

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki és  
Informatikai Kar**

# **Magaslégköri ballon fejlesztése földmegfigyelési feladatokra**

**Szerzők:**

**Kertész Domokos**

*Balassi Bálint Nyolcévfolyamos*

*Gimnázium*

12. évfolyam

**Molnár Levente**

*Balassi Bálint Nyolcévfolyamos*

*Gimnázium*

12. évfolyam

**Konzulens:**

**Dr. Szabó Sándor**

*adjunktus*

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Híradástechnikai Tanszék

# Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
Absztrakt.....	3
Abstract .....	4
Bevezetés.....	5
Irodalomkutatás .....	6
Loon projekt .....	6
Szakirodalom .....	9
Saját fejlesztés bemutatása .....	11
Elektronika nélküli egységek felépítése.....	11
Elektronika.....	13
Kommunikáció.....	16
Szoftverek .....	18
Repülés .....	20
Képelemzés.....	25
Fejlesztés lépései .....	27
További tervek .....	29
Összefoglalás .....	30
Köszönetnyilvánítás .....	31
Irodalomjegyzék, források .....	31

## Absztrakt

A dolgozat saját magaslégköri ballon fejlesztéséről, az azzal elért eredményekről és hasonló projektek elemzéséről, valamint ezen megoldások saját rendszerbe történő integrálásáról szól.

Terveim szerint az Agroloon egy olyan szolgáltatáscsomag lesz, mely magaslégkörből végzett optikai megfigyelések segítségével mezőgazdálkodóknak segít előrejelzésekkel és precíziós adatokkal. A projekt üzleti validációját folyamatosan végezzük. A rendszer képes képeket készíteni a magasból, majd azokat a rádiófrekvenciás kommunikációval a felszínre küldeni és ott képelemző algoritmusok segítségével elemezni. A jelenleg is kész eszköz még csupán alacsony felbontású képeket képes készíteni, azokat a felszínre továbbítani és elemezni. Maga a ballon egyszerűhasználatos eszköz, mely a 30 km-es magasságba emelkedés után megsemmisül, a hasznos teher pedig ejtőernyővel ereszkedik a földre, így az újra felhasználható. A rendszer kb. 50 km-es hatótávolságú, 868 MHz-es frekvencián kommunikál a földi egységgel. Fejlesztés közben az antennák karakterisztikai elemzését, és a kommunikációs rendszerek vizsgálatát is el kellett végezni, mivel az egyszerű LoRa rendszerek nem tették lehetővé a biztonságos kapcsolatot nagy távolságok esetén. A fedélzeti, és földi szoftverek mind saját fejlesztésűek, ezzel biztosítva a teljesen testreszabható működést. Korlátozott anyagi lehetőségeim miatt az optikai rendszerek tekintetében jelenleg még nem képes az eszköz infravörös tartományban is érzékelni, azonban a képelemző szoftverek képesek a GRVI index segítségével multispektrális kép nélkül is hasonló eredményeket elérni.

Az első két repülés kommunikációs problémák és az időjárási tényezők miatt sikertelen volt, azonban természetesen nem haszontalanok. Az itt gyűjtött tapasztalatok alapján egyszer teljes sikerrel emelkedhetett föl a ballon adatot gyűjteni. Rengeteg elemezhető kép készült, melyekhez referenciaként az adott időszakban készített műholdas megfigyelések használhatók.



## Abstract

In this paper we describe the development of a high-altitude balloon, the results achieved, and similar projects design and analyses and the integration potential of the project.

Agrolooon is a suite of services that helps farmers to improve their productivity with precision data and prediction. We are also working on the business model validation. These are based on optical monitoring of the fields from high-altitude balloons, which are floating at about 30 km high. This system is capable of capturing pictures from above and sending them back to the ground station. Moreover, it can analyze the images with algorithms. The device that has been completed recently still produces low-resolution image, but it is sufficient for the tests of the programs. The balloon is now single-use because it bursts after reaching the maximum altitude typically around 30 km. However, the payload can be recovered using a parachute making it reusable. The system uses a radio communication system operating at 868 MHz, and it has a range of around 50 km. During development, the antenna characteristics had to be tested, and other communication technologies had to be evaluated because basic LoRa technology did not provide sufficient range reliable. The onboard and ground software was developed by us to ensure both security and customization. Now the system uses low-resolution cameras without infrared detection due to limited financial resources, but in the future, we will use the highest resolution multispectral cameras available. The image processing algorithms work without infrared, utilizing GRVI index. With this method, we compare the results with satellite images, to enhance the software ability.

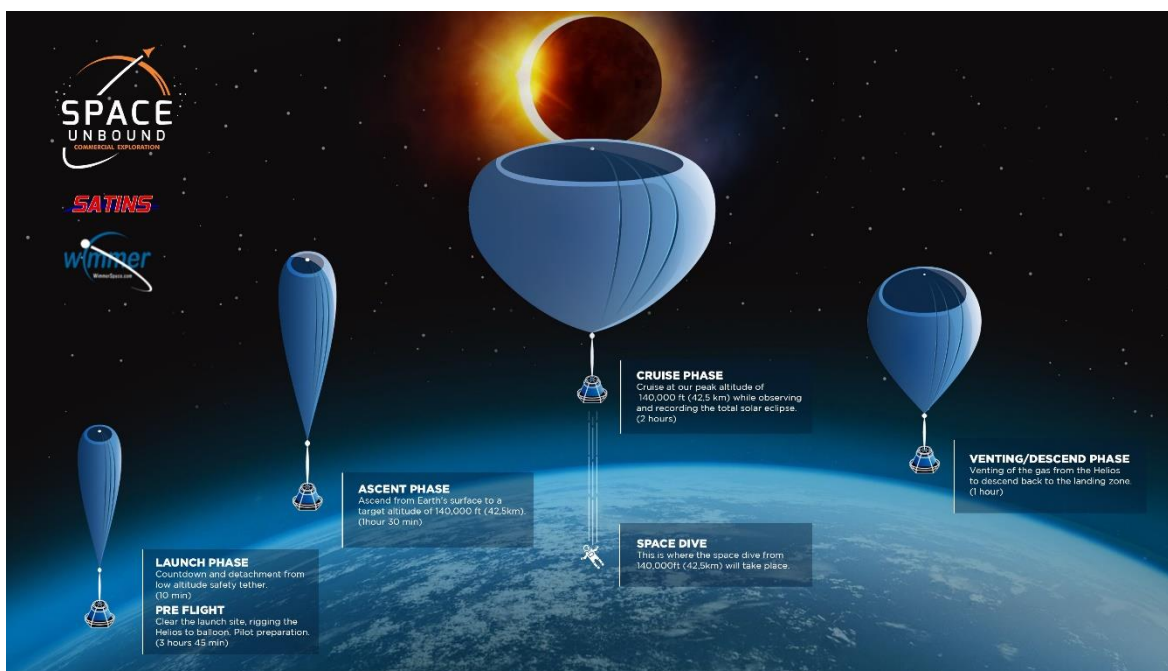
Our first two flights failed due to weather conditions and communication errors, but we learned a lot from these mistakes. Based on these experiences, the system completed a flight with total success. Of course, we are continuing development diligently to create a success and usable system.



## Bevezetés

A projektünk célja egy magaslégköri ballon fejlesztése, mivel hiszünk abban, hogy az élelmiszer olyan kincs, melynek előállítása a lehető leghatékonyabb kell, hogy legyen. Ennek érdekében Agroloon nevű projektünkkel valódi problémákra kívánunk megoldásokat nyújtani, így a fejlesztés során különböző igényekkel találkozunk. Pontos és hatékony előrejelzésekkel fogjuk segíteni a szántóföldi növénytermelés hatékonyságának növelését, a költségek és erőforrások optimális elosztását. Az igényfelmérések és a piac monitorozása mellett a munka folyamatosan zajlik, mivel az alap műszaki követelmények nem változnak.

A magaslégköri ballonok olyan, a sztratoszféra magasságáig emelkedő, felhajtó gázzal töltött „lufik”, melyek általában a légsűrűség csökkenése miatt kb. 30 km-es magasságban kidurrannak – ezek egyszerhasználatosak. Ezt a típust jellemzően meteorológiai mérésekre használják, azonban léteznek a magaslégkör kutatásán huzamosabb ideig dolgozó eszközök, melyek képesek akár hónapokig is a magasban lebegni. Számos projektben használják tudománynépszerűsítő célokra, valamint tudományos kísérletek sztratoszférában történő végrehajtására. [1] A ballonok minden esetben a légáramlatokra vannak bízva, azonban már sikerült egy hely felett lebegtetni eszközöket más projektek keretein belül. [2] Az egyszerhasználatos eszközök lebomlóak, így a nap UV sugárzása hamar károsítja őket. A hosszantartó lebegéshez szükséges ballonok anyaga különleges, ennek megfelelően nehezen beszerezhetőek és drágák. Az általam elvégzett kísérleteknél az egyszerhasználatos eszközöket használtam, de jövőben a hosszabb ideig lebegő szondákat fogunk használni.



1. ábra – Magaslégköri ballon repülési folyamata

Dolgozatomban ennek a munkának a folyamatát, általában a magaslégköri ballonokkal kapcsolatos kutatásokat, és a mezőgazdasági elemzésekhez használható szoftverek fejlesztését írom le.

## Irodalomkutatás

Az igényfelmérés és tervezés korai szakaszában szembesültünk azzal a helyzettel, hogy a kutatott terület igen sokrétű. A ballonok a katonai felhasználás miatt időnként reflektorfénybe kerülnek a fősodró médiában, azonban a haditechnikával kapcsolatos titkok miatt ezeknek a technológiai háttéréről szóló leírások nem publikusak, így kutatásainkban ezek eredményeit nem tudjuk felhasználni. [3]

A magaslégköri ballonokat elsősorban a sztratoszféra és az időjárás kutatására használják. A kutatásokban élen járnak az űrügynökségek, mivel a kísérleteket töredékáron tudják az űr közelébe juttatni – ez természetesen úgy is hasznos, hogy a Kármán-vonalat meg sem közelítik a szondák. A világ nagyobb és kisebb űrügynökségeinek egyaránt van anyagi lehetősége ezen eszközöket finanszírozni, így a technológia népszerű a kis költségvetésű, általában egyetemi projektek esetében. Sok kísérlet megvalósulása köszönhető a konstrukcióknak. [4]

A továbbiakban ismertetem azokat a publikus projekteket és szakirodalmat, melyek a projektem szempontjából értékes adatokkal szolgálnak.

