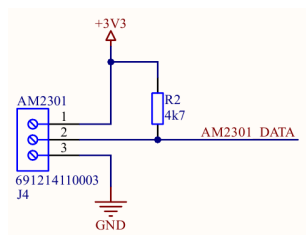
A hőmérséklet és a páratartalom mérésére az AM2301[3] szenzort választottam ki. Az érzékelő hőmérséklet esetében $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, relatív páratartalom esetében pedig $\pm 3\%$ RH pontossággal rendelkezik. A 3,3 V-tól 5 V-ig terjedő tápfeszültség-tartományban működőképes, fogyasztása mérés közben 1,2 mA, „sleep mode”-ban pedig 15 μA . Jelen esetben 3,3V-ról fog működni a szenzor, mert a mikrokontroller is ezt a tápfeszültséget használja. A kommunikációhoz a szenzor a saját „single bus” protokollját használja, aminek működéséhez a tápfeszültségen kívül, csak egyetlen adatvonal szükséges. A szenzor bekötése a 2.6. ábrán látható.

Pins	Color	Name	Describe	
1	Red	VDD	Power supply (3.3 V to 5.5 V)	
2	Yellow	SDA	Serial Data, Bidirectional Port	
3	Black	GND	Ground	
4		NC	No connection	

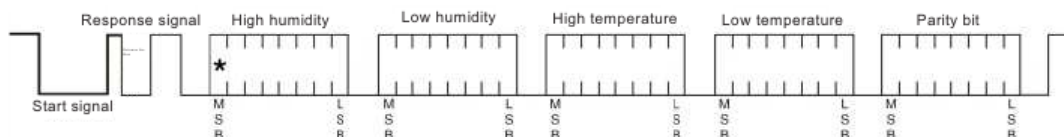
2.6. ábra. AM2301 bekötése [3]

A kommunikáció működéséhez az adatvonalat egy felhúzó ellenállással kell ellátni. Az ellenállás értéke a szenzor adatlapja alapján 30 m-es vezeték hossz alatt 5,1 k Ω . Az adatlapban szereplő 5,1 k Ω -os helyett 4,7 k Ω -os ellenállást használok mert a kapcsolásban máshol is használatban van ez az érték és a kis eltérés (minimális fogyasztás növekedésen kívül) nem okoz problémát. A kialakítás a 2.7. ábrán látható.

⁶Amikor nem történik kommunikáció vagy mérés, a szenzor alacsony fogyasztású üzemmódba kerül.



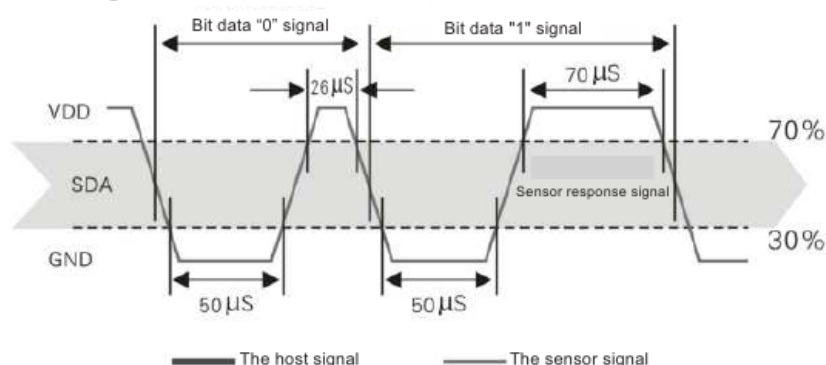
2.7. ábra. AM2301 a felhúzó ellenállással



2.8. ábra. A szenzor által használt "single bus" kommunikációs protokoll [3]

A kommunikáció a következő lépésekből áll:

1. A bekapcsolás után és az egyes mérések között is legalább 2 másodperces várakozás szükséges, hogy a szenzort olvasni lehessen. Ez idő alatt az adatvonalon érvénytelen értékek jelenhetnek meg, ezeket nem kell figyelembe venni.
2. A mikrokontroller szenzorhoz használt I/O lábát kimenetre kell beállítani, majd alacsony szintet kiadni rajta. Legalább 1ms várakozás után az I/O láb újra visszaállítható bementre. Ezek után a szenzor egy 80 μ s-os alacsony, majd egy 80 μ s-os magas szinttel válaszol, ezzel jelzi, hogy adatok következnek.
3. 40 adatbit következik. A bitek formátuma az 2.9 ábrán látható.



2.9. ábra. A single bus protokoll adatbitjei [3]

A „0” értékű bit egy 50 μ s idejű alacsony szintből és egy 26 μ s értékű magas szintből, az

„1” értékű bit pedig egy 50 μ s idejű alacsony szintből és egy 70 μ s értékű magas szintből áll. A bitsorozat végén az adatvonal visszaáll magas szintre.

Ahhoz, hogy az érzékelő fel tudja venni a környező levegő hőmérsékletét, óvni kell a közvetlen napsugárzástól és a csapadéktól is.[4] Erre a szenzor tokozása önmagában nem alkalmas, ezért szükség van egy árnyékoló házra, aminek leírása megtalálható a 2.7. fejezetben.

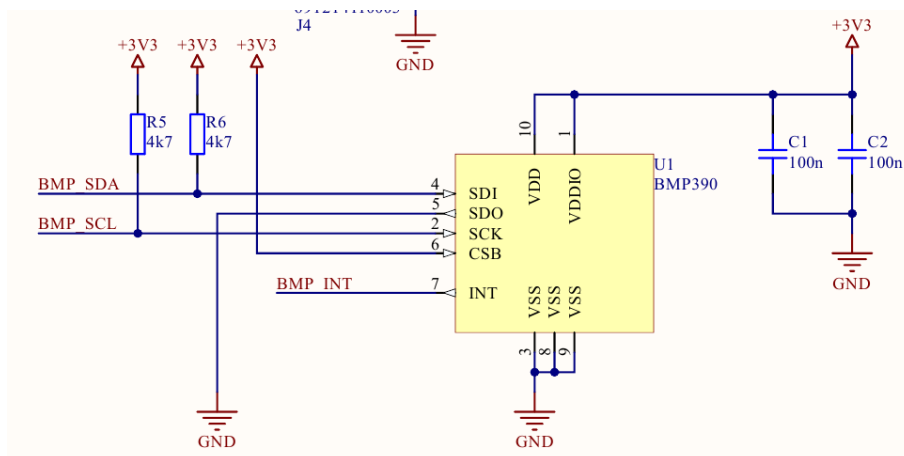
2.4.3. Légnyomás szenzor

A légnyomás mérésre a Bosch Sensortec BMP390[5] érzékelőjét választottam. A szenzor ± 50 Pa pontossággal képes a légnyomás mérésére. Az eszköz ezen kívül alkalmas hőmérséklet mérésre is, de ezt a funkciót jelen esetben nincs használatban. Működési tápfeszültségtartománya 1,65 V-tól 3,6 V-ig terjed. Az átlagos áramfelvétel 1 Hz-es mérési gyakoriság esetén csupán 3,2 μ A. A szenzor az SPI és az I²C kommunikációt támogatja; itt I²C, módban működik.



2.10. ábra. BMP390 légnyomás szenzor [5]

Az I²C kommunikáció működéséhez felhúzó ellenállások szükségesek az órajel- és adatvonalakra. Ezek értékét 4,7 k Ω -ban határoztam meg az adatlap ajánlásai alapján. Szükség volt még az I²C eszközcím beállítására is. Az 111011X formátumú cím X-szel jelölt számjegyét az 5-ös (SDO) láb magas vagy alacsony szintre állításával lehet beállítani. Jelen esetben nincs jelentősége az eszközcímnek, mert ez a mikrokontrollerhez kapcsolt egyetlen I²C eszköz. A címet az SDO láb állandó alacsony szintre kötésével 1110110-re (0x76) állítottam be. A tápfeszültség lábakra az adatlapon ajánlott egy-egy 100 nF-os hidegítő kondenzátor került elhelyezésre. [5]



2.11. ábra. BMP390 légnyomás szenzor bekötése (részlet a kapcsolási rajzból)

2.4.4. Szélsebesség és szélirány szenzorok

A szélsebesség mérésére egy kanalas szélsebesség-mérő, a szélirány mérésére pedig egy nyomólapos szélzászló szolgál. A működési tápfeszültség-tartományuk 10 V-tól 30 V-ig terjed. Mindkét szenzor 0...5 V-os analóg jelet szolgáltat. A szélsebesség szenzor mérési tartománya 0...30 m/s, felbontása 0,1 m/s. A szélirány szenzor 8 különböző helyzet mérésére képes, így a négy fő- és négy mellékirányt lehet megkülönböztetni (É, ÉK, K, DK, D, DNY, NY, ÉNY).



2.12. ábra. Szélsebesség és szélirány szenzorok

A szenzorok analóg kimeneti jelét a mikrokontroller AD (analóg-digitális) átalakítója dolgozza fel. A mikrokontroller tápfeszültsége és egyben az AD átalakító referencia feszültsége is 3,3 V. A szenzorok kimeneti jele túllépné ezt, így közvetlenül nem csatlakozhatnak a mikrokontrollerhez. A szenzorok mikrokontrollerhez való illesztéséhez így egy feszültségosztó szükséges. A feszültségosztót olyan módon kellett méretezni, hogy megfeleljen a mikrokontroller adatlapjában előírt maximális forrásellenállás követelménynek. Ez a maximális ellenállás

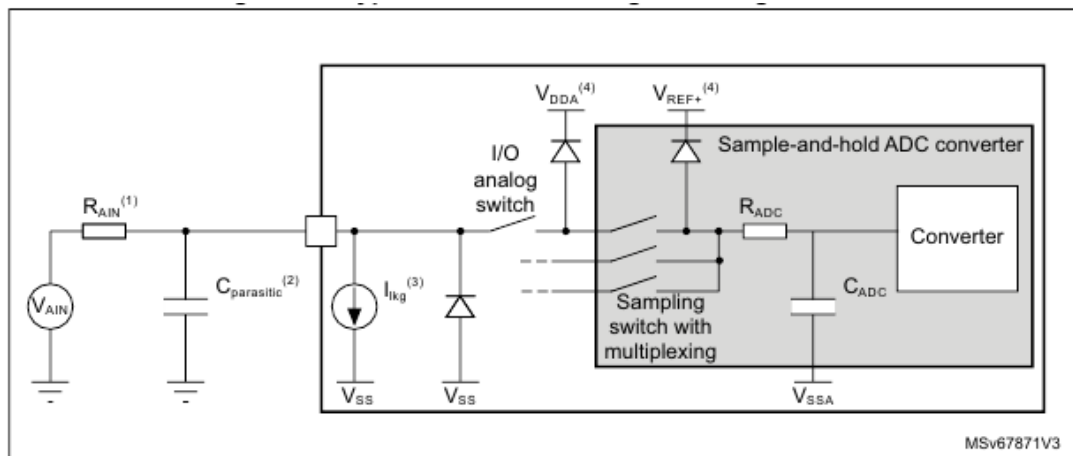
érték az adatlap alapján következő képlet szerint alakul. [6]

$$R_{AIN} < \frac{T_S}{f_{ADC} \cdot C_{ADC} \cdot \ln(2^{N+2})} - R_{ADC}$$

Ahol,

- R_{AIN} : az AD átalakítót meghajtó feszültségforrás belső ellenállása
- T_S : a konverzióhoz szükséges órajelciklusok száma (szoftveresen változtatható)
- f_{ADC} : az AD átalakító órajel-frekvenciája
- C_{ADC} : az AD átalakító „sample and hold” kapacitása
- N : az AD átalakító felbontása bitekben megadva
- R_{ADC} : az AD átalakító mintavételező kapcsolóelemének ellenállása

Ezen modellben szereplő elemek elrendezését jól szemlélteti az alábbi (2.13.) ábra.



2.13. ábra. Az AD átalakítót meghajtó maximális ellenállás meghatározásához használt modell [6]

Minden előbb felsorolt érték megtalálható az adatlapban, így már csak be kellett helyettesíteni őket a képletbe.

⁷mintavételezés és tartás

$$R_{AIN} = 50 \text{ k}\Omega$$

$$T_S = 239,5 \text{ ciklus}$$

$$f_{ADC} = 8 \text{ MHz}$$

$$C_{ADC} = 8 \text{ pF}$$

$$N = 12$$

$$R_{ADC} = 1 \text{ k}\Omega$$

T_S esetében szoftveresen lehet előre meghatározott értékekből választani. Ezek közül a legnagyobb időt választottam, mert percek telnek el az egyes mérések között, így a gyorsabb mérés nem járna semmilyen előnnyel; a nagyobb idő pedig lehetőséget ad nagyobb ellenállások használatára és ez kisebb fogyasztást eredményez.

