



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

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

Magaslégköri ballon földmegfigyelési célokra

Szerző:

Kertész Domokos

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamosmérnök BSc

Konzulens:

Dr. Szabó Sándor

docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Híradástechnikai Tanszék



2024

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
Absztrakt.....	3
Abstract	4
Bevezetés.....	4
Irodalomkutatás	6
Loon projekt	6
Szakirodalom	9
Saját fejlesztés bemutatása	11
Elektronika nélküli egységek felépítése.....	12
Elektronika.....	14
Kommunikáció.....	17
Képképző rendszer	19
Szoftverek	21
Repülés	23
Képelemzés.....	28
Elemzések a képképző rendszer első verziójának képeiből	29
Elemzések a képképző rendszer második verziójának képeiből	30
Fejlesztés lépései	32
További tervek	33
Összefoglalás	34
Köszönetnyilvánítás	35
Elemzések képanyaga	36
Irodalomjegyzék, források	41

Absztrakt

A dolgozat saját tervezésű magaslégköri ballon fejlesztéséről, az azzal elért eredményekről, 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.

Az első repülés kommunikációs problémák és az időjárási tényezők miatt sikertelen volt, azonban természetesen nem haszontalan. Az itt gyűjtött tapasztalatok alapján kétszer teljes sikerrel emelkedhetett föl a ballon adatot gyűjteni. Az első sikeres repülésen még csak a látható fény tartományában készültek képek, de a legújabb repülésen már nagy felbontású multispektrális megfigyeléseket végeztünk. Az ezek alapján készült elemzések már most is használhatók mezőgazdasági célra.



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.

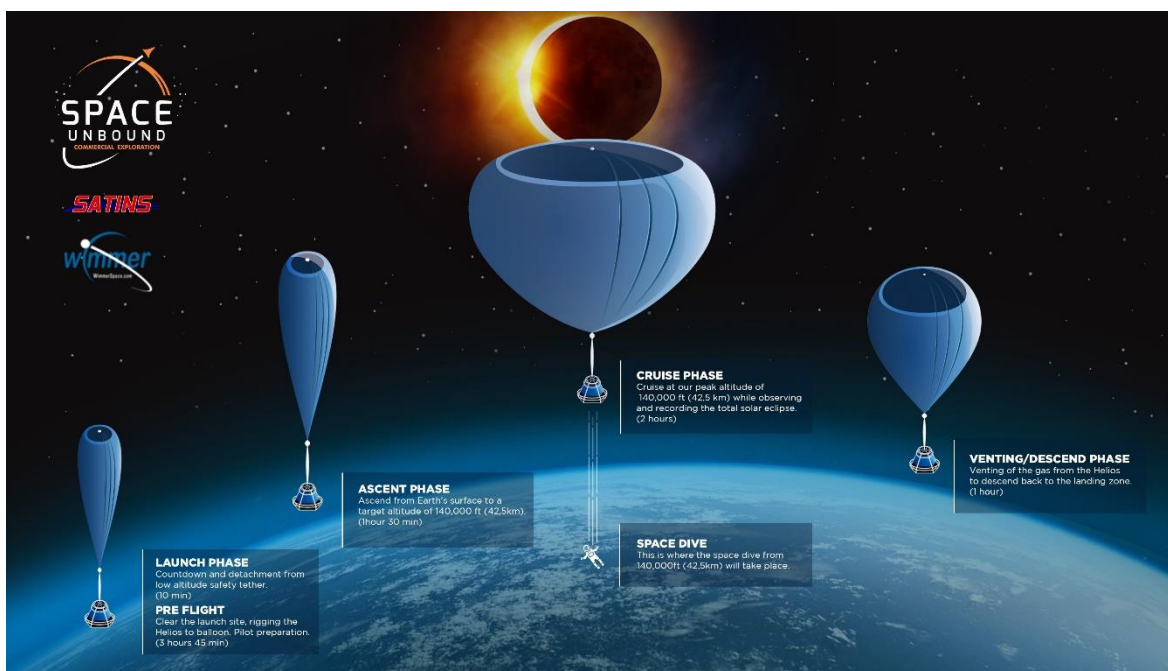
Our first two flights failed due to weather conditions and communication errors, but we have learned a lot from these mistakes. Based on these experiences, the system completed two successful flights. On the third mission, we collected images in the RGB spectrum, but on the last one, we took multispectral images with our own camera system. The analysis of this data is already useful in agriculture.



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.