## Loon projekt

A Loon [5] projekt a magaslégkörből szórt mobilinternetet az elmaradottabb régiók felett, a kutatást a Google anyavállalata finanszírozta. 2013-tól 2021-ig tartó működésük során sikerült igen jó eredményeket elérniük az egy pont fölött lebegő ballonokkal, az ezekkel kapcsolatos kutatásokat pedig nyilvánosságra hozták a cég bezárása után. A projekt lezárásának okait nem jelölték meg, mindenesetre technológiai akadályokról nem hallhattunk,



2. ábra- Egy Loon ballon indítása

a pénzügyi információkat pedig nem hozták nyilvánosságra. Személyes véleményem szerint a szolgáltatás értékét jelentősen csökkentette a globális internetet szolgáltató műholdflották,

kiemelten a Starlink 2019-ben történt indulása, mely ráadásul azokon az egyenlítőhöz közeli területeken vált először elérhetővé, ahol a Loon is operált. A ballonokról ráadásul csupán 10-30 Mbps (3G) kommunikációs sávszélesség volt elérhető, [6] a Starlink pedig a kezdeti szolgáltatásában 100 Mbps-ot kínál. A projektem szempontjából tanulságos ez a sikertelenség is, azonban nem a távközlés területén szeretnénk alkalmazni a ballonokat, a képalkotás területén pedig a felszínhez közelebbi elhelyezkedés miatt mindig jobb képeket fog készíteni egy ballon, mint egy műhold – azonos optikával felszerelve. [7] [8]

A Loon számomra legfontosabb eredménye a flottakezelő rendszere (FMS), mely képes volt az eszközöket már a levegőben lebegés közben a világ bármelyik pontja fölé vezetni. [2] Ezen pont fölött ráadásul passzív módon, meghajtást alig használva képes volt hosszabb ideig lebegni. A



4. ábra – Loon ballonok Peru Bolívia és Brazília felett

ballonok elsősorban a különböző magasságokban más irányba fújó szeleket használják a mozgásra, [9] és a lebegést is a magasság változtatásával érik el. Ez a rendszer három szintre épül: a helyi szelekre fókuszáló rendszerek, a hosszútávú navigációs rendszer, illetve a



3. ábra – A Loon propellere

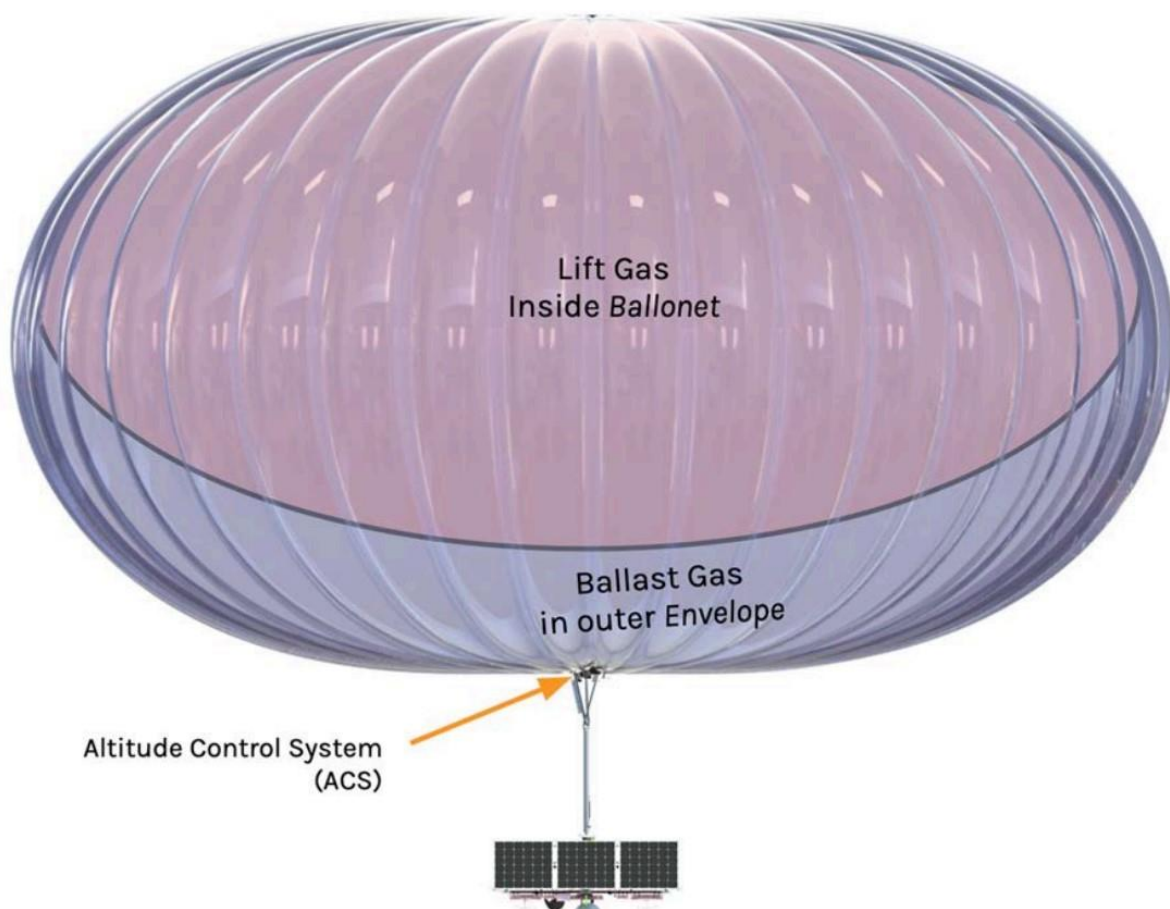
flottakezelő. Számomra a legfontosabb a helyi irányítás (Steering Controller) mivel ez a rendszer tartja pontosan a cél fölött a ballonokat. Bemeneti adatként a ballon telemetriáját és a helyi szél adatait kapja, melyeknek természetesen nagy a bizonytalansága. Ezt úgy próbálja kiküszöbölni az automata rendszer, hogy egy-egy ballon segítségével feltérképezi a szélviszonyokat, ezzel pontosítva a meteorológiai adatokat. Fontos, hogy a ballonok idő és energiaigényes folyamatnak köszönhetően változtathatnak magasságot, így a mozgás minimalizálása is cél. A rendszer azonban így is sodródik, még ha tervezett módon is, ezért az eszközöket a projektben propellerrel is felszerelték. A tehetetlenség természetesen



problémát okozhat szélsőséges időjárási körülmények esetén, illetve tiltott repülési zónák esetén, azonban a Loon sikeresen elkerülte ezeket a szituációkat. [10]

A magasság szabályozását ballasztgázzal, vagyis a ballonba eresztett levegővel valósították meg, felhajtógáznak pedig héliumot használtak, melyről később hidrogénre tértek át. A légköri levegő nagyobb sűrűsége és a külső burok rugalmatlansága miatt a teljes eszköz tömege könnyen megnövelhető, amely süllyedést idéz elő. Ennek a megoldásnak számos előnye van, mivel így például a felhajtó gáz szivárgása drasztikusan lecsökkenthető ugyanis két azonos nyomású réteg között kevesebb a szivárgás, mintha a magaslégkör alacsony légnyomásától csak egy vékony anyag választaná el a nagyobb nyomású felhajtógázt. A ballasztgáz pótlása a legkevésbé sem problémás, mivel az a légkörben korlátlanul rendelkezésre áll, így a levegő szökése sem jelent problémát. A külső burok levegőtartalmát egy magasság szabályozó rendszer (ACS) vezérli, ennek a működését is lehet mintának tekinteni a további fejlesztések során.

A Loon által tapasztaltak alapján lehetséges a saját megoldás továbbfejlesztése, mivel a logikai felépítés (forráskód nélkül ugyan) részletes magyarázatokkal elérhető. A Google egyértelmű célja volt, hogy több ezer ballont vezéreljenek egy időben, erre minden bizonnyal



5. ábra – A Loon magasság szabályozó rendszerének működése



sokkal kisebb nagyságrendben lesz szükség ennél a projektnél, ami lényegesen egyszerűsítheti a flottakezelő mechanizmust, mivel az teljes mértékben emberi irányítás alatt működhet.

A másik terület, ahol a Loon modellje fontos példaként szolgálhat, az magának a ballonnak az anyaga. Az anyaggal szemben elvárás, hogy minél vékonyabb legyen, ellenálljon a naptól érkező sugárzásnak, valamint a szélsőséges időjárásnak – elsősorban a hidegnek. A magasság szabályozása miatt szükséges, hogy két rétegű legyen, ez szintén tovább bonyolítja a felépítést és a gyártást. Ez komoly mérnöki kihívás, de vannak kész megoldásokkal rendelkező cégek, illetve a távoli jövőben saját megoldás fejlesztése sem lehetetlen. A Loon saját újításokat is eszközölt az anyaggal kapcsolatban, többek között emiatt tartják a leghosszabb ballonos küldetés rekordját 312 napos hosszúsággal. Ennek legfontosabb összetevőjének az innovatív két rétegű anyagot tartják. A legnagyobb nehézségnek a szivárgást és az időjárási körülményeket jelölték meg. A tömitések fontosságára sok forrás utal, [11] [7] ez a megközelítőleg gömb alakú ballon cikkelyeit hivatott egymáshoz rögzíteni. A Loon-nál használt alapanyagok és a kész eszközök beszerzési forrása nem ismert.

## Szakirodalom

A magaslégköri ballonokat számos esetben használják különböző tematikájú tudományos kutatásokra. A BME intézményi TDK-ján is szerepelt már egy szonda fedélzetére készített asztrobiológiai kísérlet [12], de a magaslégkör kutatásával, meteorológiai kérdésekkel [13] és számos egyéb téma vizsgálatával kapcsolatban is rengeteg publikáció lát napvilágot. Távközlési feladatokra szánt ballonokat számos projektben készítettek, melyek mind az alacsony föld körüli pályán megjelenő műholdflották (Starlink, OneWeb, stb.) előtt működtek. Ezek közül a Loon jutott a legtovább, ahogy az előző fejezetben már ismertettem. Ezek a távközlési technológiára épülő kutatások szemlézése kevésbé releváns a projekt szempontjából.

A témában az egyik legérdekesebb könyv a *Near-Space Remote Sensing: Potential and Challenges*, [11] mely részletesen elemzi a magaslégköri ballonok távérzékeléssel kapcsolatos lehetőségeit és a felmerülő problémákat. A 2011-ben kiadott munkában a kutató elsősorban a hajtóművel rendelkező eszközök használatával foglalkozik, a méretekből és a költségekből pedig adódik, hogy ezeket az eszközöket legtöbbször katonai célokra alkalmazzák. A kutatás a ballonok előnyét a folyamatos terület feletti lebegésben látja, mivel egy alacsony föld körüli pályán keringő műhold, mely egyáltalán összehasonlítható képet készít, a legjobb esetben is körülbelül 10 percig képes egy pontot megfigyelni. Emellett fontosnak tartja, hogy a katonai alkalmazás azért kiemelt, mivel a radarok a kisebb méretű eszközöket képtelenek érzékelni, a

polgári radarok a mai napig nem képesek erre – természetesen a katonai projektekről nem rendelkezem információval.

Wang által a korlátozottan sodródó (Steered Free-Floaters) kategóriába sorolt ballonokról írt elemzése az én tervezett megoldásomba építhető meglátásokat is tartalmaz. Ezek az eszközök jobban navigálhatóak, mint a csupán magasságszabályzó rendszerrel szerelt megoldások. A vitorlášajókhöz hasonló elven működő navigáció a



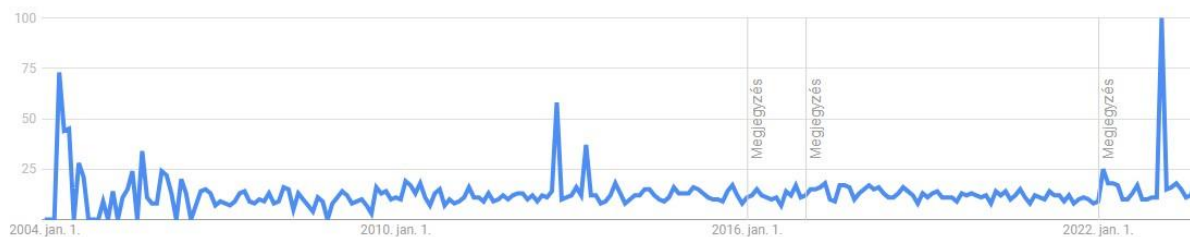
6. ábra – Az USA egyik katonai ballonja

jövőben hangsúlyos helyet kaphat az én terveim között is. A kutató nagyobb hangsúlyt fektetett a nagy tömegű, hajtóművel rendelkező ballonok kutatására, azonban a projekt szempontjából ez nem releváns, mivel túl drága: egyetlen ilyen eszköz árából a teljes eddigi fejlesztést több tízezer alkalommal lehetne finanszírozni. Ezért a gazdaságosság szempontjait is figyelembe véve a nehézsúlyú – nem ritkán még pilótával is rendelkező [3] – eszközök az agrártechnológiai célokra nem alkalmazhatóak. Az ilyen irányú kutatások adatai a projektem szempontjából nem hasznosíthatóak. Az egyéb projekteken ezek a nagyobb méretű ballonok szerintem nagyobb szerepet kapnak, mint azt jelenleg indokoltnak látom. A hajtómű miatt teljeskörű navigációs lehetőségekkel rendelkező eszközök természetesen egy kézenfekvőbb megoldást jelenthetnek, azonban véleményem szerint nem megfelelően gazdaságos, egy-két darab elkészítése is csillagászati összegeket emészt fel, nagy létszámú flottákat pedig gyakorlatilag eddig nem sikerült létrehozni. [14] [15] [16]

Ahogy a Loon projektnél és Wang könyvében is, a *High-Altitude Platforms — Present Situation and Technology Trends* c. cikkben [17] is a legfontosabb kihívásoknak a zord körülményeket, a kommunikációt és az áramellátást jelölték meg a szerzők. Fontosnak tartom kiemelni, hogy a megjelenés 2016-os, így az adatai a legfrissebb projektekkel kapcsolatban elavultak lehetnek, azonban átfogó képet ad az addig elvégzett fejlesztésekről.