T_s (cycles)
1.5
7.5
13.5
28.5
41.5
55.5
71.5
239.5

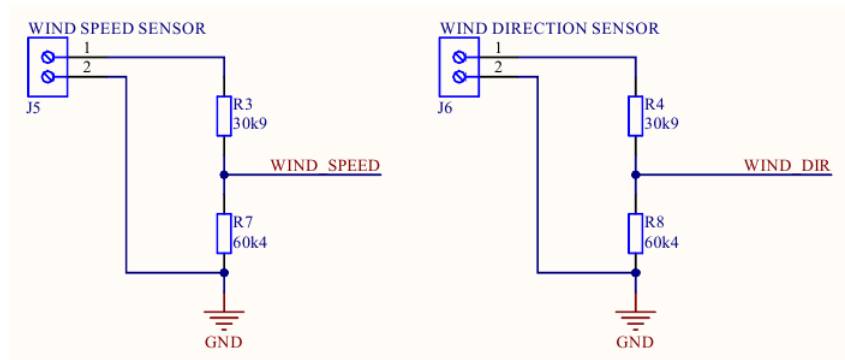
2.14. ábra. T_S lehetséges értékei [6]

$$R_{AIN} < \frac{239,5}{8 \text{ MHz} \cdot 8 \text{ pF} \cdot \ln(2^{12+2})} - 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_{AIN} < 384,63 \text{ k}\Omega$$

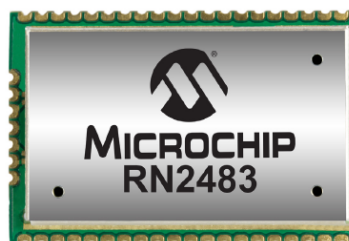
Ez azt jelenti, hogy a feszültségosztó ellenállásait úgy kell megválasztani, hogy az eredő ellenállásuk 384 k Ω alatt maradjon. A feszültségosztóra csatlakozó szenzor belső ellenállása az adatlap alapján 250 Ω alatti. Ez két nagyságrenddel alacsonyabb a felhasznált ellenállásoknál, ezért a hatását elhanyagoltam, így csak az osztó két ellenállásának összegével kell számolni. Az ellenállásokat úgy választottam ki, hogy az összegük a 100 k Ω -os nagyságrendbe essen és 5 V-os bemeneti feszültség esetén 3,3 V-os kimeneti feszültséget biztosítsanak.

A választás mindkét szenzor esetén egy 60,4 k Ω -os és egy 30,9 k Ω -os E96-os sorba tartozó, 1% tűrésű ellenállásra esett.



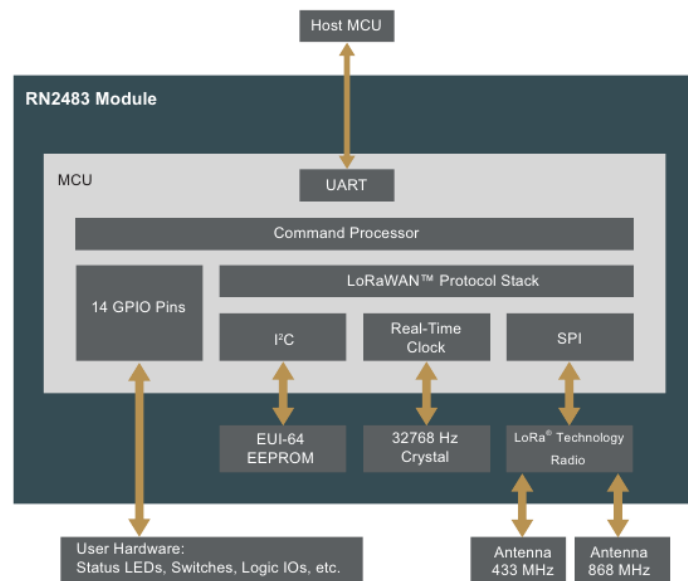
2.15. ábra. Szélsebesség és szélirány szenzorok feszültségosztói

2.4.5. LoRaWAN kommunikációs modul



2.16. ábra. RN2483 LoRaWAN modul [7]

A LoRaWAN kommunikációhoz a Microchip RN2483 modulját választottam. Az eszköz tartalmaz a LoRa technológia megvalósítására alkalmas rádiófrekvenciás egységet, ami a 868 MHz-es és a 433 MHz-es frekvenciasávot is képes kezelni. Ezen felül a modulban megtalálható egy mikrokontroller aminek segítségével önállóan képes a LoRaWAN protokoll kezelésére és az UART interfészen keresztül érkező utasítások fogadására. A kialakítás a 2.17. ábrán látható.



2.17. ábra. RN2483 LoRaWAN modul belső felépítése [7]

A modul a felhasznált mikrokontrollerrel megegyező 3,3 V tápfeszültségről üzemel. Fogyasztása tétlen állapotban 2,8 mA, adás közben 38,9 mA, alacsony fogyasztású „sleep” módban a különböző perifériák lekapcsolásával pedig csupán 1,6 μ A. A percenkénti mérések után következő rövid küldési időn kívül nincs szükség a kommunikációra, ezért a „sleep mode” használatával igen alacsony fogyasztást lehet elérni.

A mikrokontrollerhez való csatlakozáshoz szükség van az UART interfész RX és TX vonalaira, valamint egy $\overline{\text{RESET}}$ vonalra is. Az UART kommunikáció alapértelmezetten 567 500 b/s-os adatárviteli sebességgel működik, ami a korai tesztelés során stabilnak bizonyult, így ezen nem változtattam.

2.4.6. Tápegység

2.4.6.1. Méretezés a várható fogyasztásra

A várható fogyasztás meghatározásához először egy listát készítettem a különböző felhasznált eszközökkel és azok várható átlagos teljesítményével.

STM32F103 A mikrokontroller esetében fogyasztás szempontjából többféle üzemmód is elérhető, amik a működő funkciók számában térnek el egymástól. Ezek közül a „Run” és a „Sleep” üzemmódot használom. Az idő tekintetében azzal a becsléssel éltem, hogy 1 perc alatt a mikrokontroller a legrosszabb esetben is 10 s-ot fog eltölteni a 8,6 mA áramfelvételű „Run”

módban, a többi 50 s-ot pedig az 5,5 mA fogyasztású „Sleep” módban. [6] Így az átlagos teljesítmény a következőképpen alakul.

$$P_{STM32F103} = I_{\text{átlag}} \cdot U_{\text{táp}} = \frac{10 \text{ s} \cdot 8,6 \text{ mA} + 50 \text{ s} \cdot 5,5 \text{ mA}}{60 \text{ s}} \cdot 3,3 \text{ V} = 19,86 \text{ mW}$$

RN2483 Az RN2483 átlagos teljesítményének kiszámításához azt vettem figyelembe, hogy az adásidőre vonatkozó kitöltési tényező 1%-ra van limitálva. Így 1 perc alatt a legrosszab esetben is csak 600 ms-ig működhet az adás, ez alatt 38,9 mA az áramfelvétel. A maradék időben a modul „sleep mode”-ban van, ilyenkor az áramfelvétel 1,6 μ A. [7]

$$P_{RN2483} = I_{\text{átlag}} \cdot U_{\text{táp}} = \frac{600 \text{ ms} \cdot 38,9 \text{ mA} + 59,4 \text{ s} \cdot 1,6 \mu\text{A}}{60 \text{ s}} \cdot 3,3 \text{ V} = 1,29 \text{ mW}$$

BMP390 A légnyomás szenzor esetében az adatlapban 3,2 μ A-es áramfelvételt adnak meg 1 Hz-es mérési gyakoriság mellett. [5] Ez az érték olyan alacsony a többi eszköz áramfelvételéhez viszonyítva, hogy nem számítottam át a valójában használt (16,67 mHz-es) mérési gyakoriságra, mert az eltérés a teljes fogyasztás szempontjából elhanyagolható lenne.

$$P_{BMP390} = I_{\text{átlag}} \cdot U_{\text{táp}} = 3,2 \mu\text{A} \cdot 3,3 \text{ V} = 10,56 \mu\text{W}$$

AM2301 A hőmérséklet és páratartalom szenzor esetén az adatlap szerint 600 μ A-es átlagos áramfelvétellel lehet számolni.

$$P_{AM2301} = I_{\text{átlag}} \cdot U_{\text{táp}} = 600 \mu\text{A} \cdot 3,3 \text{ V} = 1,98 \text{ mW}$$

Szélesség és szélirány szenzorok Mindkét szenzor esetében az adatlapon megadott 0,75 W-os teljesítményből indultam ki.

$$P_{\text{szél}} = 2 \cdot 0,75 \text{ W} = 1,5 \text{ W}$$

Eszköz	Átlagos teljesítmény
STM32F103 mikrokontroller	19,86 mW
BMP390 légnyomás szenzor	10,56 μ W
RN2483 LoRaWAN modul	1,29 mW
AM2301 hőmérséklet és páratartalom szenzor	1,98 mW
Szélesség és székirány szenzorok	1,5 W
Összeg	1,52 W

2.1. táblázat. A kiválasztott eszközök várható átlagos teljesítményszükséglete

Ebből a rendszer napi energiaszükséglete a következőképpen alakul:

$$W_{napi} = P_{\text{átlag}} \cdot t = 1,52 \text{ W} \cdot 24 \text{ h} = 36,48 \text{ Wh}$$

2.4.6.2. Az akkumulátor kiválasztásának szempontjai

Bevezetés A szükséges akkumulátor kapacitás meghatározása után következett a megfelelő akkumulátor technológia kiválasztása. Ez különösen fontos a specifikációban meghatározott széles működési hőmérséklet-tartomány miatt.

A legtöbb akkumulátortípusra jellemző a környezeti hőmérséklet csökkenésével járó kapacitás-, illetve élettartam-csökkenés, de ez a probléma nem mindegyik technológiát érinti egyforma mértékben.

Lítiumion-akkumulátor A lítiumion-akkumulátorok használata elsősorban kézenfekvő megoldásnak tűnhet az elterjedtségük, a magas energiasűrűségük és a viszonylag alacsony árak miatt. Három különböző, eltérő gyártóval rendelkező akkumulátorcella adatlapját hasonlítottam össze. [8] [9] [10]

Ambient Temperature	Charge	0~+40°C
	Discharge	-20~+60°C
	Storage	-20~+50°C

2.18. ábra. Panasonic lítiumion-cella töltési és kisütési hőmérséklet határértékei [10]

3.13 Operating temperature (Ambient)	Charge : 0 to 45 °C Discharge: -20 to 60 °C
---	--

2.19. ábra. Samsung lítiumion-cella töltési és kisütési hőmérséklet határértékei [9]

2.9 Operating Temperature	Charge	0 ~ 45 °C
	Discharge	-20 ~ 60 °C

2.20. ábra. LG lítiumion-cella töltési és kisütési hőmérséklet határértékei [8]

A fagypont alatti hőmérsékleten történő kisütés ugyan mindegyik vizsgált cellánál engedélyezett, a 0°C alatti töltést viszont egyik gyártó sem javasolja.

Lítium-vasfoszfát akkumulátor A lítium-vasfoszfát akkumulátor működési hőmérséklet-tartomány szempontjából a legalkalmasabb választás lenne a feladatra. Ebből az akkumulátortípusból elérhetőek kifejezetten a széles hőmérséklet-tartományban történő kültéri használatra szánt modellek. [11] [12]

Operating Temperature	-30 °C to +60 °C
Storage Temperature	-40 °C to +70 °C

2.21. ábra. ETZ lítium-vasfoszfát akkumulátor töltési és kisütési hőmérséklet határértékei [11]

Discharge Temperature	-20~+65°C
Charge Temperature	-20~+45°C

2.22. ábra. LEADYO lítium-vasfoszfát akkumulátor töltési és kisütési hőmérséklet határértékei [12]

Savas ólomakkumulátor A savas ólomakkumulátor esetén az alkalmazás helyéből adódóan csak az SLA (sealed lead-acid), tehát zárt rendszerű, gondozásmentes akkumulátorok használhatóak. Azt tapasztaltam, hogy az ilyen típusú akkumulátorok esetében a nyilvánosan elérhető adatlap sok esetben nem tartalmaz minden információt a működési hőmérséklet határértékeire vonatkozóan, viszont több modellhez is megtaláltam a hőmérséklet és a kapacitás közötti összefüggést mutató táblázatokat.

Battery Type		-20°C	-10°C	0°C	5°C	10°C	20°C	25°C	30°C	40°C	45°C
Battery	12V	50%	70%	83%	85%	90%	98%	100%	102%	104%	105%

2.23. ábra. EMOS SLA akkumulátor hőmérséklet-kapacitás táblázata [13]

Capacity Affected by Temperature	40°C	25°C	0°C	-15°C
	102%	100%	85%	65%

2.24. ábra. Ultracell SLA akkumulátor hőmérséklet-kapacitás táblázata [14]

Ezek alapján feltételezhető, hogy – ugyan jelentős kapacitás-csökkenéssel, de – alkalmasak a fagyponthoz alatti működésre is.

Értékelés és választás A megfelelő akkumulátor kiválasztásánál fontos tényező a vételár is, mert a használat körülményeitől függően néhány évente szükség lehet a cseréjére, így tehát nem csak egyszeri költséget jelent. Ezek miatt ár szerint is összehasonlítottam a különböző akkumulátor típusokat.