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 általunk elvégzett kísérleteknél az egyszerhasználatos eszközöket alkalmaztuk, 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 írjuk 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 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,

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



2. ábra- Egy Loon ballon indítása

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 projekt szempontjából tanulságos ez a sikertelenség is, azonban mi nem a távközlés területén szeretnénk alkalmazni a ballonokat, a képzőművészet területén pedig a felszínhez közelebbi elhelyezkedés miatt mindig jobb képeket fog készíteni egy ballon, mint egy műhold – azonos optikával felszerelve. [7] [8]

A Loon számunkra 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



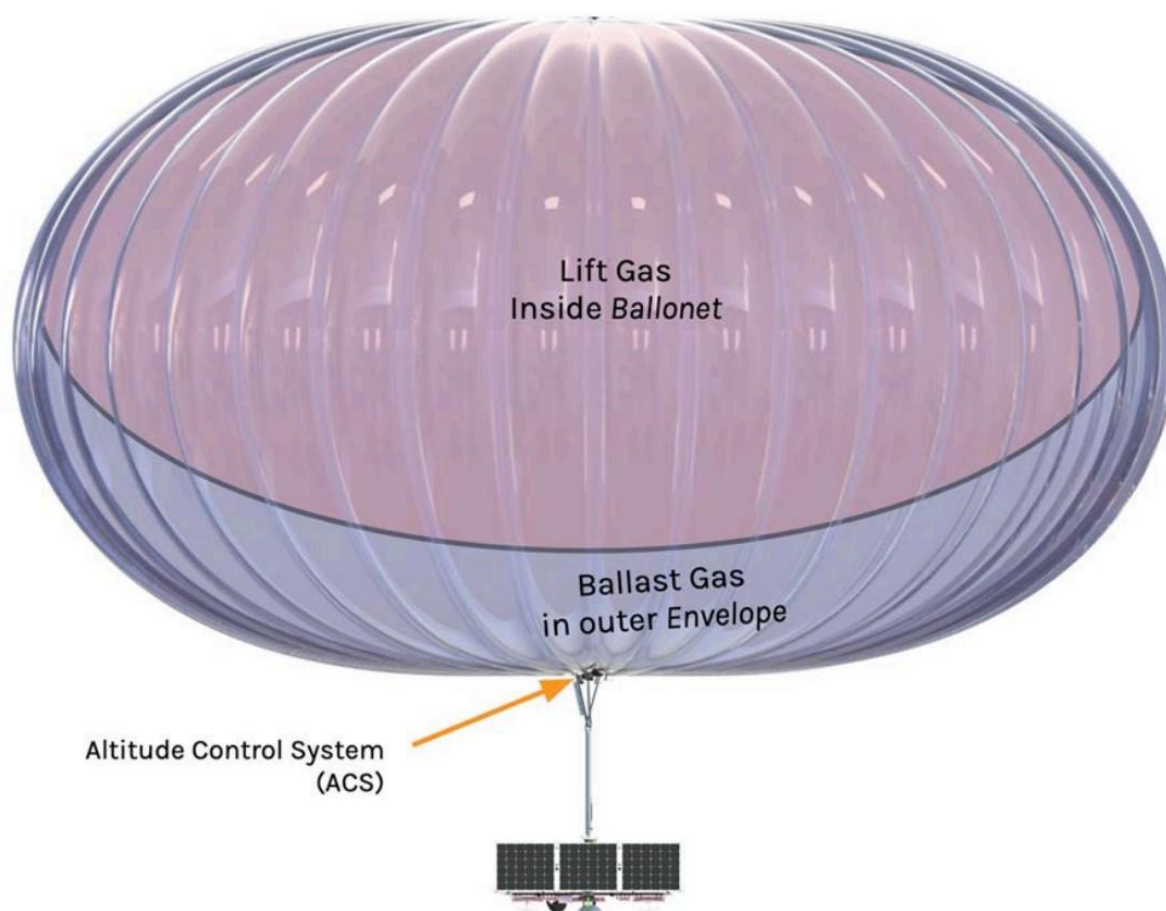
3. ábra – A Loon propellere

flottakezelő. Számunkra 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, mint ha 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 magasságszabályozó 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 magasságszabályzó 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 tömítések 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. Ezen 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 rendelkezünk információval.