Az irodalomkutatás azt mutatja, hogy a magaslégkörből végzett megfigyelésekre mind a mai napig nagy figyelem irányul, annak ellenére, hogy a 2000-es években volt a leginkább felkapott a téma a tudományos világban. [18]

Érdekesség, hogy a Google Trends által szolgáltatott adatok alapján a 2023-as év elején lelőtt kínai ballon, által generált kiemelkedő érdeklődésen kívül az adatok megközelítőleg azonos kíváncsiságot mutatnak az átlag internetfelhasználók között.



7. ábra – A „High-altitude balloons” kifejezésre keresések népszerűsége

## Saját fejlesztés bemutatása

Dolgozatom további fejezeteiben saját munkámat mutatom be. Az általam tervezett és működtetett ballon jelenleg önálló repülésre, adatgyűjtésre és kommunikációra képes. Olvashatnak a rendszer felépítéséről, az egyes részegységek működéséről és a munka fázisairól.

A ballon két fő részre tagolható. Egyrészt a földi vezérlőegységre, másrészt magára a repülő szerkezetre. A vezérlő képes kommunikálni az egységgel, valamint akár vezérlési utasításokat is küldhet a magasba. A szonda egy hidrogén gázzal töltött ballonból, egy ejtőernyőből, a hasznos teherből és az ezeket összekötő kötélből áll.

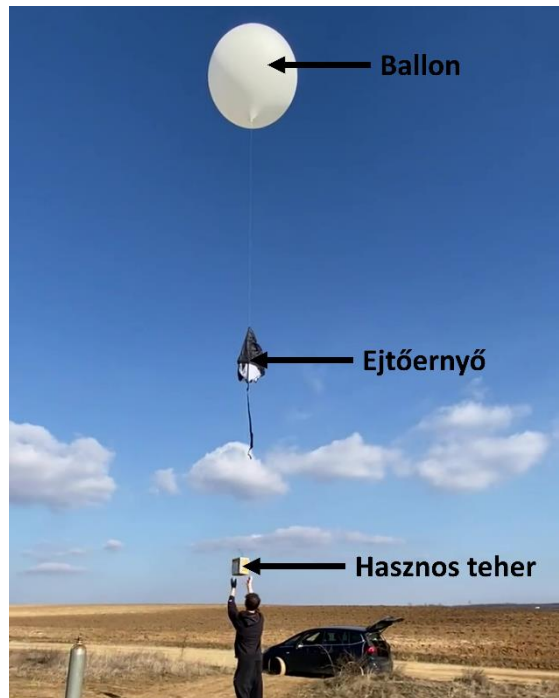
Megnevezés	Paraméter
Hasznos teher mérete	20x25x25 cm
Hasznos teher tömege	1307 g
Hasznos teher falvastagsága	3 cm
Ballon tömege	600 g
Kötél hossza	5 m
Fedélzeti rendszerek feszültsége	max. 5 V
Akkumulátor kapacitása	22500 mAh

8. ábra – A saját rendszer legfrissebb kész verziójának paraméterei

## Elektronika nélküli egységek felépítése

A rendszer egyik kulcsfontosságú része maga a ballon. Anyaga olyan latex, mely a környezetben képes lebomlani. Ez környezetvédelmi szempontból rendkívül fontos, mivel

számos esetben – elsősorban a meteorológiai repülések után – a repülés után nem gyűjtik be a szondákat, így azok a természetben maradnak. Én a repülések után összeszedem a teljes eszközt, egyrészt a rendszer így üzemeltethető gazdaságosan, másrészt kísérleteimmel nem szennyezem a környezetet. A ballonba jelenleg hidrogéngázt töltünk, de kísérleteztem héliummal is. A két gáz képességeiben körülbelül megegyezik, a két gáz közötti árkülönbség azonban a hidrogén javára dönt. Mivel a hidrogén a levegővel majdnem minden arányban robbanóelegyet képez, így különös körültekintést igényel a használata. A ballonokhoz biztonságosan használja a hidrogént a



9. ábra – Az eszköz felépítése

Meteorológiai Szolgálat és számos nemzetközi projekt is. Magunk részére pedig kötelező érvényűnek tekintjük a OMSZ kérésemre közreadott szabályzatát a biztonságos használat érdekében. A ballonba töltött mennyiség kiszámításáról a repülésről szóló fejezetben olvashatnak részletesebben.

A ballon a hasznos terhet emeli a magasba, ez egy szigetelt doboz, melyben az elektronikus eszközök találhatóak. A rakomány egy rögzítő kötéllal kapcsolódik a ballonhoz, melyet az ejtőernyővel egy kötél köti össze, így megfelel a törvényi előírásoknak. [19] [20] Ennek a kötélnak a közepén helyezkedik el egy ejtőernyő, ez lassítja a szabadesést. Ez egy könnyen beszerezhető futóernyő, melynek teherbírását alaposan teszteltem. A tesztelés alatt az ernyőre súlyokat rögzítettem és megvizsgáltam, hogy mennyire képes visszafogni a zuhanást. Amikor a ballon eléri azt a magasságot, ahol a légnyomáskülönbségtől nagyra duzzadt, már nem bírja a feszültséget az anyag, elszakad. A kidurranás után szabadesésbe kezd, ezt a folyamatot lassítja az ejtőernyő. Az eszköz a vastagabb légrétegekben kb. 4 métert



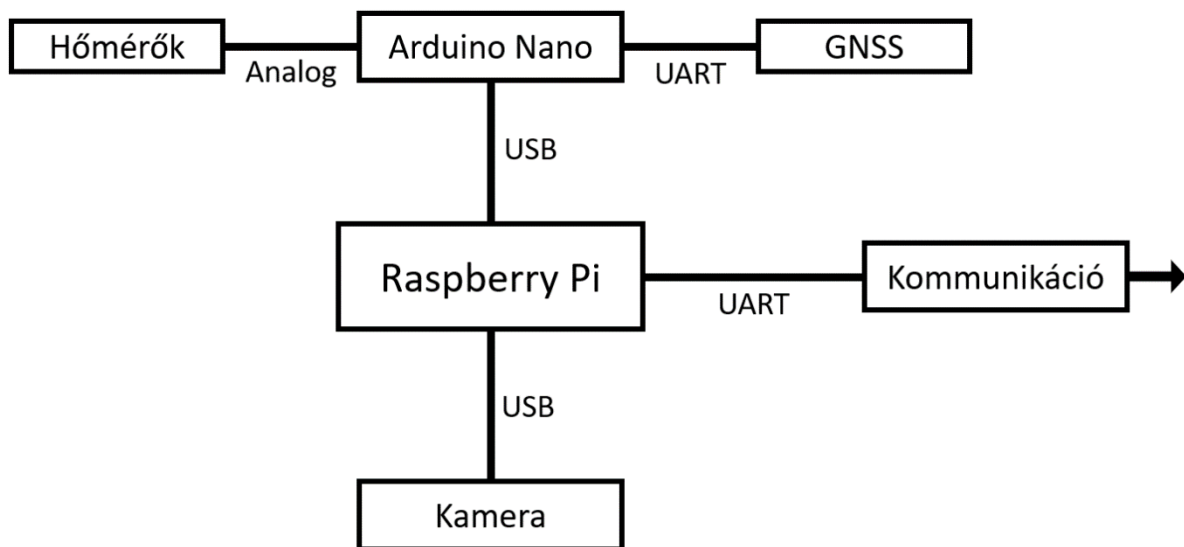
10. ábra – Az ejtőernyő



süllyed másodpercenként. A lassú süllyedés hátránya, hogy az oldalirányba megtett távolság megnő, mivel több időt tölt az eszköz az erősen szeles zónákban. A jövőben az ejtőernyő kinyílási magasságának meghatározása egy fontos lépés lehet a ballonok navigációja szempontjából. Amennyiben a süllyedés adott pillanatában lecsökkenthetjük a sebességet az ejtőernyő nyitásával ott, ahol a szelek már a kívánt irányba sodornák az eszközt, képesek lehetünk befolyásolni a landolási területet – még ha csak csekély mértékben.

## Elektronika

A hasznos teher egy XPS szigetelőanyagból készített doboz, mely az elektromos berendezéseket, elsősorban az akkumulátort védi a magaslégtérben tapasztalható hidegtől.



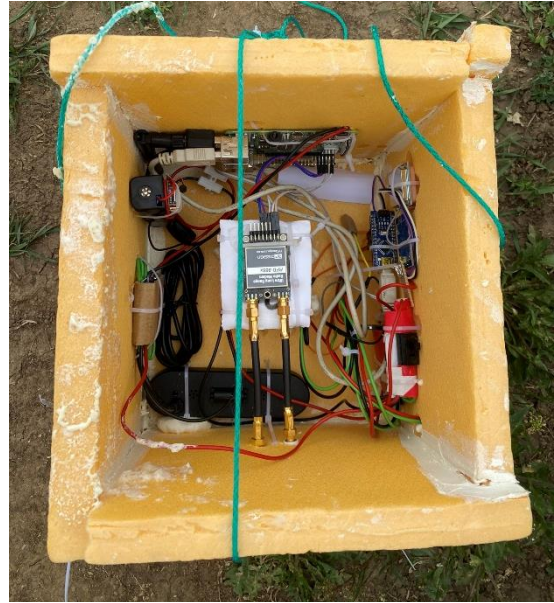
11. ábra – A fedélzeti rendszerek felépítése

A vezérlés központi eleme egy Raspberry Pi számítógép, mely összesíti az adatokat és kommunikációt végez a földi vezérlővel. A számítógéphez USB kapcsolaton keresztül csatlakozik egy Arduino Nano ATmega 328P mikrovezérlő, mely az analóg hőmérők és a GPS adatait gyűjti össze és továbbítja a Raspberry Pi-hez. Az USB kapcsolat a tesztek során nagyon megbízhatatlanul teljesített, ezért a jövőben másik megoldást fogok alkalmazni. A lehetőségek között szerepel a soros aszinkron kommunikáció, illetve integrált áramköri kommunikációs protokollok, így az I2C vagy az SPI. Az Arduino-n csupán az adatok rendezése, és előzetes ellenőrzése történik.



12. ábra – A hasznos teher szigetelődoboz

A hasznos teher egyik legfontosabb eszköze a GNSS helyzetmeghatározó szenzor egy Ublox Neo 6m GY-GPS6MV2 modul, mely a repülés során folyamatosan gyűjti az adatokat a globális helymeghatározó műholdaktól. A magasságot, a hosszúsági és szélességi körök alapján megadott pozíciót és a ballon sebességét is ismeri, és továbbítja az Arduino felé soros kapcsolaton keresztül, egy speciális szöveges formátumban. A szenzor gyenge pontja, hogy az antenna gyenge csatlakozón U.FL-en keresztül csatlakozik a modulhoz, amely sok esetben



*13. ábra – A hasznos teher belső felépítése*

eredményez kontakthibát, mely a rádiótechnikai eszközökben megengedhetetlen. Ezt tetézi a hasznos teherhez való rögzítési módszerem, melyben esetleges nagyobb külső behatás esetén előfordulhat elmozdulás. A közeljövőben a belső felépítés megváltoztatásával, később pedig saját integrált áramköri rendszeren SMA vagy RP-SMA csatlakozóval orvosolnám a problémát.

A külső és a belső hőmérséklet mérésére a legújabb verziókban DS18B20+ analóg szenzorokat használok, melyek a szélsőséges időjárást is gond nélkül viselik. A szenzor  $\pm 2\text{C}^\circ$  hibahatárral operál, azonban az elektronikai eszközök hőmérsékletének felügyeletére és a szigetelés hatékonyságának mérésére megfelelnek. Ezen eszközök is az Arduino Nano-hoz csatlakoznak, itt matematikai egyenletek segítségével lehetséges a hőmérséklet kiszámítása a feszültségből.