Akkumulátortípus	Ár [Ft/Wh]
lítiumion	134,61
lítium-vasfoszfát	297,0
SLA	113,4

2.2. táblázat. Különböző típusú akkumulátorok összehasonlítása ár szerint ⁸

⁸Az összehasonlítás az <https://elektrohungary.com>-on feltüntetett bruttó árak alapján készült 2024.04.01-én.

A lítiumion cellák esetében az alacsony hőmérsékleten történő töltés problémáját csak akkumulátorfűtés beépítésével lehetne megoldani, ami a hidegebb téli napokon – amikor a nap-elem jellemzően kevesebbet termel – növelné meg a fogyasztást. Ezért a lítiumion akkumulátor használatát kizártam. A lítium-vasfoszfát technológia esetén már jóval kedvezőbb az alacsony hőmérsékleten történő töltés, azonban az ilyen típusú akkumulátorok jelentősen magasabb ára (2.2. táblázat) miatt ezt a lehetőséget is elvettem.

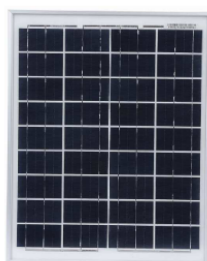
Végül az savas ólomakkumulátorra esett a választás, mert a specifikációban megadott teljes hőmérséklet-tartományban képes működni és a többi lehetőséghez képest alacsony áron beszerezhető. A kiválasztott akkumulátor egy EMOS E1270 típusú 12 V-os 7 Ah (84 Wh) kapacitású SLA. [13] Ez azt jelenti, hogy a számított energiaszükséglet (36,48 Wh) alapján, töltés nélkül, ideális körülmények között körülbelül 2 napig, a működési hőmérséklet-tartomány alsó határán pedig 1 napig képes üzemelni a rendszer.



2.25. ábra. EMOS E1270 12V/7Ah [13]

2.4.6.3. Napelem

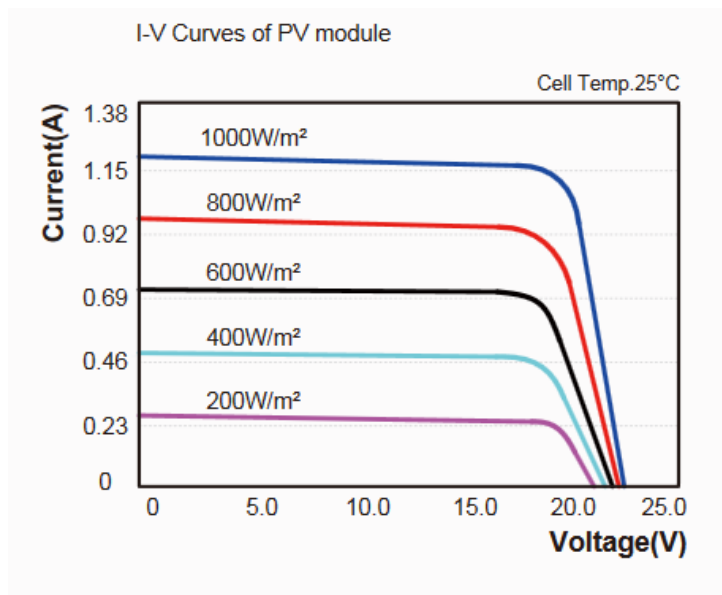
A tápellátásra egy 20 W maximális teljesítményű 22,6 V üresjárási feszültséggel rendelkező napelemet választottam ki.



2.26. ábra. A kiválasztott napelem

2.4.6.4. Töltésvezérlő áramkör

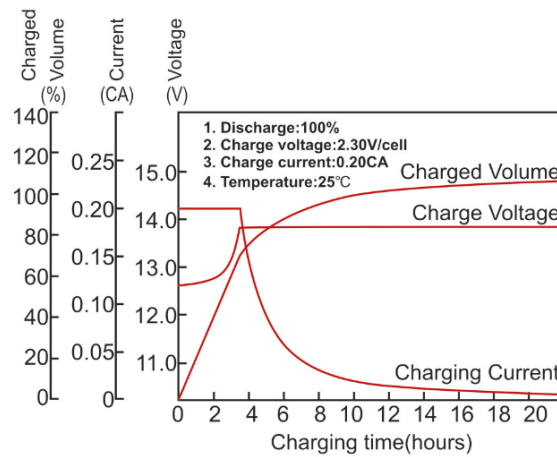
Az akkumulátor kiválasztása után következett a hozzá tartozó töltőáramkör tervezése. Ebben a legfőbb nehézséget az jelenti, hogy a napelem által leadott áram és az akkumulátor töltéséhez szükséges áram nincsen egyensúlyban.



2.27. ábra. Napelem U-I karakterisztikája

A napelem feszültség-áram karakterisztikáján jól látszik, hogy a besugárzott teljesítmény megváltozásával nagy mértékben változik a leadott áram. Ez azzal jár, hogy a napelemre kapcsolt terhelést – jelen esetben az akkumulátortöltő áramát – is úgy kell változtatni, hogy a napelem ideális munkapontban maradjon. Ha ezt nem tesszük meg és a napelemre a besugárzott teljesítményhez képest túl nagy terhelést kapcsolunk, akkor a napelem kapcsain visszaesik a feszültség – ez az akkumulátortöltés esetében a töltés teljes leállítását is okozhatja.

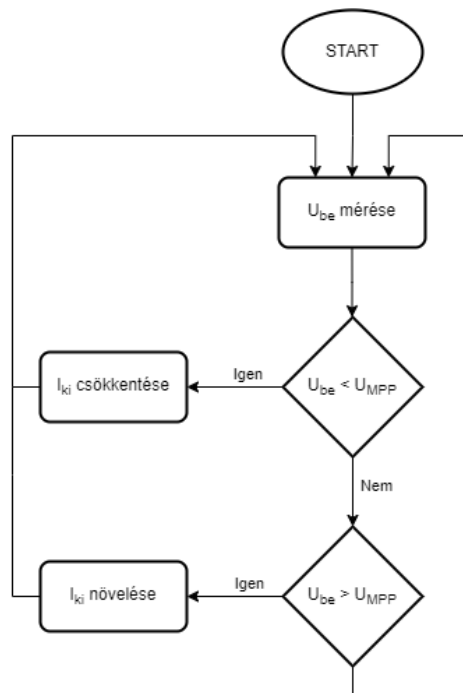
Ennek a problémának a megoldására szolgál az MPPT (Maximum Power Point Tracking, maximális munkapont követés) töltésvezérlő. Az áramkör feladata az, hogy a napelem mindig a lehető legnagyobb teljesítményű munkapontban üzemeljen úgy, hogy közben az akkumulátor lehetőség szerint az előírt töltési görbe szerint töltődjön. Az alábbi (2.28.) ábrán az általam használt SLA akkumulátor töltési karakterisztikája látható.



2.28. ábra. SLA akkumulátor töltési görbéje

A feladatra a Texas Instruments BQ24650 MPPT töltésvezérlő IC-jét választottam ki. Az IC alapvetően a lítiumion akkumulátorokkal működőképes, de az alapkapcsolás módosításával alkalmassá tehető a savas ólomakkumulátor töltésére is. [15]

Az áramkör az alábbi folyamatábrán (2.29. ábra) látható egyszerű MPPT (Maximum Power Point Tracking, maximális munkapont követés) algoritmust használja. Az ilyen típusú egyszerűbb MPPT algoritmusok alacsonyabb hatásfokkal rendelkeznek mint egyes komplexebb változatok, az egyszerű áramköri megvalósítás viszont ilyen kis rendszerknél nagyobb jelentőséggel bír, ezért ez az algoritmus is teljesen megfelelő a feladatra. [16]



2.29. ábra. A BQ24650 által használt MPPT algoritmust szemléltető folyamatábra

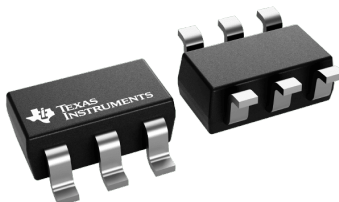
Először megméri a napelem feszültségét, majd összehasonlítja a beállított U_{MPP} feszültséggel, ami helyes beállítás esetén a maximális teljesítményhez tartozik. Ha a mért feszültség kisebb mint U_{MPP} , az azt jelenti, hogy a napelem túl van terhelve: a töltőáramot csökkenteni kell. Ha a mért feszültség nagyobb mint U_{MPP} , akkor növelhető a terhelés, a töltőáramot meg lehet emelni.

Ahhoz, hogy a kapcsolás ólomakkumulátorral is működjön a következő módosításokat kellett végrehajtani az eredeti kapcsoláson. Az ólomakkumulátorok töltésekor az állandó feszültségű szakaszban használt feszültség értéke függ a környezeti hőmérséklettől. [17] [18] Ezen feszültségérték kompenzálására a feszültség visszacsatolást megvalósító feszültségosztóba egy NTC ellenállást kell beépíteni. Ez a megoldás azt eredményezi, hogy hőmérséklet csökkenésével a feszültségosztó alsó tagján érzékelt feszültség lecsökken, ezért az áramkör megnöveli a töltőfeszültséget.

Eszköz	Maximális áram
STM32F103 mikrokontroller	50,3 mA
BMP390 légnyomás szenzor	720 μ A
RN2483 LoRaWAN modul	38,9 mA
AM2301 hőmérséklet és páratartalom szenzor	1,2 mA
Összeg	91,12 mA

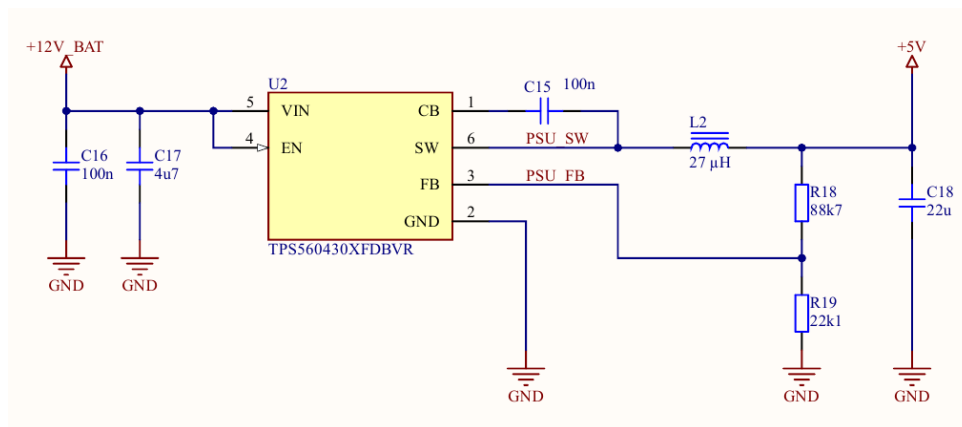
2.3. táblázat. A kiválasztott 3,3 V-os eszközök várható maximális áramfelvétele

Annak érdekében, hogy a rendszer később a tápegység megváltoztatása nélkül bővíthető legyen további szenzorokkal, a step-down konverter méretezésénél a szükségesnél nagyobb tartalékkal terveztem, így a maximális áram 300 mA lett. A feladatra a Texas Instruments TPS560430 szinkron step-down konverter IC-jét választottam ki.



2.31. ábra. TPS560430

Az eszköz egy SOT-23 tokozásban elérhető, szinkron step-down DC-DC konverter beépített áramkorláttal és rövidzárvédelemmel.