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



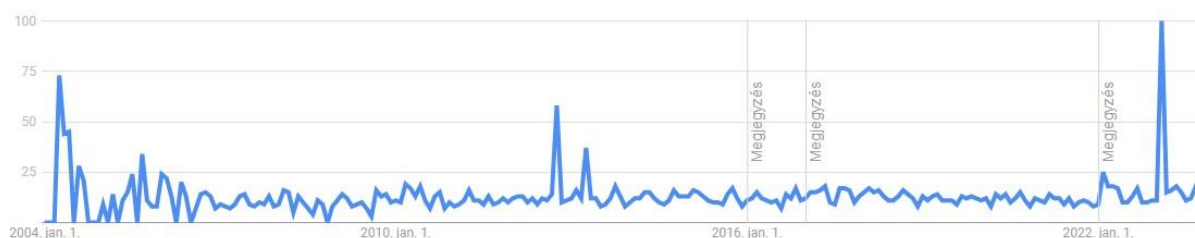
6. ábra – Az USA egyik katonai ballonja

jövőben hangsúlyos helyet kaphat a mi terveink 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 agrártechnológiai célokra nem alkalmazhatóak. Az ilyen irányú kutatások adatai a projektem szempontjából nem hasznosíthatóak. 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 leelőtt 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 általunk tervezett és működtetett ballon jelenleg önálló repülésre, adatgyűjtésre és kommunikációra képes. Olvashatnak a rendszer felépítéséről, az egyes részegységek működéséről és a munka fázisairól.

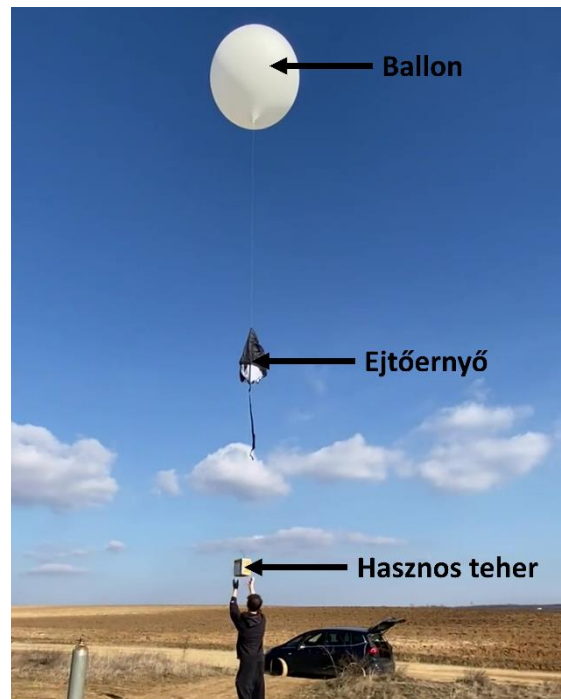
Megnevezés	Paraméter
Hasznos teher mérete	20x25x25 cm
Hasznos teher tömege	1424 g
Hasznos teher falvastagsága	3 cm
Ballon tömege	600 g
Felhajtógáz	2,8 m ³ hidrogén
Kötél hossza	2,4 m
Fedélzeti rendszerek feszültsége	max. 5 V
Akkumulátor kapacitása	22500 mAh
Elsődleges kamera felbontása	4608 x 2592 pixel
Elsődleges kamera látószöge	66°
Infravörös érzékelési tartomány	700-1000 nm

8. ábra – A saját rendszer legfrissebb kész verziójának paraméterei

A ballon két fő részre tagolható. Egyrészt a földi vezérlőegységre, másrészt magára a repülő szerkezetre. A vezérlő képes kommunikálni a szondával, 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.

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. Mi a repülések után összeszedjük a teljes eszközt, egyrészt a rendszer így üzemeltethető gazdaságosan, másrészt kísérleteinkkel így nem szennyezzük a környezetet. A ballonba jelenleg hidrogéngázt töltünk, de kísérleteztünk 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 Meteorológiai Szolgálat és számos nemzetközi projekt is. Magunk részére pedig kötelező érvényűnek tekintjük az OMSZ kérésünkre rendelkezésünkre bocsátott szabályzatát a biztonságos használat érdekében. A ballonba töltött mennyiség kiszámításáról a repülésről szóló fejezetben olvashatnak részletesebben.