*14. ábra – A ballon akkumulátora*

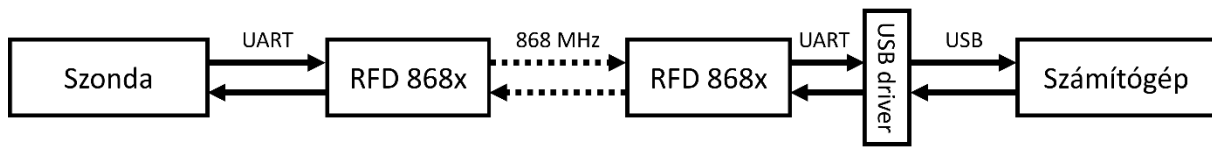
A ballonnak repülés közben önálló áramforrásról kell működnie órákon keresztül, így akkumulátort is szükséges rajta elhelyezni. A ballon legnehezebb része ez, körülbelül 700 g-os tömegével. Panasonic NCR-18650 lítium-ion cellákból, ponthegesztéses módszerrel szereltem össze az egységet, mely így stabil, és a biztonsági áramkörök biztosan nem sérülnek a forrasztás során. Az akku 9 darab 3400 mAh kapacitású, 3,7 V névleges feszültségű cellából áll, így 5V-on körülbelül 22500 mAh kapacitású, az átalakítások veszteségét

is kalkulálva. Ezzel a kapacitással az eszköz körülbelül 13 órán keresztül teljes biztonsággal képes üzemelni, mivel az átlagos áramfogyasztás nem nagyobb mint 1,5 A, és rendkívüli esetekben sem lépi át a 3 A-es csúcspot. Fontos szem előtt tartani, hogy a li-ion akkuk a szélsőséges hőmérsékletre rosszul reagálhatnak, emiatt ezen részt szükséges a legjobban védeni a hidegtől az egységen belül. Emiatt a hőt termelő alkatrészek az akkuhoz közel kerültek beszerelésre, nehogy a belső hőmérséklet  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  alá süllyedjen, mely a cellák működési hőmérsékletének alsó határa. A továbbiakban számolni kell azzal, hogy az akkuk az átlagos felhasználáshoz képest gyorsabban amortizálódnak. [21] A cellák a repülés után nem sérültek, illetve a hideg hatása sem volt kimutatható.

A kommunikációs rendszer a magasban működő egységen a Raspberry Pi vezérlőszámítógéphez kapcsolódik, valamint a jelerősítéshez szükséges antennához. Itt a kommunikációs modul RP-SMA csatlakozójához kellett egy átalakító segítségével SMA csatlakozóval ellátott antennát kötni.

A vezérlésnél, ugyan csak minimálisan, de szükség van elektronikára a kommunikációs rendszer hordozható számítógéppel való kapcsolatának létrehozásához, illetve az antennák csatlakoztatásához. A földi yagi-antennákon FME csatlakozó kapott helyet, amely a kommunikációs modul RP-SMA csatlakozójához egy átalakító kábel segítségével csatlakozik.

## Kommunikáció



15. ábra – A ballon kommunikációs rendszerének felépítése

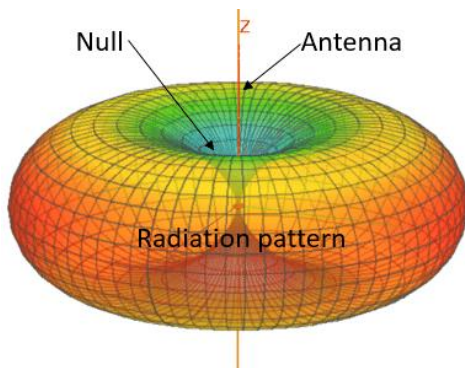
A rendszer egyik legfontosabb eleme, hogy a levegőben levő eszköz képes a földi irányítással folyamatosan kapcsolatban lenni. Így nyomon követhető a ballon útja, valamint az adatokat is képes a felszínre továbbítani

A kommunikáció fejlesztés során több rendszert és megoldást is teszteltem. A fő elvárás a hatótávolság legyen nagy, mivel képesnek kell lennie a ballonnal elérhető 40 km-es maximális magasságban minimális oldalirányú eltávolodás esetén is stabil kapcsolatot biztosítani. Könnyíti a feladatot, hogy ezt a távolságot csupán levegőn keresztül kell megtennie a rádióhullámnak, mely azt jelenti, hogy a végpontok között nincs semmilyen akadály, a két egység között közvetlen rálátás van. Fontos kritérium volt, hogy a mindenki számára nyílt frekvenciasávok közül valamelyiken működhessen a rendszer. A sávszélességgel kapcsolatban nem volt konkrét elvárásom. A LoRa kommunikációs protokoll tesztelése során a távolsággal kapcsolatos minimumot nem sikerült teljesíteni, így további lehetőségeket is vizsgáltam más modulokkal, például RFM22B-el, azonban ezek a kisebb teljesítményű, és kisebb tervezési precizitással készült modulok néhány száz méternél nem voltak képesek messzebbre kommunikálni.

Végül az RFDesign cég RFD 868x nagy hatótávolságú moduljai bizonyultak megfelelőnek, mely a földi, akadályokkal teletűzdelt teszteken is megfelelően teljesített. A rendszer 868 MHz frekvencián, állítható adóteljesítménnyel sugároz. A maximális sávszélessége 254 Mbit másodpercenként, mely elegendő a telemetria és az egyéb adatok gyors továbbítására. A MAVLINK kommunikációs protokoll használatára optimalizálva van az RFD 868x modul, így ezt a megoldást választottam. Előnye, hogy előre elkészített szabványos csomagokon keresztül lehetséges az adattovábbítás, nem kell saját formátumot készíteni az eszközhöz.

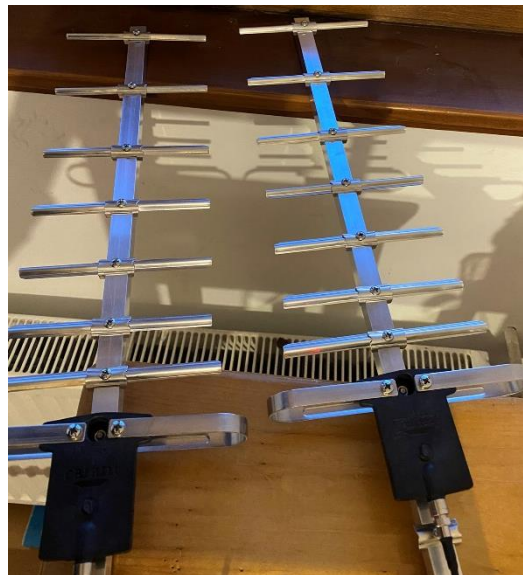


16. ábra – A kommunikációs modul



18. ábra – A dipólusú antenna karakterisztikája

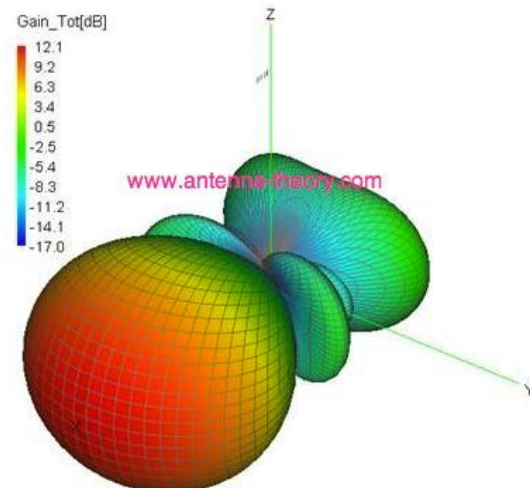
A hatótávolság szempontjából kiemelt fontosságú az antennák karakterisztikája és egyéb tulajdonságaik, így ezek kiválasztását is elemzések előzték meg. A magasban lévő eszközön fontos, hogy a jel minden irányban egyformán erős legyen, vagyis nincs lehetőség irányított antenna használatára. A modul képes két antennát kezelni, így volt lehetőség két antenna kombinációjával dolgozni. A választás közepes méretű, dipólus antenna használatára esett, melyet a térben egymásra derékszögben elhelyezve minden irányba azonos erősségű jelet kapunk. Ez megfelelt a minden tengelye mentén forogni képes ballonra, azonban az antenna erősítése csupán 3 dBi, mely nem elég a nagy távolságok áthidalására. A földön ezért sokkal nagyobb érzékenységű és erősségű antenna használata szükséges, mellyel kompenzálható a repülő egység gyengesége. A földön kettő, egymással párhuzamos yagi-antennát használok, itt is kihasználva a két csatlakozó nyújtotta előnyöket. Az antennák irányítottak, kb.  $20^\circ$ -os szögben sugároznak a legerősebben, emiatt a földi egységen lévő antennákat folyamatosan a lebegő ballon felé kell fordítani. Amennyiben a ballon a közelben van és a jelerősség tökéletes, a földi egységen is van lehetőség a dipólusú antennák használatára, a tapasztalatok szerint ez kb. tizedakkora távolságot képes áthidalni, mint egy yagi antenna. Az irányított antennák másik előnye, hogy adatátvitelre nem alkalmas jelerősség vagy esetleges szoftveres hiba esetén meghatározható a szonda iránya csupán a sugárzott jel erősségének változásából. A pontos helyzet pedig meghatározható háromszögeléses technikával. Ebben az esetben a ballon hozzátétőleges helyzetét is elegendő ismerni. Már dolgozom az automata, autó tetejére szerelhető antenna mozgató mechanikán, azonban jelenleg az antennát még kézzel kell irányba állítani, mely a legtöbb esetben nem jelentett különösen nagy nehézséget, mivel nem mindig szükséges teljesen a cél felé irányítani az antennát, a jel akár  $90^\circ$ -nál nagyobb szögben is megfelelő erősségű.



17. ábra – A felszínen használt yagi antenna

Kommunikációra a már említett MAVLINK keretrendszert használom. [22] Ez egyrészt a modulomban beépített támogatással rendelkezik, másrészt a jól bejártott protokollok legtöbb esetben megbízhatóbbak, mint egy saját rendszer. A MAVLINK egy drónos kommunikációs keretrendszer, mely támogatja a telemetriai, képi és egyéb állapotjelzők továbbítását. Emellett van lehetőség teljesen testreszabott adatcsomagokat is küldeni, melyben a ballonra specifikus

adatokat tudom továbbítani a felszínre. A rendszer fél másodpercenként továbbítja a felszínre a telemetriai adatokat, másodpercenként az egyéb adatokat, mint például a hőmérsékletet és a fedélzeti számítógép állapotát. Ezen felül várja a felszínről érkező parancsokat, melyek segítségével lassíthatjuk a képek készítésének gyakoriságát, illetve lekérhetünk egy meghatározott pillanatban készült képet. Emellett újraindíthatjuk a teljes rendszert, mely hasznos lehet esetleges összeomlás esetén. A felszínen a beérkező adatokat a rendszer megjeleníti grafikus és szöveges formában is.



19. ábra – A yagi antenna karakterisztikája

## Szoftverek

A ballon hasznos működéséhez elengedhetetlen a megfelelő szoftverek használata. Ehhez saját fejlesztésű programokat használunk, mivel így megfelelően testreszabható a teljes rendszer.

A kódok elkészítéséhez Python 3, és Arduino C nyelveket használtam, ezek segítségével készült el a teljes rendszer. A későbbiekben a fedélzeti vezérlőrendszert esetleg lecserélem C++ Qt keretrendszerben készített grafikus megjelenítőre. [23]

A ballon fedélzetén futó rendszerek működése kritikus, mivel ezen kódok javítására nincsen lehetőség a repülés közben. Ezeket a programokat számos alkalommal teszteltük földi keretek között, azonban a legtöbb magaslégköri körülmény nem szimulálható. Folyamatosan érhet meglepetés, ezért fontosak a távoli újraindításhoz hasonló biztonsági funkciók. A szonda kódjai két fő részre oszthatók: egyrészt az adatgyűjtő szegmensre, másrészt a mentést és a kommunikációt végző rendszerre. Ez a két feladat egymástól elkülönített szálon fut.