2.32. ábra. TPS560430 IC-vel megvalósított step-down konverter

A visszacsatoló feszültségosztó ellenállásait az adatlapban megtalálható táblázat segítségével választottam ki, ami tartalmazza a gyakran használt kimeneti feszültségekhez tartozó ellenállásértékeket. Ugyan ez igaz a kimeneti kondenzátorra is, viszont a táblázatban szereplő

induktivitások ebben az esetben nem voltak használhatók, mert azok a TPS560430 600 mA-es maximális áramához tartozó értékek.

f _{SW} (MHz)	V _{OUT} (V)	L (μH)	C _{OUT} (μF) ⁽¹⁾	R _{FBT} (kΩ)	R _{FBB} (kΩ)
1.1	3.3	12	22 μF / 10 V	51	22.1
	5	18	22 μF / 10 V	88.7	22.1
	12	33	10 μF / 25 V	243	22.1
2.1	3.3	6.8	10 μF / 10 V	51	22.1
	5	10	10 μF / 10 V	88.7	22.1
	12	18	10 μF / 25 V	243	22.1

2.33. ábra. A TPS560430 adatlapjában megtalálható táblázatos segítség a méretezéshez [19]

A szükséges minimális induktivitás meghatározása az adatlap alapján a következő képlet szerint történik [19]:

$$L_{min} = \frac{U_{be_max} - U_{ki}}{I_{ki} \times K_{ind}} \times \frac{U_{ki}}{U_{be_max} \times f_{SW}}$$

Ahol:

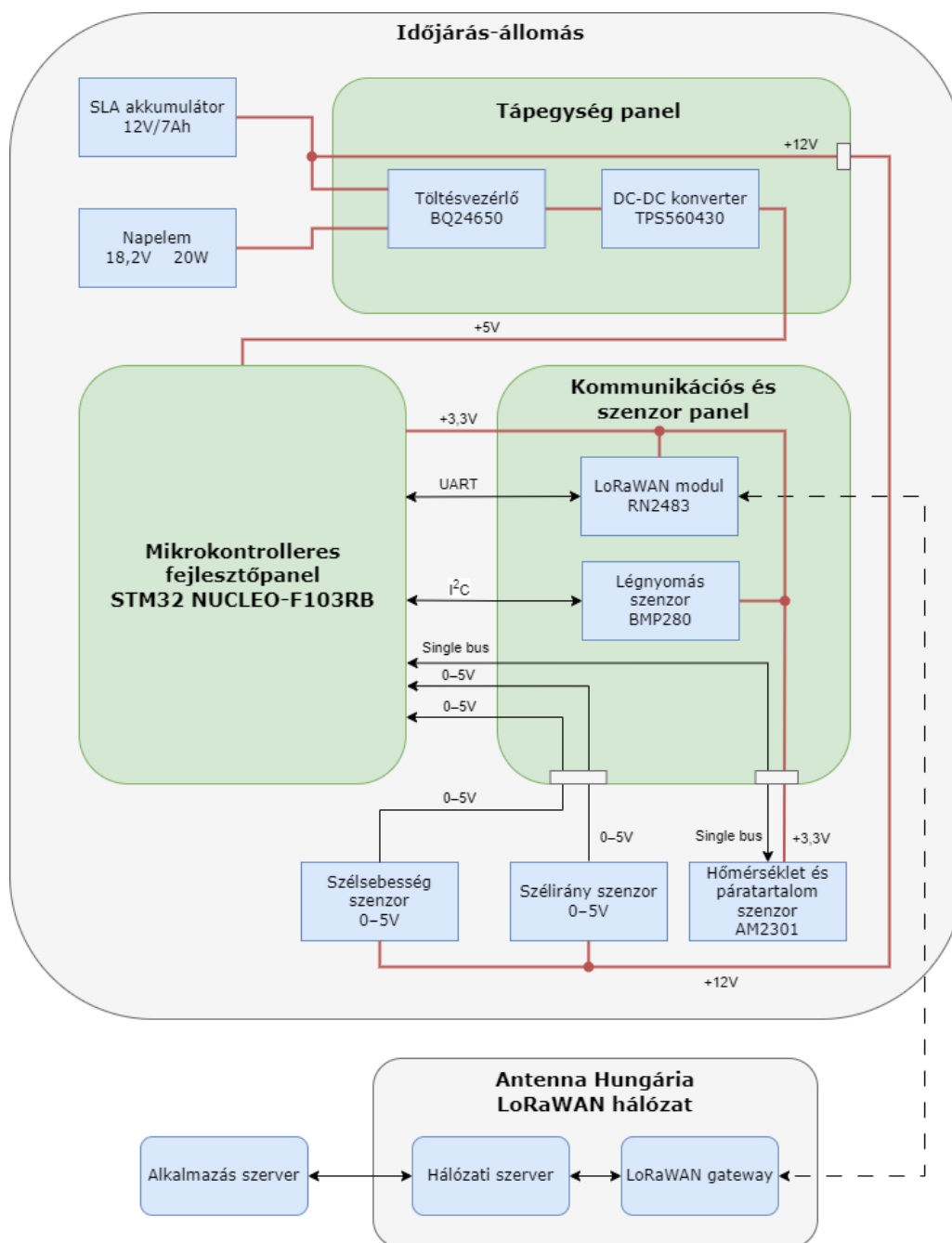
- L_{min} : a minimális szükséges induktivitás
- U_{be_max} : a maximális bemeneti feszültség
- U_{ki} : a kimeneti feszültség
- I_{ki} : a kimeneti áram
- f_{SW} : a DC-DC konverter kapcsolási frekvenciája
- K_{ind} : együttható, ami a tekercs Δi_L árama és a kimeneti áram közötti összefüggést adja meg; $K_{ind} = \Delta i_L / I_{ki}$

Az adatlap ajánlása alapján $K_{ind} = 0,4$ értékkel számolva, 22,6 V maximális kimeneti feszültség és 300 mA maximális kimeneti áram mellett az alábbi minimális induktivitást kaptam:

$$L_{min} = \frac{22,6 \text{ V} - 3,3 \text{ V}}{300 \text{ mA} \cdot 0,4} \cdot \frac{3,3 \text{ V}}{22,6 \text{ V} \cdot 1,1 \text{ MHz}} = 21,35 \mu\text{H}$$

Ezek alapján egy ferritmagos, árnyékolt 27 μH-s tekercset választottam ki 1,2 A szaturációs árammal. Az árnyékolt tekercs ára valamivel magasabb az árnyékolással nem rendelkező, de ezzel a megoldással csökkenthető a kisugárzott elektromágneses zavar. A kapcsolás bemeneti oldalára az ajánlott X7R dielektrikumú kerámia kondenzátorok kerültek.

2.5. Fizikai rendszerterv

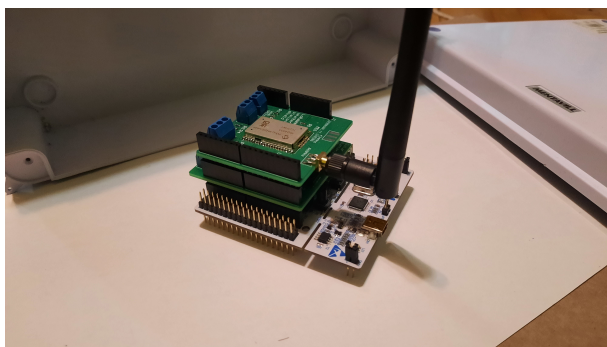


2.34. ábra. Fizikai rendszerterv

2.6. NYÁK-tervezés és gyártás

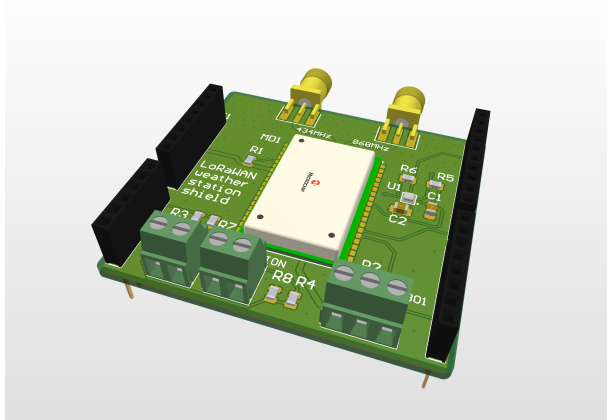
Ahogy az a fizikai rendszerterven is látható, a NYÁK-tervezésnél egy moduláris elrendezés mellett döntöttem. A STM32 NUCLEO fejlesztőpanelhez az Arduino UNO kompatibilis tűskesor aljazton keresztül csatlakozik a tápegység és a kommunikációs panel is.

A NYÁK-ok FR4-es 1,6 mm vastagságú hordozóval és HASL (Hot Air Solder Leveling, tűziónozás) felületkezeléssel kerültek legyártásra. Az alkatrészek beültetését és forrasztását kézzel végeztem – a rossz forrasztásokból származó hibák elkerülése érdekében – hagyományos, ólomtartalmú forrasztanyaggal.

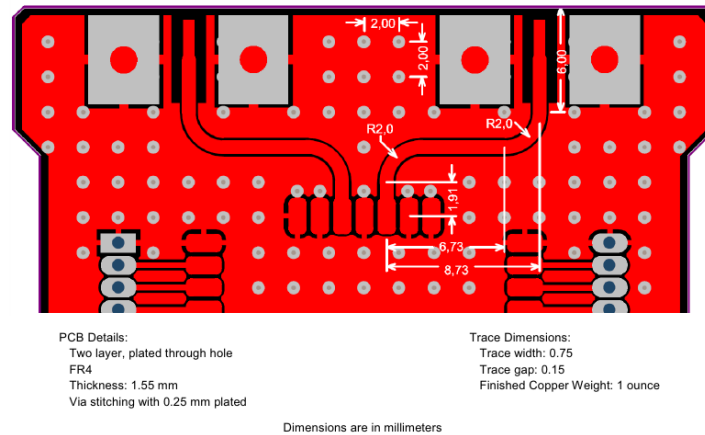


2.35. ábra. Elkészült NYÁK-ok összeszerelve

2.6.1. Kommunikációs panel



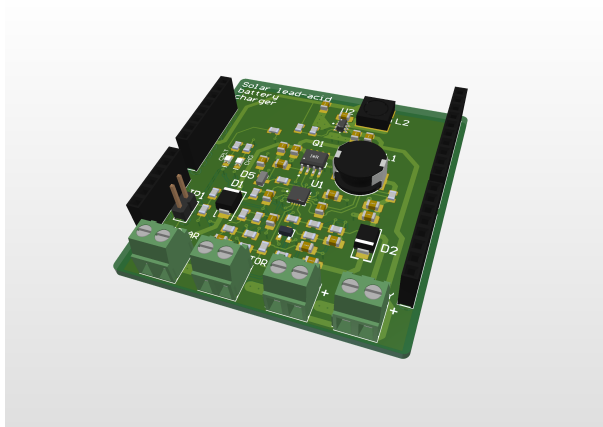
lakozója is. Ezen a panelen a legfőbb kihívást az RN2483 antenna kivezetései és az SMA (SubMiniature version A) antenna csatlakozók közötti vezetősávok megtervezése jelentette. A vezetősávokat úgy kellett megtervezni, hogy biztosítsák az impedanciaillesztéshez szükséges $50\ \Omega$ hullámimpedanciát. Ennek megvalósításához az eszköz adatlapján található segédletet vettem igénybe, ami külön foglalkozik a rádiófrekvenciás kialakítással. [7]



2.37. ábra. Segédlet az antenna kiveztések megtervezéséhez [7]

2.6.2. Tápegység panel

A tápegység panelen található a töltésvezérlő és a DC-DC konverter áramkör, valamint itt kaptak helyt a napelem és az akkumulátor csatlakozói is.



2.38. ábra. Tápegység panel

2.7. A tartószerkezet és a készülékház felépítése

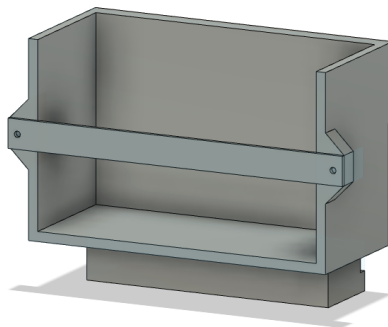
Az STM32 NUCLEO-F103 fejlesztőpanelből és a kommunikációs és tápegység panelekből létrejött összeállítás és az akkumulátor a készülékházban kaptak helyet. A feladatra olyan műszerdobozt kellett választani, ami kifejezetten kültéri alkalmazásra készült: ellenálló a csapadékkal szemben és az anyagát nem károsítja a napból érkező UV sugárzás. A választás egy Stilo, 300 mm × 250 mm × 120 mm méretű, polikarbonát anyagú, IP67⁹ védettséggel rendelkező dobozra esett. (2.39. ábra)



2.39. ábra. Műszerdoboz

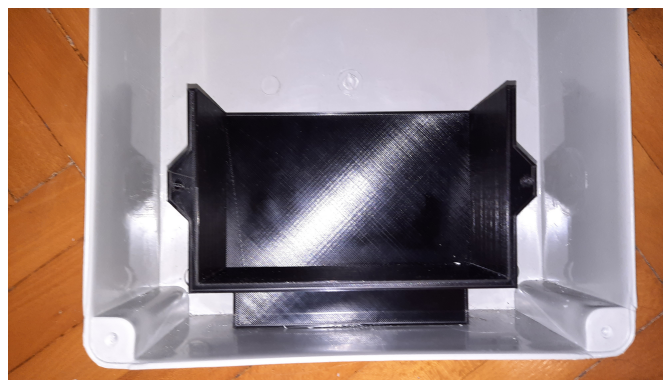
⁹IP67: teljes mértékben védett por ellen, és vízbe merülés ellen korlátozott ideig [20]

A készülékházban helyt kapott ólomakkumulátort – főleg a jelentős, 2,1 kg-os tömege miatt – rögzíteni kell az elmozdulás ellen. Erre a célra egy akkumulátortartót terveztem Autodesk Fusion segítségével. Az akkumulátort egyrészt a súrlódás, másrészt egy lezáróelem rögzíti a tartóban, ami két darab M3×10 mm csavarral és a hozzá tartozó csavaranyákkal kapcsolódik az akkumulátortartó fődarabjához. Az alkatrész fekete színű PLA műanyagból készült 3D nyomtatással.