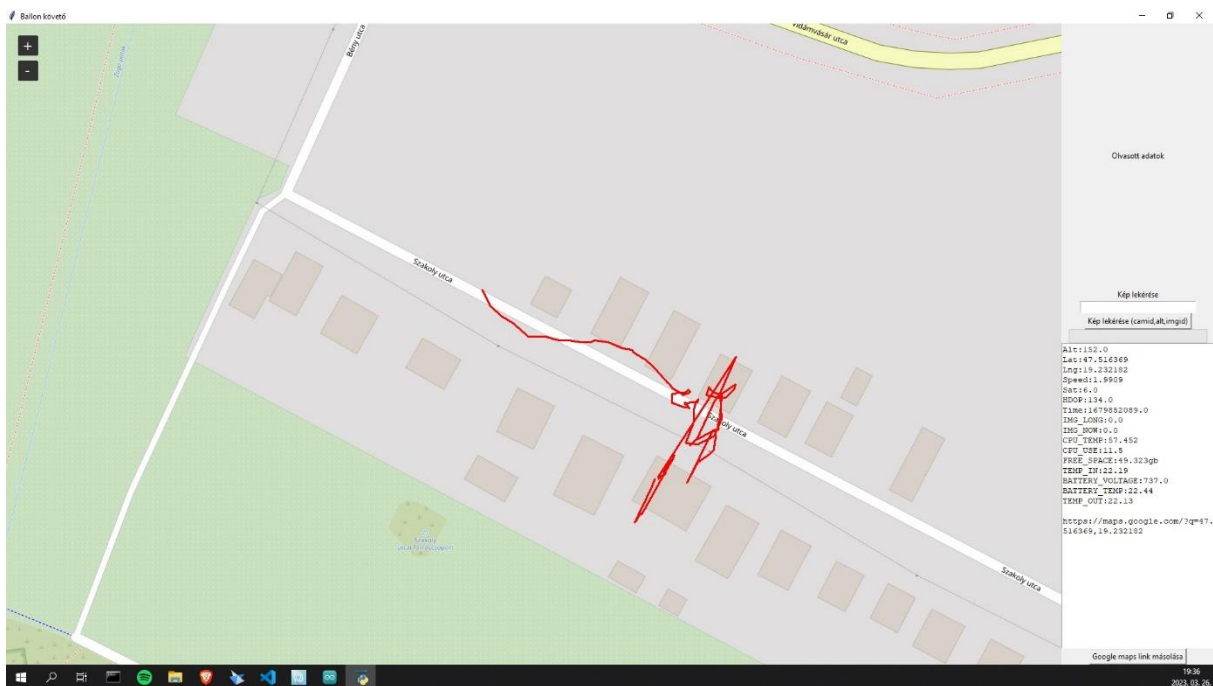
Az adatgyűjtést elsősorban az Arduino Nano végzi, ez gyűjti be a telemetriai, valamint a hőmérséklet adatokat, és itt lehetőség nyílik később további szenzorokkal felszerelni a rendszert. A rendszer célja miatt kiemelt fontosságú feladat a képkészítés, ezt a Raspberry Pi végzi. A képeket jelenleg egy USB-s webkamera készíti, mely költséghatékony és a szoftverek tesztelésére megfelelő. A fotók megadott időközönként készülnek el és kerülnek mentésre a fedélzeten. Ezen feladatot egy teljesen szeparált szálon futó rendszer készíti, így képes megfelelő gyakoriságot elérni, valamint a többi rendszer hibájából nem áll le ez a szegmens. Természetesen a mentett fotókhoz hozzáfér a többi feladatot együtt kezelő szál is, így van lehetőség továbbítani a felszínre a kész képeket.

A másik említett szál a fedélzeten összegyűjtött adatokat azonnal egy szöveges fájlba gyűjti össze és menti, ezzel is hozzájárulva a megbízható működéshez. Ezen folyamat kezeli továbbá a kommunikációt is. Az Arduino soros kapcsolaton, USB kábelen keresztül küldi a Raspberry pi-nek az adatokat. Ezt a módszert a következőkben I2C-re vagy SPI-ra cserélem le. Szöveges formátumban, vesszővel elválasztva körülbelül 20 milliszekundumonként érkeznek az adatok, melyek nem igényelnek visszacsatolást az olvasásról, mivel a gyakori adatküldésnek köszönhetően sok redundáns adat kerül továbbításra. A folyamathoz tartozik a felszínre küldendő adatok és az RFD 868x modul kezelése. Az adat a kommunikációs modulhoz UART-on keresztül jut el, mely aztán továbbítja az adatokat a felszíni egységre. Az érkező adatok is hasonló módon érnek célba a szondán, a feldolgozást is ez a folyamat végzi.

Kép küldése esetén a fotó készítésének kerekített magasságát, és mivel adott magasságon több kép is készülhet a kép sorszámát is meg kell adni a felszínről indított kérdésben. A fotók mentése ezen paraméterek alapján történik, így utólag is átláthatóak a képek. Hibás bemenetek esetén a rendszer a megadott kritériumokhoz legközelebbi képet keresi meg és továbbítja. Amennyiben a rendszer megtalálta a megfelelő fotót, elküldi a küldés megkezdésére vonatkozó üzenetet, majd a kép 253 bájtos csomagokban elhelyezett részeit. Ezeket az általános adatfolyamba illesztve küldi, így a kép letöltése közben is elérhetőek a telemetriai adatok. Mivel a rendszer nem rendelkezik túl nagy adatátviteli sebességgel, és a fontos adatok számára folyamatosan fent kell tartani legalább a sávszélesség felét, egy átlagos 2 MB-os kép kb. 5 másodperc alatt tölthető le. A képek folyamatos küldése is felmerült, azonban a megnövekedett kommunikációs aktivitás nagyobb energiafogyasztással, és esetlegesen nélkülözhetetlen adatvesztéssel járna, így ezt az opciót végül elvettem. Van lehetőség analóg kép továbbítására is, erre azonban az esetleges jelzavarok okozta minőségromlás miatt egyáltalán nincsen szükség.



A felszíni vezérlő programok képesek a szondától érkező adatok összegyűjtésére, és azok grafikus megjelenítésére. Mivel a rendszerben a legtöbb adat nyers formátumban is teljesen jól értelmezhető, ezeket nem jelenítem meg grafikusan, csupán szövegesen. A koordináták értelmezése ránézésre azonban egy picit nehézkes, így a telemetriát egy térképen megjelenítem. Emellett a felső részen van lehetőség parancsokat továbbítani a fedélzetre, ez alap működés esetén csak kép lekérését jelenti, de itt van lehetőség a biztonsági beavatkozásokat is elvégezni. Az alábbi képen láthatják a jobb oldalt megjelenő szöveges adatokat, fölötté a vezérlő parancssort, bal oldalt a ballon által megtett utat.



20. ábra – A vezérlőprogram képernyőképe

A programok fejlesztése két eszközön zajlik, mivel a Raspberry Pi számítógépen futó programokat a gyors tesztelés miatt az eszközön írom, SSH kapcsolat segítségével. A fedélzeti programokat és az Arduino kódjait számítógépen írom. Az átláthatóság miatt a mindkét eszközön párhuzamosan elkészült kódokat egy privát Git tárolóban összesítem, így a legújabb módosítások a számítógépen és a Raspberry Pi számítógépen is elérhetőek.

## Repülés

Az alábbiakban szeretném bemutatni, hogy hogyan zajlik egy repülés, illetve bővebben bemutatnám az eddigi eredményeket.

Egy repülés végrehajtása előtt a legfontosabb, hogy a Légügyi Hivatalnál kötelező ennek a bejelentése. Ez a könnyű kategóriába tartozó személyzet nélküli ballonok esetén bejelentési kötelezettséget jelent. A benyújtott adatok alapján a légtérrel használó járműveknek a légiirányítás megadja a megfelelő tájékoztatást. A bejelentést legkésőbb 10 nappal az indítás



előtt kell benyújtani. [19] [20] Emiatt a bejelentést több napra érdemes megtenni, hogy az aktuális meteorológiai viszonyok alapján az indítás a legmegfelelőbb időjárási körülmények között történhessen. Fontos szabály, hogy az indítás után a ballon nem repülhet lakott terület fölött 300 méternél alacsonyabban, ez az indítás helye esetén fontos szempont.

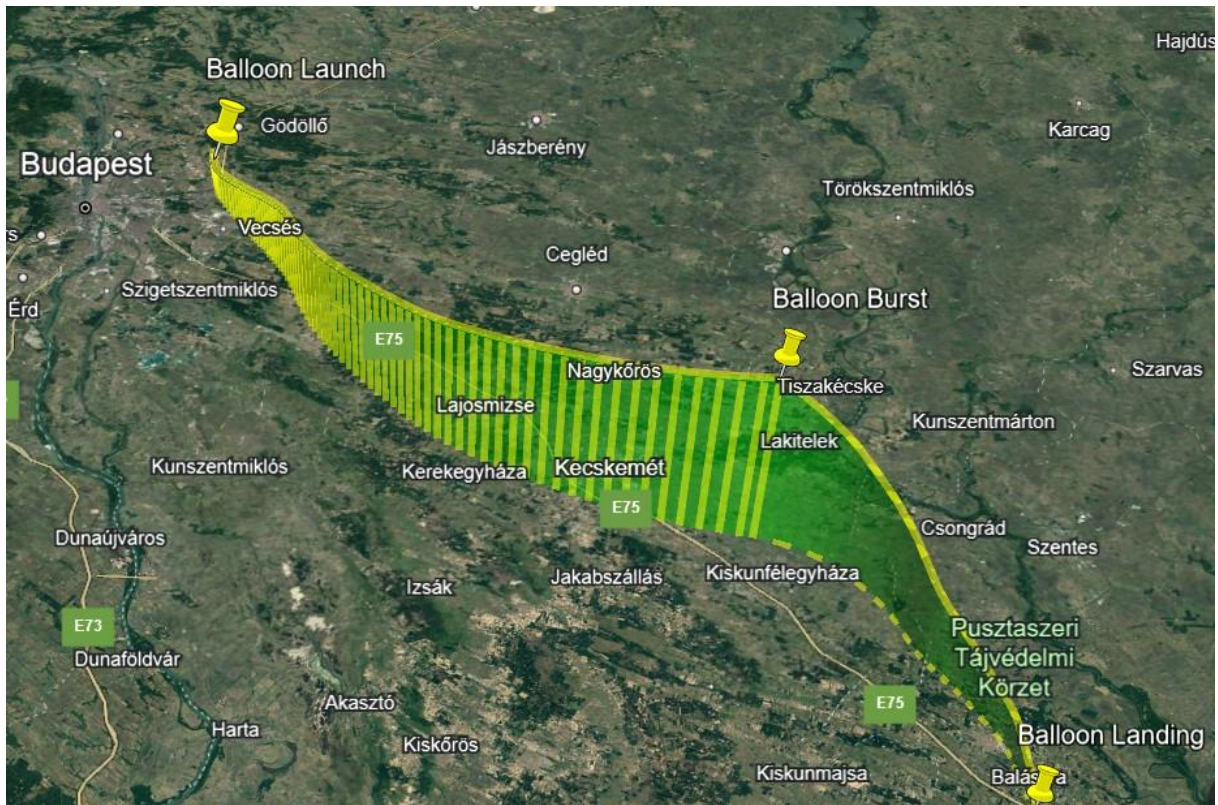
A repülés során a ballon az időjárás viszonyosságaira van bízva, valamint az indítás pillanatában a felszínen sem lehet szélsőséges időjárás. Az alábbi kritériumok betartása ugyan nem törvényi kötelezettség, azonban a repülés, az eszköz és a hidrogén gáz biztonságos kezelése miatt fontos. 10 km-en belül nem érzékelhet a Meteorológiai Szolgálat detektálórendszere villámlást, valamint a felszíni szél erőssége az indítás helyszínén nem lehet erősebb mint 10 km/h. Ezek a kritériumok a hidrogén gáz és a fejlesztett eszközök biztonságos használata miatt fontosak és betartandóak, de nem törvényben előírt kötelezettségek. A pontos



21. ábra – A második indítás alatt tapasztalható túl erős szél

adatokat csupán az indítás előtti órákban lehetséges biztonsággal előrejelezni, ugyanakkor a magaslégköri szélviszonyok általában ennél jóval kiszámíthatóbbak, így a szonda tervezett repülési pályája hatékonyan tervezhető. [24]

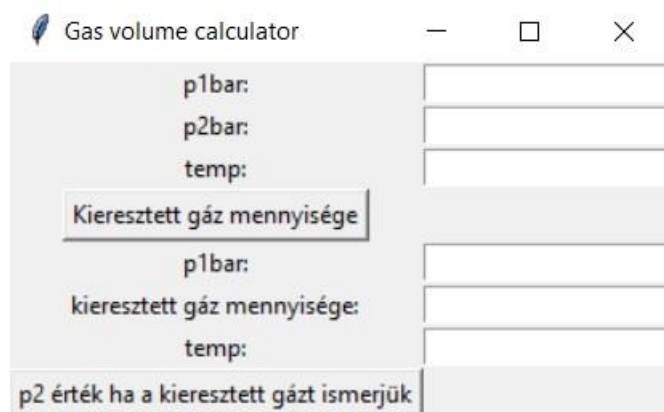
A ballon emelkedési és süllyedési sebességéből, valamint az indítás helyéből meteorológiai modellek segítségével kalkulálható a ballon várható útvonala. Ennek pontossága függ az adott időpontban jelen lévő frontoktól, valamint, hogy az emelkedési és süllyedési adatokat milyen pontossággal vagyunk képesek kiszámítani. Az emelkedési sebesség kiszámításához szükséges a ballonba eresztett gáz mennyiségét, és az eszköz tömegét ismerni. A süllyedési sebességet pedig az ejtőernyő hatékonyságának ismerete alapján lehet kiszámítani.