2.40. ábra. Akkumulátortartó

Az akkumulátortartót ragasztással rögzítettem a készülékházba kétkomponensű epoxigyanta segítségével.



2.41. ábra. Akkumulátortartó beragasztva a helyére

A napelem és a külső szenzorok kábeleinek dobozon való átvezetésére M12-es tömszelencék szolgálnak, amik IP68¹⁰ védettséggel rendelkeznek.

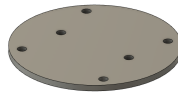
¹⁰IP68: teljes mértékben védett por ellen, és víz alatt 1-3 méter mélységben folyamatosan használható 30 percen [20]



2.42. ábra. Beépített tömszelencék



2.43. ábra. Összeszerelt panelek beépítve a helyükre



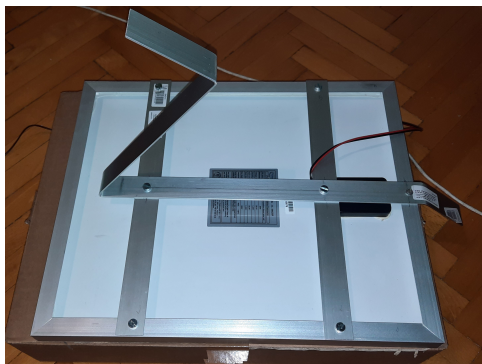
2.44. ábra. Alátétlemez a szélesség és szélirány szenzorokhoz

A szélesség és szélirány szenzorok felfogatásához egy alátétlemezt készítettem PLA műanyagból 3D-nyomtatással. Ezek az alkatrészek M4×15 mm csavarokkal rögzülnek a szenzorok házához és egy 1 m hosszúságú alumíniumprofilhoz, ami a két szenzor közötti szükséges távolságot biztosítja.

A napelempanel felfogatásához tartószerkezetet készítettem 3 mm×30 mm-es alumínium laposrúdból. A szerkezet három alkatrészből áll össze, amik egymáshoz és a napelempanelhez M6×16 mm csavarok és csavaranyák segítségével kapcsolódnak.



2.45. ábra. Szélsebesség szenzor rögzítése



2.46. ábra. Napelemtartó

A hőmérséklet szenzor árnyékolójának kialakításakor a következő szempontokat kellett figyelembe venni:

- „a védőberendezés védje az eszközt a direkt, reflektált sugárzástól,
 - a védőberendezés levegője gyorsan cserélődhessen a külső levegővel,
 - a védőberendezés körüli szél minimálisan tudjon befújni,
 - a védőberendezés ne cseréljen hőt a mért levegővel.
 - a védőberendezés a hőmérsékleti változásokat a lehető leggyorsabban kövesse le.”[21]
- [4]

Az árnyékoló elkészítéséhez azt találtam a legjobb megoldásnak, ha egy már bevált árnyékolótípust valósítok meg és nem kezdek saját alkatrész tervezésébe. Ennek megfelelően egy lemezes árnyékolót választottam ki a feladatra és 3D-nyomtatással le is gyártottam.¹¹ Az alkatrész fekete PLA műanyagból készült és a külső része az előírásoknak megfelelően fehér festést kapott. A szenzor az érintkező felületek és ezáltal a hőátadás minimalizálása érdekében egy távtartóval rögzül a szerkezethez.

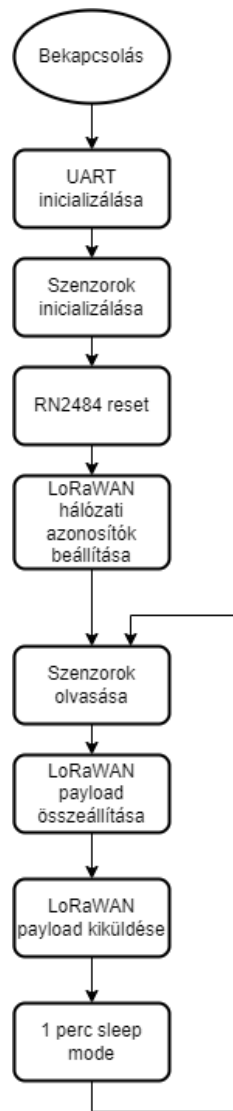
¹¹A 3D modell forrása: <https://www.thingiverse.com/thing:2970799>



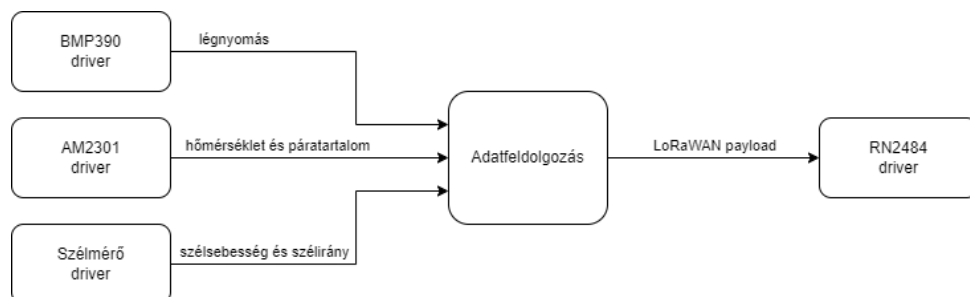
2.47. ábra. A hőmérséklet és páratartalom szenzor árnyékolója

2.8. Szoftver

A mikrokontrolleren futó szoftver az alábbi folyamatábra szerint működik. A bekapcsolás után megtörténik az UART interfész és a szenzorok inicializációja. Ezek után a mikrokontroller reset jelet küld a LoRaWAN modulnak, majd megtörténik a csatlakozáshoz szükséges hálózati azonosítók beállítása hálózati azonosítók beállítása. Miután befejeződött a beállítás elkezdődik a szenzorok olvasása. A beolvasott adatokból feldolgozás után a mikrokontroller összeállítja a kiküldendő adatokat, majd utasítást ad a LoRaWAN modulnak a csomag kiküldésére.

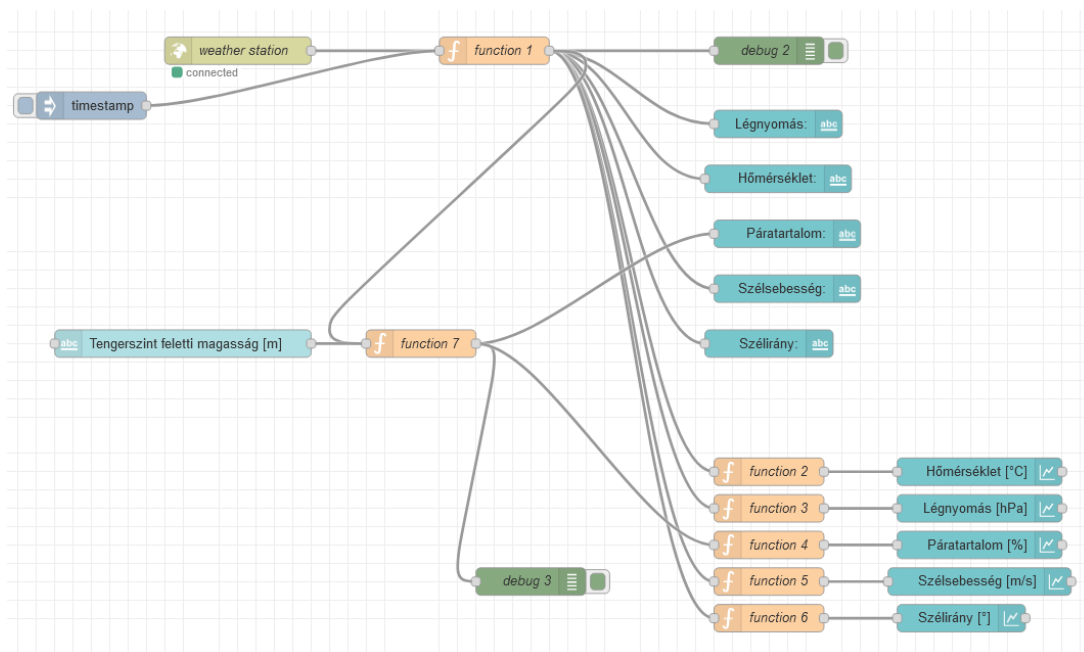


2.48. ábra. A mikrokontrolleren futó szoftver működése



2.49. ábra. A mikrokontrolleren futó szoftver moduljai

A hálózati szerver a megkapott adatokat MQTT protokollon eljuttatja a NodeRED alkalmazás szerverhez. A NodeRED alkalmazás a következő felépítéssel rendelkezik.

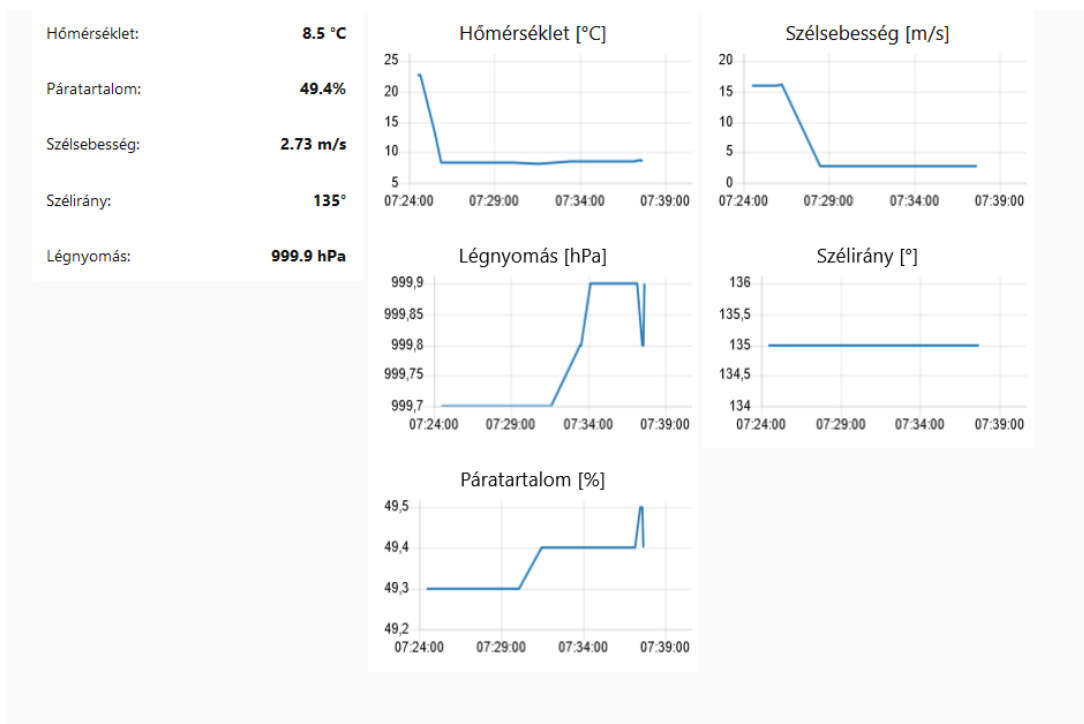


2.50. ábra. A NodeRED alkalmazás felépítése

A MQTT-n bérkezett üzenet először szétválasztásra kerül a különböző mért adatokra. A légnyomás esetén szükség van még a nyomásérték tengerszintre való átszámítására. Ehhez egy beviteli mezőben kell megadni az állomás tengerszint feletti magasságát. A feldolgozás után minden adat kikerül a felhasználói felületre.

2.9. Tesztelés

A tesztelés során a mért adatok a vártaknak megfelelően megjelentek a NodeRED felhatalmazott felületen.



2.51. ábra. NodeRED dashboard

Azt tapasztaltam azonban, hogy előfordulnak olyan esetek, amikor az adott mérési ciklusban kimaradnak az adatok. A LoRaWAN modul által küldött üzenetek alapján ezt a jelenséget az okozza, hogy a kiküldött csomagok többszöri újraküldés után sem jutnak el a gateway-hez. Ez azért történhet meg, mert a tesztelés helye a lefedettség határán található és a hálózati szerver kezelőfelületete szerint is nem túl kedvező –18,5 dB-es jel-zaj viszonyal kell számolni.

Last Seen	Feb 17, 2024, 1:43:03 PM
RSSI	-119.00 dBm
SNR	-18.50 dB
Frequency	868.500 MHz
SF	12
Bandwidth	125 kHz
Gateway	024B0BFFFF03118A

2.52. ábra. Az utolsó fogadott csomag paraméterei

2.10. A továbbfejlesztés lehetőségei

A tervezés és a tesztelés során jónéhány lehetőség felmerült az időjárás-állomás továbbfejlesztésére.