22. ábra – Az első repülés tervezett útvonala

A ballonba eresztett gáz mennyiségét azért is fontos ismerni, hogy a szakadási magasságot is pontosan meg lehessen határozni. A gáz mennyisége, a ballon tömege és az emelkedési sebesség hármából bármelyik értéket kiszámíthatjuk, akár online kalkulátorok segítségével. Az útvonal előrejelzés alapján tapasztalataim szerint kb. 5km-es sugarú körben várható a ballon érkezése a repülés napján legfrissebb modell számítása alapján. [25]

A ballonba töltendő gáz mennyiségét űrmértékben számíthatjuk, azonban a töltéskor csak a gázpalack nyomását, illetve annak változását ismerjük. A megfelelő mennyiség számítására nincsenek kész rendszerek, így elkészítettem a saját, minimális grafikus felülettel rendelkező kalkulátoromat, mely képes kiszámítani a szükséges nyomásváltozást a palackban, adott mennyiségű gázbetöltés igényére. A kalkulátor az egyesített gáztörvényt alkalmazza a kieresztett gáz térfogatának meghatározásához a nyomás változása alapján.

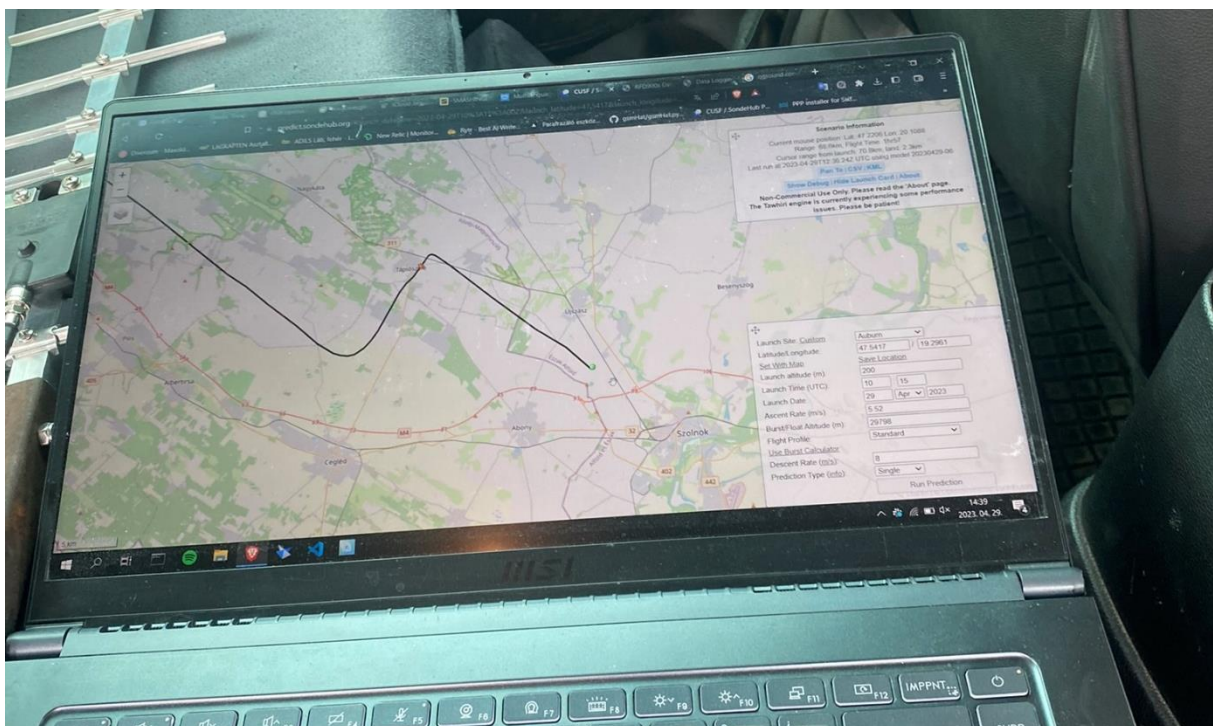


23. ábra – A szükséges gáz mennyiségét számító program



Eddig három repülést hajtottam végre. Első alkalommal az indítás sikeres volt, a repülés után azonban nem sikerült a ballont összegyűjteni. A kommunikációs rendszer sajátossága alapján a rendszer csak GSM hálózat által lefedett területen volt képes kommunikálni, azonban a felszínre érkezés után sem működött a megoldás. A hasznos teherbe egy mobiltelefont is tettem egy gyermekek követésére alkalmas applikációval, azonban ez a rendszer sem működött a saját SMS-küldő rendszerem mellett. A becsült útvonalból és a mobilhálózati lefedettség térképek alapján arra következtettem, hogy mobil lefedettség nélküli területen ért földet az eszköz. Ennek a hibának köszönhetően a tervezettnél korábban kifejlesztettem a kommunikációs rendszert, annak érdekében, hogy a szondával folyamatosan legyen lehetőség kapcsolatot tartani repülés közben. A 2. indítás napján rossz idő volt, így egy nappal halasztottam a repülést. Aznap, a kb. 30 km/h-s szél ellenére megkíséreltük az indítást. Az indulás előtt azonban a ballon kidurrant, így az indítás sikertelen lett. Ebből a megfelelő következtetéseket levonva szigorítottuk az indításra alkalmas időjárás kritériumait.

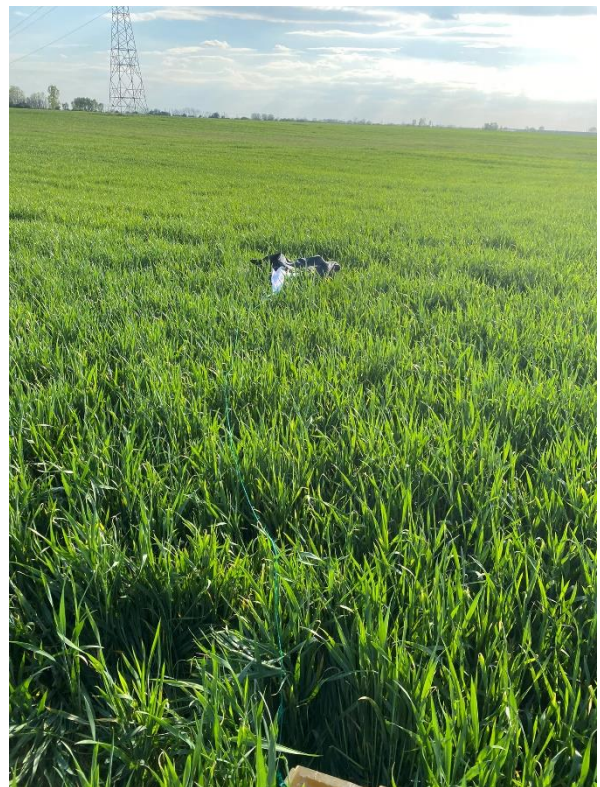
A 3. repülés előtt a kommunikációs rendszert sikerült további teszteknek alávetni, illetve itt már rendelkezésre állt a megfelelő gázmennyiség kiszámításához szükséges tudás és szoftveres háttér, így az indítás sikeres volt. A repülés közben, körülbelül hatszáz méteres magasságban a kommunikáción keresztül érkező adatfolyam megszűnt, holott a jelerősség és a kapcsolat továbbra is rendelkezésre állt, csupán az adatküldés állt le. Ezt a hibát az azonos szoftverrel azóta sem sikerült reprodukálni, ezért hardveres hiba miatti kapcsolatmegszakadás



24. ábra – A harmadik repülés útvonala, miközben úton vagyunk a landolási zónába

valószínűsíthető, esetleges külső behatás miatt, például egy nagyobb kilengés után. Ennek alapján az USB kapcsolatot integrált áramköri kommunikációs megoldásokra (I2C, SPI, UART) cserélem le. Összességében elmondható, hogy a rendszer működött, valamint a kapcsolat – adatfolyam nélkül ugyan – továbbra is rendelkezésre állt. Mindezek alapján a ballon korábban meghatározott landolási pontját továbbra is reálisnak tekinthettük. A továbbiakban, az ereszkedés során a felszíni akadályok miatt megszakadt a rádiós kommunikáció. Ez normális folyamat, amennyiben azonban ismert egy koordináta 5-600 méteres magasságból, könnyen újra hatótávolságon belülre lehet kerülni, mely a landolás után radikálisan lecsökken a 868 MHz-es frekvencia miatt. Miután ismét sikerült a szondára kapcsolódni, háromszögletes módszerrel sikerült meghatározni a ballon hozzávetőleges helyzetét. A későbbi elemzések során kiderült, hogy a repülés alatt a fedélzeti rendszerek megfelelően működtek, az akkumulátor a kb. 5 órás üzem után 70% körüli töltöttségen volt, és az elektronikai eszközök nem károsodtak a zord körülmények miatt.

Siker továbbá, hogy a repülés során a ballon képkészítő rendszere megfelelően működött, így rendelkezésre állnak magasban készült képek, melyek alkalmasak elemzésekre is.

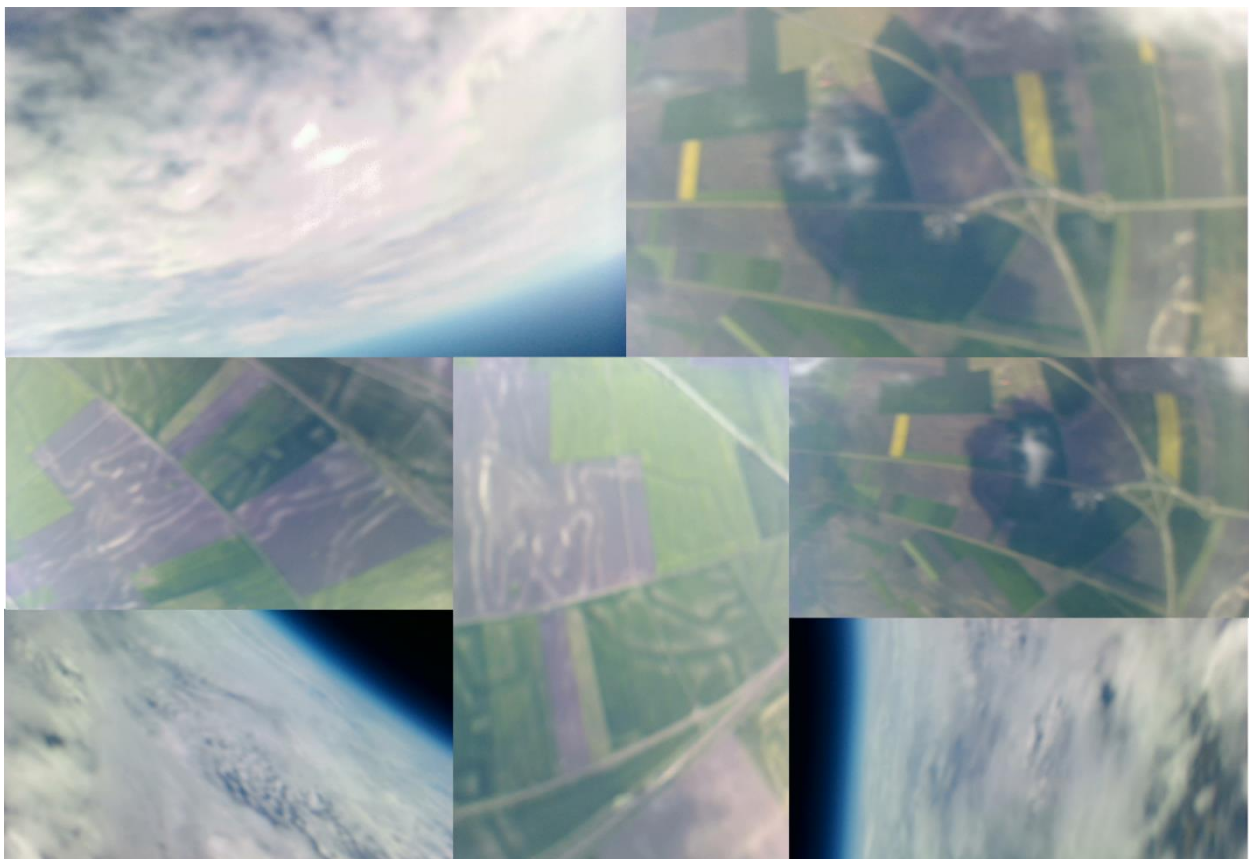


25. ábra – A megtalálás pillanatában jól látható ejtőernyő, és a kép alján pedig a ballon