- A jelenlegi szenzorok is értékes adatokat szolgáltatnak, de hasznos lenne további érzékelőkkel bővíteni a rendszert a következő mennyiségek mérésre: csapadékmennyiség, talajhőmérséklet, talajnedvesség, besugárzott teljesítmény.
- A mikrokontrolleres fejlesztőpanelre épített bővítőpanelek a prototípus elkészítéséhez megfelelőek voltak, de megmutkoztak ennek a kialakításnak a hátrányai is. A csatlakozó egyes tűskéi sérülékenyek, a csatlakoztatáskor könnyen meghajlanak. A NUCLEO fejlesztőpanelen túl kevés (és nem ideális módon elhelyezett) rögzítőfurat található, így a stabil rögzítéssel problémák adódnak. Ezért érdemes lenne a teljes kapcsolást – beleértve a mikrokontrollert is – egy NYÁK-on elhelyezni.
- Az akkumulátor feszültség figyelésére a hardveres kialakítás elkészült, a szoftver azonban még nem képes ezen adatok kiküldésére. A funkció megvalósítása hasznos lehetne a tápellátó rendszer működésének megfigyelésére és alkalmas lenne az akkumulátor elhasználódásának detektálására is.
- Az alkalmazás szerveren futó szoftver a beérkezett időjárási adatokat jelenleg csak rövid ideig tárolja. Érdemes lenne a mért értékeket egy adatbázisban tárolni, így azokat nem csak az aktuális helyzet monitorozására lehetne használni, hanem alkalmasak lennének hosszabb távú elemzések készítésére is.

3. MÁSODIK VERZIÓ

3.1. Specifikáció

Az első verzió tesztelése során szerzett tapasztalatok és az előző dolgozatra érkezett visszajelzések alapján több új szenzor és funkció ötlete is felmerült, így a készülék specifikációja a következő elemekkel bővült.

- Gyorsulásérzékelő
- Töltőáram- és akkumulátorfeszültség-mérés
- Csapadékmennyiség érzékelő
- RS485 interfész talajszenzorok számára

3.2. Hardeveres módosítások

3.2.1. Bevezetés

A specifikációban említett új funkciók megvalósítása mellett kísérletet tettem a készülék energiafogyasztásának csökkentésére. Az alacsonyabb fogyasztás által lehetőség nyílt a készülék méretének és tömegének csökkentésére is, más típusú, kisebb kapacitású akkumulátor és alacsonyabb teljesítményű napelem használatával.

3.2.2. Szélsébség és szélirány szenzorok

A szélsébség és szélirány szenzorok esetében az előző verzióban a problémát az jelentette, hogy a fogyasztásuk a rendszer többi részéhez viszonyítva kiemelkedően magas. A szenzorok a mért értékkel arányos feszültséget folyamatosan szolgáltatják és ezzel folyamatosan 1,5W teljesítmény vesznek fel. A mért szélsébségre és szélirányra csak percenként egyszer van szükség, ezért a fennmaradó időben a szenzorok tápfeszültsége lekapcsolható.

A kimeneti feszültség stabilizálódásához méréseim szerint megközelítőleg 2s szükséges. Így a következőképpen alakul a szélsébség és szélirány szenzorok együttes átlagos teljesítménye a tápfeszültség időszakos lekapcsolása esetén, +1 s-os bekapcsolási idő tartalékkal számolva.

$$P_{szél} = 1,5 \text{ W}$$

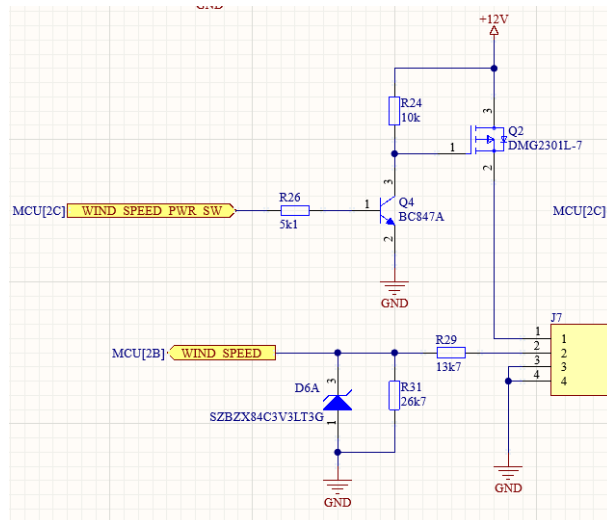
$$t_{be} = 3 \text{ s}$$

$$t_{ki} = 57 \text{ s}$$

$$P_{szél \text{ új}} = P_{szél} \cdot \frac{t_{be}}{t_{be} + t_{ki}} = \frac{3 \text{ s}}{57 \text{ s} + 3 \text{ s}} = 75 \text{ mW}$$

Az eredmény alapján látható, hogy ezzel a megoldással huszadára csökken a szélsébség és szélirány szenzorok fogyasztása, így mindenképpen érdemes megvalósítani. A szenzorok tápfeszültségének lekapcsolása legegyszerűbben a 12 V-ot szolgáltató step-up konverter engedélyező jelének alacsony szintre állításával valósítható meg, azonban így a szintén 12 V-ról működő talajszenzor tápellátása is megszűnik. Annak érdekében, hogy a három 12 V-ról működő szenzor külön-külön is lekapcsolható legyen, külön kapcsolóelemekre volt szükség.

A probléma megoldására egy felső oldali MOSFET-es kapcsolót valósítottam meg, ami a 3.1 ábrán látható módon Q2 P-csatornás MOSFET-ből és az azt meghajtó Q4 bipoláris NPN tranzisztorból áll. A felső oldali kapcsolóra azért volt szükség, mert az a egyszerűbb alsó oldali változat a szenzor 0 potenciáljának eltolásával ofszetet adna a méréshez.



3.1. ábra. Szélsebesség és szélirány szenzorok kezelése

Az 5 V-os kimeneti jel az előző verzióval azonos módon egy feszültségosztón keresztül jut el a mikrokontroller analóg bemenetéhez. A kapcsolás egy Zener-diódával bővült ki ami egy túlfeszültség-védelmet valósít meg így a mikrokontroller akkor sem károsodhat, ha a szenzor meghibásodása esetén a 12 V-os tápfeszültség kerül a kimenetre.

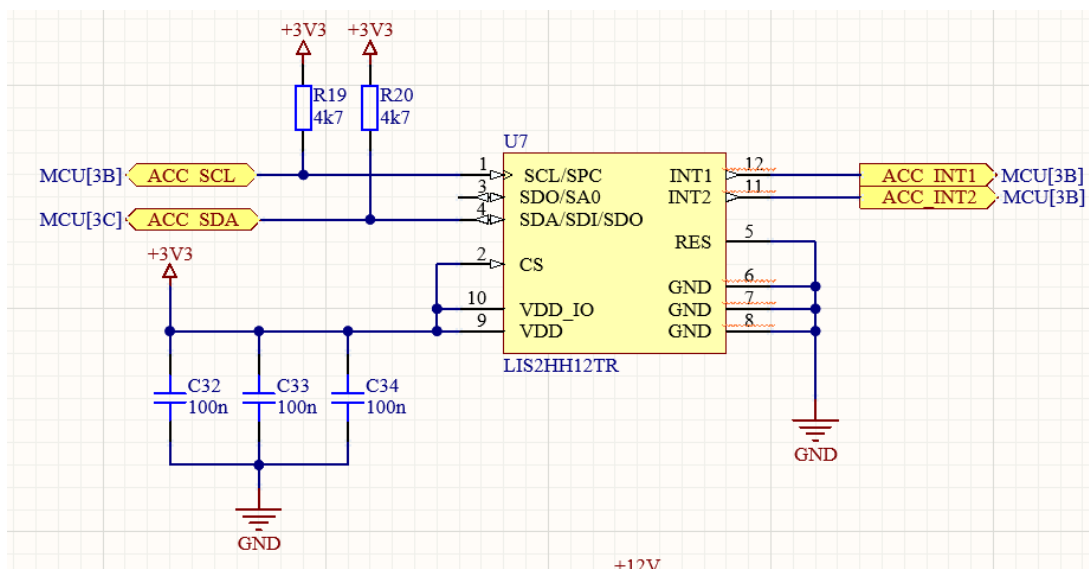
3.2.3. Gyorsulásérzékelő

Annak érdekében, hogy az eszköz esetleges megbontását, rongálását vagy a tartószerkezet felborulását érzékelni lehessen, a panelen lévő szenzorok köre egy gyorsulásérzékelővel bővült. A feladatra az STMicroelectronics LIS2HH12TR típusú háromtengelyes, alacsony fogyasztású szenzorát [22] választottam ki.



3.2. ábra. LIS2HH12TR

Az érzékelő egy I²C interfész és két megszakítás-adatvonal segítségével kommunikál a mikrokontrollerrel. Az lehető legalacsonyabb fogyasztás elérése érdekében az I²C interfészen keresztül csak az eszköz konfigurációja történik, a szenzor megszakítás generálásával jelzi a gyorsulás-határérték túllépését. Ezzel a megoldással sem a szenzor, sem a mikrokontroller esetében sem szükséges a folyamatos I²C kommunikáció fenntartása, ezáltal a fogyasztás jelentősen csökkenthető.



3.3. ábra. LIS2HH12TR a kapcsolási rajzon

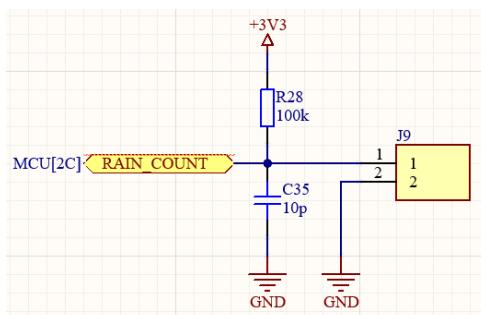
3.2.4. Csapadékmennyiség érzékelő

A csapadékmennyiség érzékelésére egy egyszerű alaphelyzetben nyitott érintkezővel rendelkező szenzort választottam. Az érintkező minden lehullott 0,2794 mm csapadék után egy pillantra záródik, majd az összegyűlt víz kiürülése után újra nyitott állapotba kerül.



3.4. ábra. Csapadékmennyiség érzékelő

A 3.4 ábrán látható megoldással a kontaktus pillanatnyi záródásai impulzusokká alakulnak, amik a mikrokontroller bementére kötve már megszámlálhatók. C35 kondenzátor az érintkező hardveres pergesmentesítésére szolgál.



3.5. ábra. Csapadékmennyiség érzékelő a kapcsolási rajzon

3.2.5. Talajszenzor

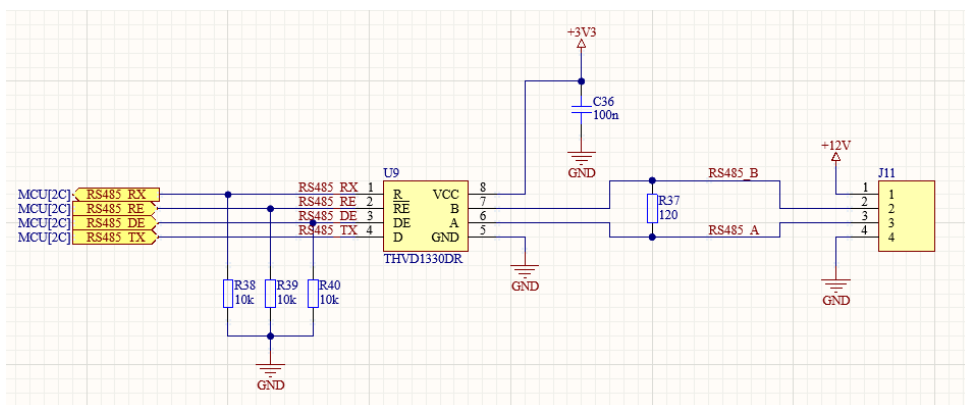
A talajparaméterek mérését egy JXBS-3001-NPK-RS típusú kombinált szenzor [23] végzi, amely a következő paraméterek mérésére képes:

- Talajhőmérséklet
- Talajnedvesség
- Vezetőképesség
- pH
- Nitrogén, foszfor és kálium koncentráció



3.6. ábra. JXBS-3001-NPK-RS Talajszenzor [23]

A szenzor 12 V-os tápfeszültségről működik és RS485 kommunikációt használ. Az adatok továbbítása a Modbus protokoll szerint történik. Az RS485 kommunikáció megvalósításához a szenzoron kívül szükség van egy illesztőáramkörre is, amihez a Texas Instruments THVD1330DR típusú RS485 transcieverét [24] választottam ki. Az áramkör az 3.7 ábrán látható konfigurációban működik, így külön engedélyezhető a küldés és a fogadás is, ezáltal csökkenthető a fogyasztás.

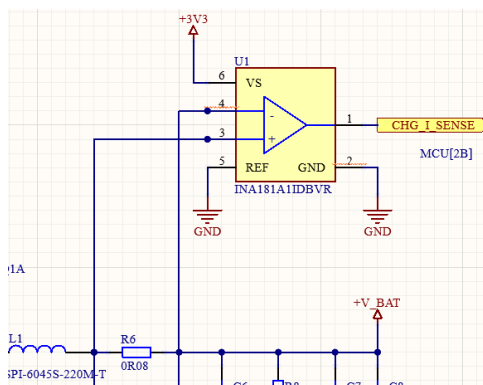


3.7. ábra. THVD1330DR

3.2.6. Töltőáram- és akkumulátorfeszültség-mérés

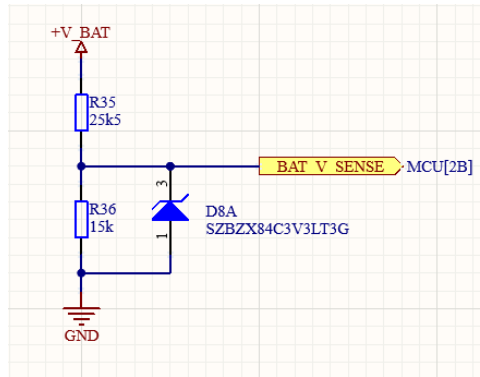
Azt, hogy az akkumulátor töltöttségi szintje meghatározható legyen a legkönnyebben az akkumulátorfeszültség és a töltőáram mérésével lehet megoldani.

A töltőáram mérése egy INA181A1IDBVR típusú áramérzőerősítő segítségével történik, ami az akkumulátortöltő már meglévő söntellenállását használja. Az erősítő kimenetén az árammal arányos 3,3 V-ig terjedő feszültség jelenik meg, ami a mikrokontroller analóg-digitális átalakítójával már mérhető.



3.8. ábra. Árammérés

Az akkumulátor feszültségének mérése pedig egy Zener-diódás túlfeszültség védelemmel ellátott feszültségosztón keresztül történik, ami a 3.9 ábrán látható.



3.9. ábra. Feszültségmérés

3.2.7. Tápegység

3.2.7.1. Méretezés a várható fogyasztásra

A rendszerbe került új szenzorok és a tápfeszültség lekapcsolás hardveres megoldása miatt szükség volt felülvizsgálni a fogyasztásra vonatkozó számításokat.

Változott a szélesebb és szélirány érzékelők fogyasztása, új fogyasztóként pedig beke-
rültek a gyorsulás-, csapadékmennyiség- és talajszenzorok.

Szélesebb és szélirány szenzorok A 3.2.2 fejezetben látható módon a tápfeszültség idő-
szakos lekapcsolásával az átlagos teljesítmény jelentősen lecsökkent.

$$P_{szél} = 75 \text{ mW}$$

LIS2HH12TR A gyorsulásmérő az adatlapban foglaltak alapján 10 Hz-es mintavételezési
frekvencia esetén $50 \mu\text{A}$ áramfelvétellel bír.

$$P_{LIS2HH12TR} = U \cdot I = 3,3 \text{ V} \cdot 50 \mu\text{A} = 165 \mu\text{W}$$

Csapadékmennyiség szenzor Ezen szenzor esetében az érintkező nyitott állapotában nem
kell fogyasztással számolni. A legrosszabb esetnek tekinthető folyamatosan zárt állapotban a
következésképpen alakul a teljesítmény.

$$P_{csapadék} = \frac{U^2}{R_{28}} = \frac{3,3 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega} = 108,9 \mu\text{W}$$

Talajszenzor Az RS485 interfész maximális fogyasztása az adatlap alapján 2 mA, ha a küldés
és fogadás is engedélyezve van, 1,5 mA csak fogadás esetén és $5 \mu\text{A}$ standby állapotban. Az

adatkérés egy 8 bites keret elküldésével történik, ami az alapértelmezett 9600 bit/s esetén közel 1 ms-ig tart. Ha legrosszabb esetként azt feltételezzük, hogy a szenzor 1 s alatt válaszol, az RS485 interfész fogyasztása a következőképpen alakul.

$$P_{RS485} = 3,3 \text{ V} \cdot \frac{1 \text{ ms} \cdot 2 \text{ mA} + 1 \text{ s} \cdot 1 \text{ mA} + 5 \mu\text{A} \cdot 59 \text{ s}}{60 \text{ s} + 1 \text{ ms}} = 16,23 \mu\text{W}$$

A szenzor fogyasztása a gyártó által megadott érték szerint maximálisan 0,5 W lehet. A tápfeszültség lekapcsolást itt is alkalmazva azt átlagos teljesítmény a következőképpen alakul.

$$P_{talaj} = 0,5 \text{ W} \cdot \frac{1 \text{ s}}{59 \text{ s}} = 8,48 \text{ mW}$$

Eszköz	Átlagos teljesítmény
STM32F103 mikrokontroller	19,86 mW
BMP390 légnyomás szenzor	10,56 μ W
RN2483 LoRaWAN modul	1,29 mW
AM2301 hőmérséklet és páratartalom szenzor	1,98 mW
LIS2HH12TR gyorsulásmérő	165 μ W
Csapadékmennyiség szenzor	108,9 μ W
RS485 interfész	16,23 μ W
Talajszenzor	8,48 mW
Szélesség és székirány szenzorok	75 mW
Összeg	106,91 mW

3.1. táblázat. A kiválasztott eszközök várható átlagos teljesítményszükséglete (második verzió)

A 3.1 táblázatból látható, hogy az előző változathoz képest egy nagyságrenddel kisebb fogyasztással lehet számolni, így érdemes újra megvizsgálni, hogy milyen lehetőségek vannak a tápellátás biztosítására.

3.2.7.2. Napelem

A fogyasztás jelentős csökkentésével lehetőség nyílt egy az eddiginél kisebb teljesítményű napelem használatára. Az előző 20 W maximális teljesítményű napelem helyett a második verzió egy 5,2 W-os 12 V névleges feszültségű típust használ.

3.2.7.3. Akkumulátor

A második verzió tervezésénél igyekeztem nagyobb hangsúlyt fektetni az kisebb méretre és az alacsonyabb tömegre, ezért az eddig használt savas ólomakkumulátorról lítiumion-akkumulátorra váltottam. Ezzel a megoldással 2 darab sorba kötött 3300 mAh kapacitású 3,7 V névleges feszültségű 18650 tokozású akkumulátorcella képes ellátni az eszköz energiaszükségletét.



3.10. ábra. Panasonic NCR18650B [25]

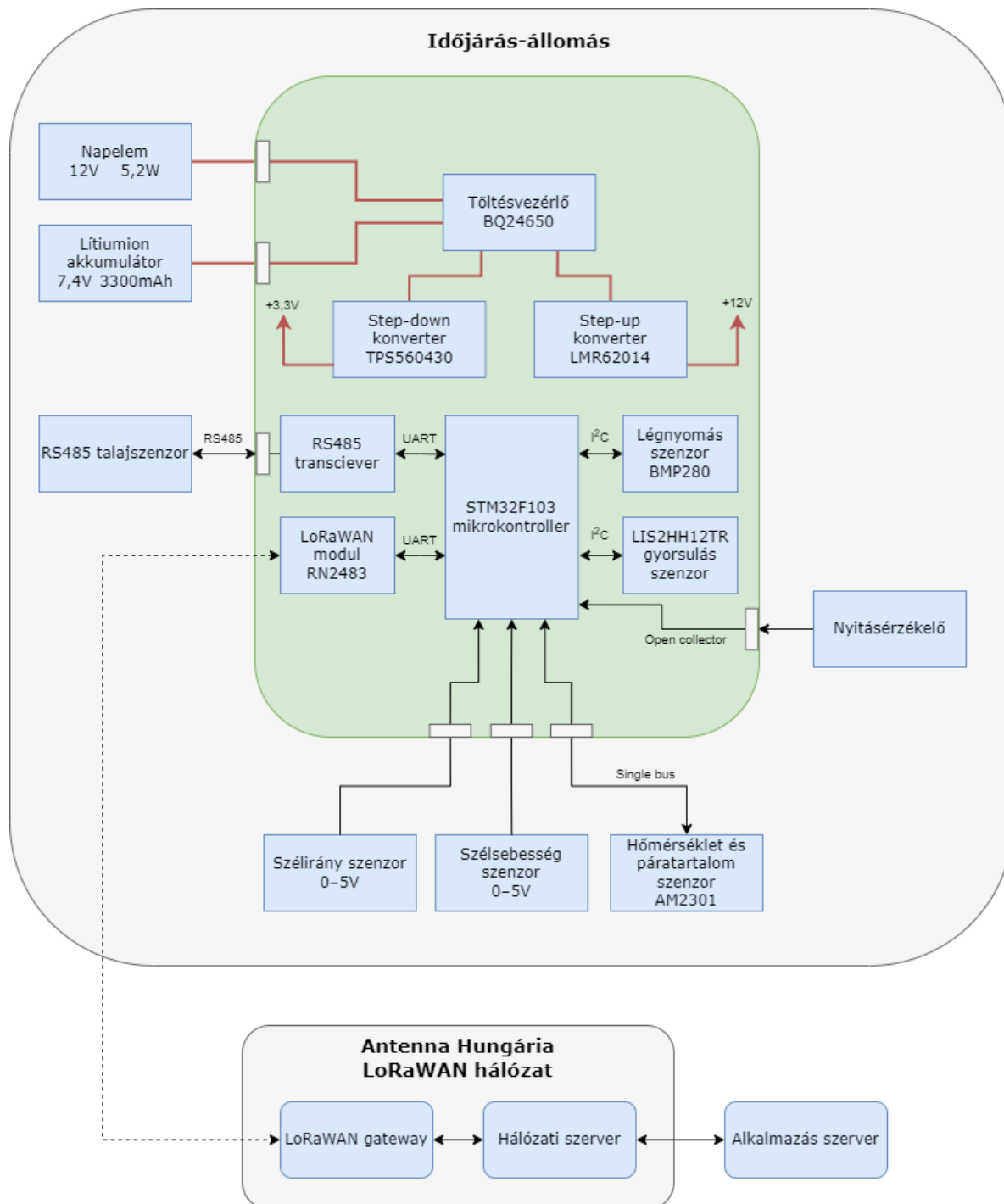
A kiválasztott Panasonic NCR18650B típusú cella saját beépített túltöltés, mélykisütés és túláram elleni védelemmel rendelkezik, ami kiegészíti a töltőáramkör védelmeit. Az elméleti üzemidő a következőképpen alakul:

$$t = \frac{3300 \text{ mAh} \cdot 3,7 \text{ V} \cdot 2}{106,91 \text{ mW}} = \frac{24,42 \text{ Wh}}{106,91 \text{ mW}} = 229,4 \text{ h} \approx 9,5 \text{ nap}$$

Ez az üzemidő még az akkumulátor öregedése és az alacsony környezeti hőmérséklet okozta kapacitáscsökkenés esetén is bőven elegendő a napsugárzás nélküli időszakok áthidalására.

A lítiumion technológia hátránya azonban, hogy a működési hőmérséklet-tartomány alsó hányadában 0°C alatt, a töltés nem indítható el. Ennek kiküszöbölésére az akkumulátort egy 2 W teljesítményű fűtőfóliával borítottam be, ami alacsony környezeti hőmérséklet esetén segíti a töltés megindítását. A fűtést a mikrokontroller vezérli a készülékház belső hőmérséklete alapján egy MOSFET-es kapcsolón keresztül.

3.2.8. Fizikai rendszerterv

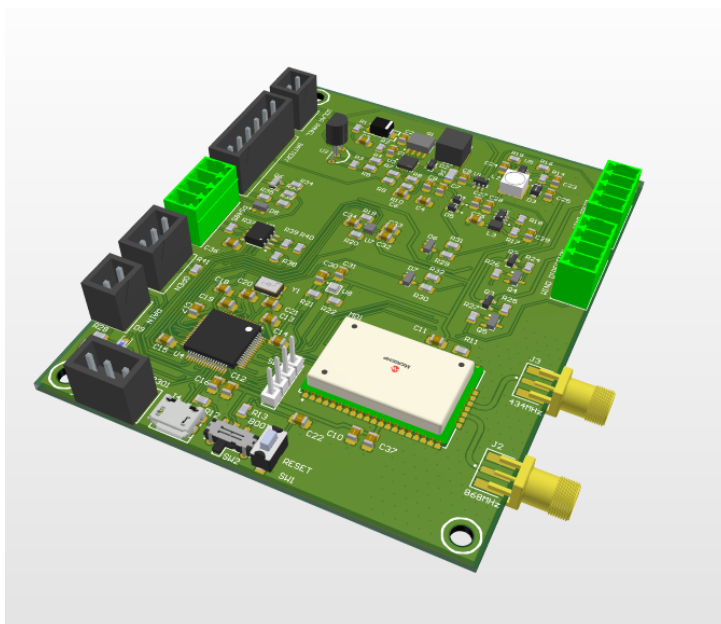


3.11. ábra. Fizikai rendszerterv

3.2.9. Nyomtatott áramkör

Az első verziónál használt mikrokontrolleres fejlesztőpanlere felépített megoldás az első prototípus megvalósításához megfelelt, de megmutatkoztak a hátrányai is. A három panel hosszú tűkesorokkal történő összeillesztése nehézkes, a csatlakozók nagyobb része a mechanikai rögzítésen kívül nem lát el más feladatot, de sok helyet foglal el a panelen. Az Nucleo-64 fejlesztőpanel rögzítőfuratainak elhelyezése sem ideális, ezért a kiegészítő paneleket a szereléshez le kell bontani.