A legutóbbi repülés nagyon sok tanulságot hozott, sikerült belőle a lehető legtöbb hasznos tanulságot kinyerni. Egyrészt a kommunikációs rendszer nem mindenható, emellett nem árt egyéb biztonsági megoldás is a szondára, ezért folyamatban van a rendszer bővítése egy, a többi részegységtől független SMS-es helyzetküldő megoldással, mely a mobilhálózatot használja a helyzet továbbítására. Igazolódott továbbá az a feltételezésünk, hogy fontos a kameratechnológiát mihamarabb fejleszteni, mivel az eddig készített képek alapján is hasznos elemzéseket lehetett elvégezni, azonban ezen a területen még rengeteg potenciál van az eszközben.

## **Képelemzés**

A fő cél olyan minőségű képek készítése a magasból, melyek elemzése a mezőgazdasági szereplők számára értékes információkat nyújt, támogatva őket az erőforrások hatékony felhasználásában. A képalkotó rendszer még fejlesztés előtt áll. A technológia drága, ezért akkor



*26. ábra – A repülés közben készült képek egy része*

érdeemes beépíteni, amikor a repülés és begyűjtés megbízhatóan működik. A képelemző szoftvereken a többi fejlesztéssel párhuzamosan, folyamatosan dolgozunk. Ezekkel a mezőgazdaságnak is hasznos adatokat lehet kimenetként készíteni.



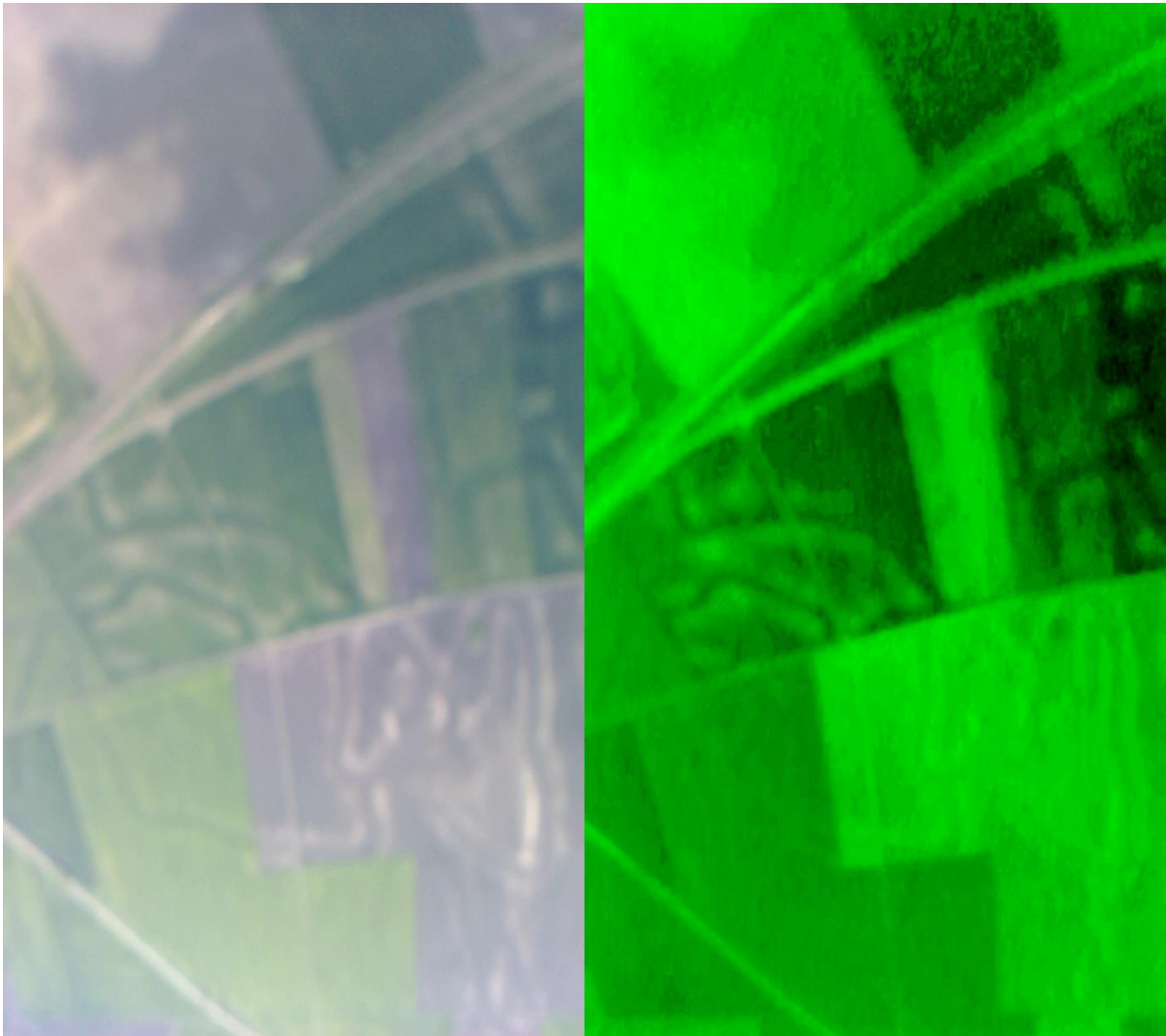
Az egyik legfontosabb növényegészségügyi mutató az NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), mely a növények vegetációjának mértékét mutatja meg. Ez a közeli infravörös és a vörös fényből képes egy -1 és 1 közötti értékkel jellemezni az adott terület állapotát. Jelenleg az egyszerűbb képalkotó technológia miatt nem rendelkezem infravörös adatokkal, de már készítettem megfelelő programot a jövőben rendelkezésre álló képek elemzéséhez. Azonban a jelenlegi képek is hordoznak magukban értékes adatot, még hogyha kevesebbet is. A látható fény spektrumában készült képek esetében alkalmazható a hullámhosszok eltolása, ezáltal a vörösből (~650 nm) zöld (~550 nm), az infravörösből (800-1000 nm) pedig vörös kerül felhasználásra egy hasonló index megalkotása esetén. Az ötlet szerencsére már más is használta, ez a GRVI (Green and Red ratio Vegetation Index) néven ismert mutató. Hasonló eredményt ad, de jobban elválasztható a talaj háttérzajától, mint az NDVI. Hátránya, hogy nem tud teljeskörű, átfogó képet adni a növényzet állapotáról. [26] [27]

A GRVI mutató alapján az algoritmus képes az egészségesebb és kevésbé egészséges területeket elválasztani egymástól, valamint a növényzettel borított területet is meg tudja különböztetni az egyéb felületektől. A képelemzési rendszerekhez egy jelenleg lokálisan működő API-t hoztam létre, melybe könnyen integrálható újabb megoldás. A képelemzések területén fontosnak tartom, hogy saját rendszerrel is rendelkezek, mivel minél több adattal rendelkezem, annál jobb gépi látásra épülő algoritmusok alkothatóak.



27. ábra – A landoláshoz közeli terület NDVI képe a Sentinel-2 műhold elemzésén [28]





28. ábra – Bal oldalt az eredeti kép, jobb oldalt a GRVI értékekkel ábrázolt kép (világos: magasabb GRVI)

## Fejlesztés lépései

A ballon fejlesztése rendkívül sok időt vett és még fog is igénybe venni, így az elvégzett munkát az alábbiakban fogom bemutatni.

A fejlesztést 2022 őszén kezdtem el, ekkor álltam neki tervezni az eszközt, valamint felmérni a piaci igényeket. Elsőnek egy olyan rendszert terveztem megépíteni, mely képes repülni, majd a repülés végén a GSM hálózatot használva eljuttatni a leérkezés helyét SMS-ben, vagy internetes http kérések segítségével. Az eszköz felépítése a kommunikáción kívül nagyon hasonló volt az előbbieken bemutatotthoz. A rendszer fejlesztését meg is kezdtem, egy Raspberry Pi bővítőpanel, egy a jelenlegihez hasonló akkumulátor, és sok óra programozás után a rendszer képes volt a pozícióját SMS-ben elküldeni. Természetesen a magaslégkörben nincsen mobilos lefedettség, így arra számítottam, hogy nagyjából 500 méteres felszíntől mért magasság alatt tudja majd a ballon az alapvető adatait továbbítani. A rendszer felépítése a

kommunikáción kívül nagyon hasonló volt az előbbieken bemutatotthoz, elsősorban abban voltak komolyabb eltérések. Az első repülésnél használt ballon emelkedését a telefonos applikáción nagyjából a 4 km-es oldalirányú eltávolodásig tudtam követni, utána a mobilos kapcsolat megszűnt. Mivel repülés közben nem rendelkeztem a ballon pozíciójával, így irányító programra sem volt szükség.

Az első repülés sikeres volt ugyan, de a leérkező ballont nem sikerült összegyűjteni, így gyakorlatilag az egészet veszteségként kellett elkönyvelni. Mivel a hiba a kommunikációs megoldásban volt, elkezdtem a folyamatos kommunikációt biztosító megoldáson dolgozni. Sok modult teszteltem, végül az egyik barátom ajánlására egy drága, de rendkívül hatékony eszközt találtam – ami megfelelt az elvárásoknak. A fejlesztés során ezernyi nehézségre kellett megoldást keresni, mint pl. amikor Raspberry Pi UART interfészén engedélyezett volt a terminálhoz való hozzáférés, így a kommunikáció nem működött megfelelően. Ezzel az egyetlen konfigurálási hibával én magam is majdnem 20 munkaórányi időt töltöttem mire megtaláltam a probléma okát, és még számos személytől kértem segítséget, akik szintén nem jöttek rá a probléma megoldására. A fejlesztés során tapasztalt kihívások mellett finanszírozással kapcsolatos problémákat is meg kellett oldanom, mindezeknek köszönhetően sok tapasztalattal lettem gazdagabb.



29. ábra – Az első indítás

Az eddigi repülések során közös volt az indítási hely, amelynek a szabályozás alapján olyan távol kell lennie a lakott területtől, hogy amikor a ballon lakott terület fölé ér, már legalább 300 méterrel a felszín fölött van. Optimális indítási pontként a Kistarcsa melletti a Körmösi-keresztet határoztuk meg, mely kb. 250 méterrel a tengerszint felett helyezkedik el. A legközelebbi lakott terület 700 méterre van, mire ezt a ballon eléri, már bőven átlépi az előírt magasságot.

Az új rendszer fejlesztése során komoly energiát fordítottam a repülési körülmények szimulálására, de a sikeres teszt közben is adódtak hibák, jelenleg pedig ezeknek a problémáknak a megoldása adja a legnagyobb feladatot számomra. Emellett a megfelelő kamerarendszer kiválasztásával is sokat foglalkozom, hiszen a megbízható repüléseket követően már komolyabb összegek is fordíthatóak az optikai rendszerekre.