Ezen okok miatt a második verzióhoz már egyetlen NYÁK készült, ami a külső szenzorokon és az akkumulátoron kívül minden szükséges egységet tartalmaz.



3.12. ábra. A második verzióhoz tervezett nyomtatott áramkör

A napelem, az akkumulátor és a külső szenzorok is bontható sorkapcsokkal csatlakoznak a panelhez, ami könnyebb szerelést tesz lehetővé az eddigi csavaros rögzítéshez képest. A SWD¹ programozó interfész egy négyérintkezős tűkesoron keresztül érhető el, ami közvetlenül a mikrokontroller mellett található. Az előző verziónál használt antenna és LoRa modul közötti vezetősávok jól működtek, a hatótávolság megegyezett a gyári kivitelű NYÁK-kal, így ezt az új verzióba is átemeltem.

¹Serial Wire Debug

4. ÖSSZEFOGLALÓ

Dolgozatom célja az volt, hogy megtervezzek és megvalósítsak egy LoRaWAN kommunikációt használó mezőgazdasági időjárás-állomást, amely önműködően, hálózati tápellátás nélkül szolgáltat időjárási adatokat a felhasználó számára.

Bemutattam az eszközzel szemben támasztott követelményeket és kialakításának logikai felépítését. Ismertettem a felhasznált alkatrészek kiválasztásának lépéseit és a napelemes tápellátó rendszer méretezését a várható fogyasztásra. Az elkészült kapcsoláshoz NYÁK-ot terveztem és gyártattam és elkészítettem a specifikációnak megfelelő készülékházat és a szenzorok tartószerkezetét. Az elkészült prototípus a vártaknak megfelelően működött, teljesítette a specifikációban foglaltakat, azonban több lehetőség is felmerült az eszköz továbbfejlesztésére, így új verzió tervezésébe kezdtem.

A második verzióhoz az első prototípusnál használt bővítőpaneles felépítést elvetve egyetlen nyomtatott áramkört terveztem, ami az összes szükséges részegységet tartalmazza, így egy sokkal letisztultabb felépítésű eszközt sikerült létrehozni. Megszűnt a fejlesztőpanel méreteiből eredő kötöttség, így egy kisebb műszerdobozt igénylő, alacsonyabb panelt lehetett tervezni, valamint elkerülhetővé váltak a tűksorok csatlakozásából eredő hibák is. Fontos fejlesztés volt még a talaj különböző paramétereinek mérése, ami a hasznos információkkal szolgál a mezőgazdasági munkák tervezéséhez. Az első változat esetében a legnagyobb problémát a szélsébség és szélirány szenzorok magas fogyasztása jelentette, amit az új verzióban a szenzorok tápfeszültségének lekapcsolásával sikerült jelentősen csökkenteni, így lehetőség nyílt egy kisebb teljesítményű napalem és kisebb kapacitású akkumulátor használatára. Ezek mellett további funkciókkal is bővült az eszköz: a tartószerkezet megrongálódása, felborulása érzékelhető a beépített gyorsulásmérő segítségével és lehetőség van az aktuális töltőáram és akkumulátorfeszültség távoli monitorozására is. A két változat főbb tulajdonságai az alábbi összehasonlító táblázatban láthatóak (4.1 táblázat).

Tulajdonság	Első verzió	Második verzió
Átlagos felvett teljesítmény	1,52 W	107 mW
Akkumulátor technológia	savas ólomakkumulátor	lítiumion-akkumulátor
Akkumulátor kapacitás	84 Wh	24,42 Wh
Akkumulátor tömege	2100 g	90 g
Napelem nélküli üzemidő	2 nap	9,5 nap
Nyomtatott áramkör méretei	70 mm × 82,5 mm × 44 mm	80 mm × 100 mm × 10,8 mm
Mért jellemzők száma	5	12

4.1. táblázat. A két hardververzió összehasonlítása

ÁBRAJEGYZÉK

2.1. LoRa és LoRaWAN az OSI modellben [1]	5
2.2. Az Antenna Hungária LoRaWAN hálózatának jelenlegi lefedettsége (2024.04.06.) [2]	7
2.3. Logikai rendszerterv	8
2.4. STM32 NUCLEO-F103RB	9
2.5. AM2301 hőmérséklet és páratartalom szenzor [3]	10
2.6. AM2301 bekötése [3]	10
2.7. AM2301 a felhúzó ellenállással	11
2.8. A szenzor által használt "single bus" kommunikációs protokoll [3]	11
2.9. A single bus protokoll adatbitjei [3]	11
2.10. BMP390 légnyomás szenzor [5]	12
2.11. BMP390 légnyomás szenzor bekötése (részlet a kapcsolási rajzból)	13
2.12. Szélsebesség és szélirány szenzorok	13
2.13. Az AD átalakítót meghajtó maximális ellenállás meghatározásához használt modell [6]	14
2.14. T_S lehetséges értékei [6]	15
2.15. Szélsebesség és szélirány szenzorok feszültségosztói	16
2.16. RN2483 LoRaWAN modul [7]	16
2.17. RN2483 LoRaWAN modul belső felépítése [7]	17
2.18. Panasonic lítiumion-cella töltési és kisütési hőmérséklet határértékei [10] . . .	19
2.19. Samsung lítiumion-cella töltési és kisütési hőmérséklet határértékei [9]	19
2.20. LG lítiumion-cella töltési és kisütési hőmérséklet határértékei [8]	20
2.21. ETZ lítium-vasfoszfát akkumulátor töltési és kisütési hőmérséklet határértékei [11]	20
2.22. LEADYO lítium-vasfoszfát akkumulátor töltési és kisütési hőmérséklet határ- értékei [12]	20
2.23. EMOS SLA akkumulátor hőmérséklet-kapacitás táblázata [13]	20
2.24. Ultracell SLA akkumulátor hőmérséklet-kapacitás táblázata [14]	21
2.25. EMOS E1270 12V/7Ah [13]	22
2.26. A kiválasztott napelem	22

2.27. Napelem U-I karakterisztikája	23
2.28. SLA akkumulátor töltési görbéje	24
2.29. A BQ24650 által használt MPPT algoritmust szemléltető folyamatábra	25
2.30. NTC ellenállással megvalósított hőmérsékleti kompenzáció	26
2.31. TPS560430	27
2.32. TPS560430 IC-vel megvalósított step-down konverter	27
2.33. A TPS560430 adatlapjában megtalálható táblázatos segítség a méretezéshez [19]	28
2.34. Fizikai rendszerterv	29
2.35. Elkészült NYÁK-ok összeszerelve	30
2.36. Kommunikációs panel	30
2.37. Segédlet az antenna kiveztések megtervezéséhez [7]	31
2.38. Tápegység panel	32
2.39. Műszerdoboz	32
2.40. Akkumulátortartó	33
2.41. Akkumulátortartó beragasztva a helyére	33
2.42. Beépített tömszelencék	34
2.43. Összeszerelt panelek beépítve a helyükre	34
2.44. Alátétlemez a szélesebbesség és szélirány szenzorokhoz	34
2.45. Szélesebbesség szenzor rögzítése	35
2.46. Napelemtartó	35
2.47. A hőmérséklet és páratartalom szenzor árnyékolója	36
2.48. A mikrokontrolleren futó szoftver működése	37
2.49. A mikrokontrolleren futó szoftver moduljai	37
2.50. A NodeRED alkalmazás felépítése	38
2.51. NodeRED dashboard	39
2.52. Az utolsó fogadott csomag paraméterei	39
3.1. Szélesebbesség és szélirány szenzorok kezelése	43
3.2. LIS2HH12TR	44
3.3. LIS2HH12TR a kapcsolási rajzon	44
3.4. Csapadékmennyiség érzékelő	45
3.5. Csapadékmennyiség érzékelő a kapcsolási rajzon	45
3.6. JXBS-3001-NPK-RS Talajszenzor [23]	46

3.7. THVD1330DR	47
3.8. Árammérés	47
3.9. Feszültségmérés	48
3.10. Panasonic NCR18650B [25]	50
3.11. Fizikai rendszerterv	51
3.12. A második verzióhoz tervezett nyomtatott áramkör	52

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] *A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™*, LoRa Alliance, 11 2015, <https://www.tuv.com/content-media-files/master-content/services/products/1555-tuv-rheinland-lora-alliance-certification/tuv-rheinland-lora-alliance-certification-overview-lora-and-lorawan-en.pdf>.
- [2] *AH LoRaWAN hálózat fejlesztőknek*, Antenna Hungária, <https://www.ahrt.hu/hu/fejlesztoknek>.
- [3] *AM2301 Product Manual*, ASAIR, <https://www.haoyuelectronics.com/Attachment/AM2301/AM2301.pdf>.
- [4] M. Krisztián, „Az árnyékolók hatása a léghőmérséklet-mérések és a hosszú távú adatsorok megbízhatóságára,” 2010.
- [5] *BMP390 – Datasheet*, Bosch Sensortec, 3 2021, <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmp390-ds002.pdf>.
- [6] *Medium-density performance line Arm®-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces*, STMicroelectronics, 9 2023, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>.
- [7] *Low-Power Long Range LoRa® Technology Transceiver Module*, Microchip, 2021, <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/RN2483-Low-Power-Long-Range-LoRa-Technology-Transceiver-Module-DS50002346F.pdf>.
- [8] *Rechargeable Lithium Ion Battery*, LG, INR18650 MJ1 3500mAh, 8 2014, <https://www.nkon.nl/sk/k/Specification%20INR18650MJ1%2022.08.2014.pdf>.
- [9] *Lithium-ion rechargeable cell for power tools*, Samsung, INR21700-40T, 12 2017, <https://dnkpower.com/wp-content/uploads/2019/02/SAMSUNG-INR21700-40T-Datasheet.pdf>.
- [10] *Rechargeable Lithium Ion Battery*, Panasonic, NCR18500A, 2022, <https://www.dnkpower.com/wp-content/uploads/2022/09/Panasonic-NCR18500A-Data-Sheets.pdf>.

- [11] *ETZ Series Lithium Batteries*, ETZ, ETZ5G, 2022, https://earthxbatteries.com/wp-content/uploads/2022/04/ETX_Manual_111017_AC.pdf.
- [12] *Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) Battery for Cold Weather*, Leadyo, 2022, <https://www.nettbutikk.solcellespesialisten.no/media/multicase/documents/12v200ah%20lfp%20lifepo4%20battery%20for%20cold%20weather%20.pdf>.
- [13] *OT7-12*, EMOS, https://www.emos.hu/file/915293/1201004300_61-b9691.pdf.
- [14] *UL 7 - 12*, Ultracell, 2008, <http://zselesakkumulator.shoprenter.hu/custom/zselesakkumulator/image/data/leirasok/Ultracell-12V-7Ah.pdf>.
- [15] *Using the bq24650 to Charge a Sealed, Lead-Acid Battery*, Texas Instruments, 2011, application Report SLVA437A.
- [16] J. Ma, K. Man, T. Ting, H. Lee, T. Jeong, J.-K. Sean, S.-U. Guan, and P. W. H. Wong, „Insight of direct search methods and module-integrated algorithms for maximum power point tracking (mppt) of stand-alone photovoltaic systems,” vol. 7513, 09 2012, pp. 463–471.
- [17] M. A. Fatullah, A. Rahardjo, and F. Husnayain, „Analysis of discharge rate and ambient temperature effects on lead acid battery capacity,” in *2019 IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD)*, 2019, pp. 1–5.
- [18] D. Berndt, R. Brautigam, and U. Teutsch, „Temperature compensation of float voltage- the special situation of vrla batteries,” in *Proceedings of INTELEC 95. 17th International Telecommunications Energy Conference*, 1995, pp. 1–12.
- [19] *TPS560430 SIMPLE SWITCHER® 4-V to 36-V, 600-mA Synchronous Step-Down Converter*, Texas Instruments, 2018, https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps560430.pdf?ts=1713268919743&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
- [20] „Degrees of protection provided by enclosures (ip code),” International Electrotechnical Commission, Geneva, CH, Standard IEC 60529, 2001.
- [21] *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observations*, World Meteorological Organization, 2008.

- [22] *MEMS digital output motion sensor: ultra-low-power high-performance 3-axis pico accelerometer*, STMicroelectronics, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lis2hh12.pdf>.
- [23] *JXBS-3001-NPK-RS Soil NPK Sensor User Manual*, JXCT, https://www.hestore.hu/prod_getfile.php?id=17219.
- [24] *THVD1330 32-Mbps 3.3-V RS485 Transceiver with IEC ESD Protection*, Texas Instruments, https://www.ti.com/lit/ds/symlink/thvd1330.pdf?ts=1730869311261&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
- [25] *Lithium ion Rechargeable battery Cell Type NCR18650B*, Panasonic, 2018, <https://www.tme.eu/Document/3e0170a1e089819f286f7066e69035b4/NCR18650B.pdf>.