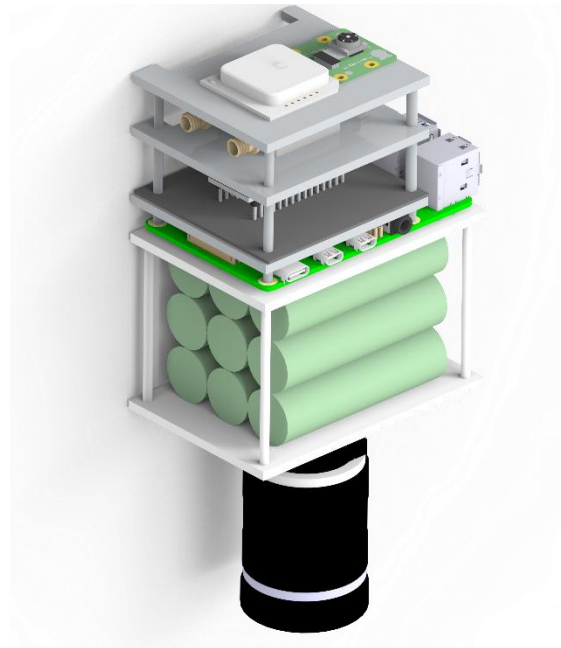
## További tervek

A fejlesztések során sikerült a semmiből létrehozni egy prototípusként jól működő rendszert, mely természetesen még sok fejlesztést igényel. Hosszútávon szeretnék a Loon projektben használt ballonokhoz hasonló eszközöket fejleszteni. Ezeket a megfigyelésekre alkalmas optikával szerelve, a piac számára is hasznos adatokat lehet szolgáltatni.

Rövidtávon a repülés, a kommunikáció és a begyűjtés biztonságos működése a legfontosabb. Fontos továbbá a

kamerarendszer fejlesztése, ahol szükséges az infravörös tartományban is érzékelő eszközök átalakítása és beépítése, majd pedig a nagy felbontás elérése is. Emellett a hasznos teher belső elrendezését újra kell tervezni, hogy olyan hiba ne fordulhasson elő, mint az első repülésnél. A kamerák elrendezését és az eszköz egyensúlyát is javítani lehet a tervezett módosításokkal. Ezután a ballonokat kell a lebegésre és a manőverezésre alkalmassá tenni. Ennek az anyagi vonzata miatt ezt akkor tervezem elvégezni, amikor már az eszköz képes értékesíthető felméréseket végezni, hogy azután a működés volumenének növelése lehessen a cél.

A kamerarendszerrel kapcsolatban elsőként valószínűleg egy eltávolítható színszűrővel rendelkező kamerát fogok használni, mely így képes infravörös képet is készíteni. Ez azt jelenti, hogy az érzékelő elé olyan szűrőt építek, mely a látható fényt szűri ki az érzékelésből, ezáltal a szenzor specifikációjából ismert, az elvárások szerint kb. 700-1000 nm hullámhosszon fog csupán érzékelni a kamera. Ezt egy látható fény tartományában készült képpel kombinálva gazdaságosan készíthetünk multispektrális képeket. A felbontás kérdése is igen fontos, mivel 1



30. ábra – A következő repülés hasznos tervének modellje

hektárról készült kép esetén az elvárt felbontás 2000x2000 pixel körül van, azonban én több száz hektárról szeretnék képet készíteni. Ezt a felbontás javításával, és pásztázó képalkotással lehet gazdaságosabbá tenni, mely komoly mérnöki feladatot jelent.

A navigációval kapcsolatban fontos első lépés lesz a nyitható ejtőernyő, mely az általam meghatározott magasságban lassítja le az eszköz szabadesését. Ezáltal az adott magasságban elérhető szeleket használja ki a minél kedvezőbb helyű landolásra. Ez természetesen csak nagyságrendileg képes irányítani az eszközt, de egy hasznos első lépés a teljes navigáció kifejlesztése előtt.

A jövővel kapcsolatban van egy rajtam kívülálló, de annál fontosabb várható technológiai lépés. Az internetszolgáltató műholdflották fenntartói – elsősorban a Starlink – várható, hogy kibocsát IoT alkalmazásokhoz használható programozható modulokat. Ezek segítségével a rendszer képes lesz nagy sávszélességen és megbízhatóan kommunikálni földi infrastruktúra nélkül, és a projekt kommunikációs kihívásai megoldódnak. A távközlés gyorsan változó világa miatt nem tervezek hosszútávon a jelenlegi adattovábbító rendszeremmel.

A vízióm szerint az eszközömet fogják a mezőgazdasági területek monitorozására használni szerte a világban, amivel nagy mennyiségű élelem előállítását lehet hatékonyabbá tenni.

## Összefoglalás

A fejlesztés eddigi, körülbelül egy éve alatt számos mérföldkövet teljesítettem, az általam épített eszköz megjárta a sztratoszférát, készítettem fényképet 25 km magasan. Emellett rengeteget tanultam mind mérnöki, technológiai kérdésekben, mind pedig a csapatmunka fontosságáról.

A nehézségek megoldása számomra kihívás, mely nagyon sokáig tud motiválni, emiatt választottam hobbimnak és munkámnak a mérnöki világot. Ebben a projektben olyan problémákra keresek megoldást, mely valós piaci igényeken alapul, emiatt a projekt célkitűzései bármikor változhatnak. Ez az amúgy is folyamatosan változó terveimet felboríthatja, megváltoztathatja, melynek azonban állok elébe. de természetesen ez nem okoz problémát.



## Köszönetnyilvánítás

Elsőként köszönjük a támogatást szerzőtársammal a családjainknak a lektorálásért, és a támogatásukért!

Köszönöm Dr. Gábris Katalinnak nagymamámnak a lektorálásért, és a csomagátvételekért!

Köszönjük mentorainknak, Dr. Komáromi Annamária tanárnőnek a kezdetek óta tartó támogatást, illetve Dr. Szabó Sándor tanár úrnak az értékes iránymutatást!

Köszönöm a segítséget a hardveres eszközök területén végzett segítséget Tasnádi Bencének.

Köszönöm a segítséget Tóth Tamásnak a kommunikációval kapcsolatos iránymutatásáért!

Köszönöm a Budapest Innovation Group tagjainak támogatását!



31. ábra – Édesapám a hidrogénpalackkal (Kertész Domokos)

## Irodalomjegyzék, források

- [1] „Development of High-Altitude Balloon Platform for Education, Experiment and Research in Science, Technology and Engineering,” 2023.
- [2] A. Alexander, M. Alvidrez, W. Beg, Z. Benezet-Parsons, L. Bouygues, S. Coriell, J. Dempsey, U. Dogruer, B. Freedman, J. Grazer, D. Herbert, B. Ho, R. Lange, M. Lelièvre, D. Nguyen, J. Nutzmann, K. Riordan, K. Roach, R. John , R. Schlaefli, S. Truslow és P. Heninwolf, Loon Library: Lessons from Building Loon’s Stratospheric Communications Service, USA: Loon LLC, 2021, p. 257.
- [3] W. A. Hasan és A. N. Abdulfattah, „DOWNLINK SIGNAL EVALUATION OF HAPS M-55 AIRCRAFT,” %1. kötet3, %1. számJuly- September, pp. 336-345, 2012.



- [4] S. M. a. S. L. S. Lafrance, „CSA's stratos program: Bringing a new mid-latitude stratospheric balloon base,” MT, USA, 2016.
- [5] L. LLC, „Loon,” [Online]. Available: <https://x.company/projects/loon/>. [Hozzáférés dátuma: 24 10 2023].
- [6] M. & A. D. Darokar, „PROVIDE HIGH ALTITUDE NETWORK BY USING PROJECT LOON,” %1. kötet4, pp. 659-662, 2017.
- [7] Aswin Alexander, Marc Alvidrez és Wajahat Beg, Loon Library: Lessons from Building Loon's Stratospheric Communications Service, USA: Loon LLC, 2021.
- [8] L. LLC, Reliability Requirements Document, <https://storage.googleapis.com/x-prod.appspot.com/files/LnArt%20-%20Loon%20Reliability%20Requirements%20Document.pdf>: Loon LLC, 2020.
- [9] L. & S. M. & P. S. & C. S. & C. R. Coy, „Global Assimilation of Loon Stratospheric Balloon Observations,” %1. kötet124, 2019.
- [10] M. C. S. C. P. Bellemare, „Autonomous navigation of stratospheric balloons using reinforcement learning,” %1. kötet 588, pp. 77-82, 2020.
- [11] W.-Q. Wang, Near-Space Remote Sensing: Potential and Challenges, Berlin: Springer Verlag, 2011.
- [12] V. Grósz és V. G. Gorócz, „Sztratoszférikus ballon fedélzetére készített asztrobiológiai kísérlet,” Budapest, 2012.
- [13] T. Á. Vilmos, *Adatfeldolgozási módszerek fejlesztése a 2015-ös PABLS határréteg mérési*, TDK konferencia: ELTE TTK, 2015.
- [14] David Grace, Mihael Mohorcic, Masayuki Oodo, Myles Capstick, M. Bobbio Pallavicini és M. Lalovi, *CAPANINA - Communications from Aerial Platform Networks Delivering Broadband Information for All*, 2005.
- [15] C. & G. D. & T. J. & W. G. & M. M. & F. E. & T. T. Spillard, *Broadband communications from HeliNet high altitude platforms*, : ESA, 2002.
- [16] R. Miura és M. Oodo, „Wireless Communications System Using Stratospheric Platforms,” %1. kötet48, %1. szám4, pp. 33-48, 2001.
- [17] F. A. d'Oliveira, F. C. L. d. M. Melo és T. C. Devezas, „High-Altitude Platforms — Present Situation and Technology Trends,” %1. kötet, összesen: %2Jul.-Sep, %1. szám2049-262, 2016.
- [18] E. Silber és D. Bowman, „Isolating the Source Region of Infrasound Travel Time Variability Using Acoustic Sensors on High-Altitude Balloons,” 2023.
- [19] 56/2016. (XII. 22.) NFM rendelet.
- [20] 923/2012/EU (SERA rendelet).

- [21] S. & W. B. & C. A. & G. N. & B. A. & F. B. Ananth, *System design of the physical layer for Loon's high-altitude platform*, 10.1186/s13638-019-1461-x: EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019.
- [22] Dronecode, „MAVLINK,” [Online]. Available: <https://mavlink.io/en/>. [Hozzáférés dátuma: 25 10 2023].
- [23] „Qt,” [Online]. Available: <https://www.qt.io/>. [Hozzáférés dátuma: 25 10 2023].
- [24] „Cambridge University Spaceflight Landing Predictor - Leaflet Version,” [Online]. Available: <https://predict.sondehub.org/>. [Hozzáférés dátuma: 28 10 2023].
- [25] Sondehub, „CUSF,” [Online]. Available: <https://predict.sondehub.org/>. [Hozzáférés dátuma: 25 10 2023].
- [26] N. K. O. H. T. S. Motohka T, „Applicability of Green-Red Vegetation Index for Remote Sensing of Vegetation Phenology,” %1. kötet2, %1. szám10, 2010.
- [27] T. Motohka és K. Nishida, „A simple and robust method for remote sensing of phenology using green and red reflectance: GRVI-method,” 2009.
- [28] „Sentinel-hub,” [Online]. Available: <https://www.sentinel-hub.com/index.html>. [Hozzáférés dátuma: 28 10 2023].
- [29] A. Mandal, „Stabilization and Trajectory Control of High-Altitude Balloons for Rockoons - A Review,” pp. 35-43, 2022.

## Egyéb hivatkozások, források:

- <https://agroloon.com/>
- <https://www.python.org/>
- <https://www.arduino.cc/>

## Képek forrása

- 1. ábra: <https://www.space.com/35621-2017-solar-eclipse-balloon-flight-skydive-kickstarter.html>
- 6. ábra: <https://content.fortune.com/wp-content/uploads/2022/07/US-Surveillance-balloon-Military-GettyImages-938905900.jpg>
- 2. ábra: <https://www.nytimes.com/2021/01/21/technology/loon-google-balloons.html>
- 15. ábra: [https://www.mybotshop.de/UAV-RFD-868x-Long-Range-Modem\\_1](https://www.mybotshop.de/UAV-RFD-868x-Long-Range-Modem_1)
- 16. ábra: <https://engibex.com/antennas-for-dummies/>
- 18. ábra: <https://www.antenna-theory.com/antennas/travelling/yagi3.php>
- 22. ábra: <https://earth.google.com/>
- A Loon projektről készült egyéb képek forrása: [5]
- A többi kép és grafika saját készítésű.