10. ábra – Az eszköz felépítése



9. ábra – Az ejtőernyő

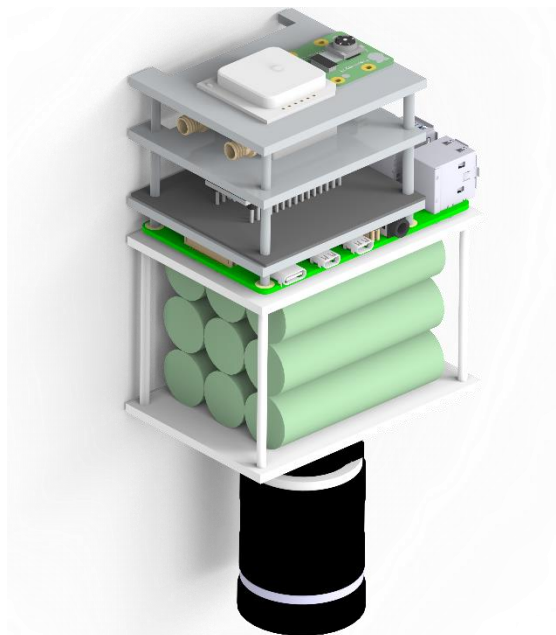
A ballon a hasznos terhet emeli a magasba, ez egy szigetelt doboz, melyben az elektronikus eszközök találhatóak. A rakomány egy többszálú vékony kötél segítségével kapcsolódik a ballonhoz, ez már alkalmazott kísérleti távtartók segítségével minimalizálja a ballon forgását. Ez megfelel a törvényi előírásoknak. [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 – később magát az eszközt – rögzítettünk és megvizsgáltuk, hogy mennyire képes visszafogni a szabadesést. A kísérlet eredménye az, hogy felszíni nyomáson az ejtőernyő kb. 5,5 m/s sebességre lassítja a süllyedést. A tesztről készült videót egy fizikai elemzésre alkalmas szoftverben értékeltük ki. [21] Az ábrán a szürkületkor elvégzett kísérletről készült videó egyik képkockáját láthatják. A tesztet azért végeztük ebben az időpontban, hogy ne zavarjuk az egyébként népszerű kilátót meglátogató turistákat. Az ejtést 22,6m magasságból végeztük el.



13. ábra – A ballon a kidurranás pillanata után

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. A lassú süllyedés hátránya, hogy az oldalirányba megtett távolság megnő, mivel több időt tölt az eszköz az erősen szeles zónákban, a gyors süllyedés pedig kárt okozhat a felszínen. A kimért



12. ábra – A legújabb hasznos teher korábbi 3D modellje



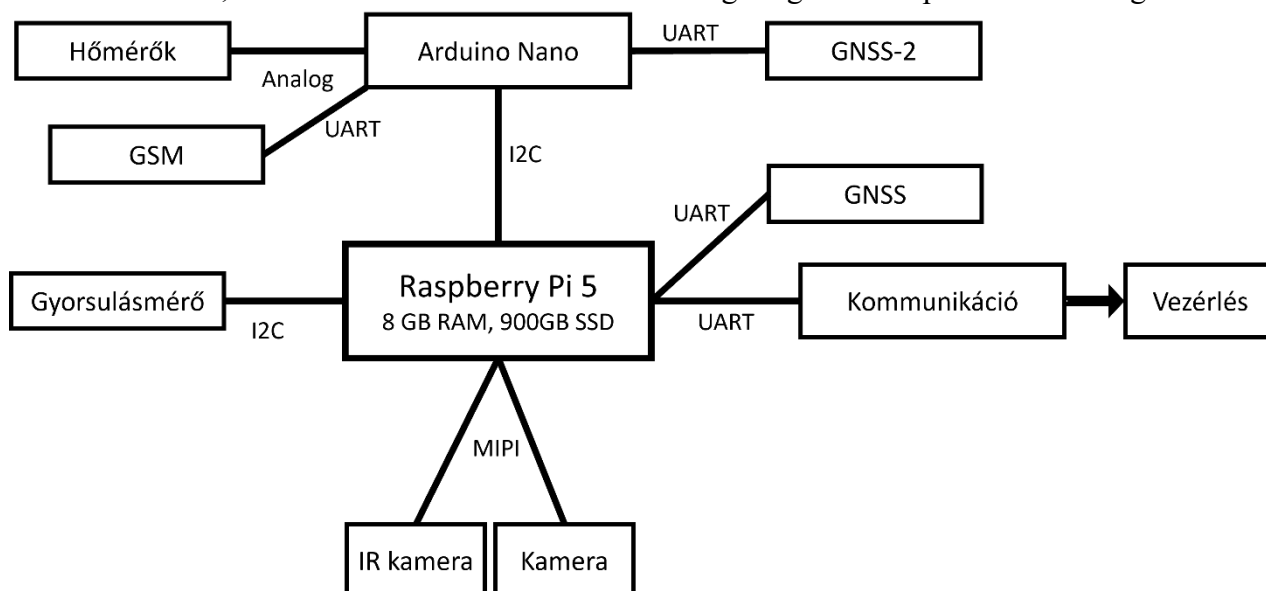
11. ábra – Ejtőernyő tesztelése (szoftver [21])

5,5 m/s sebességű földet érés biztonságosnak mondható, nem okoz kárt a felszínen, illetve az eszköz sem sérül, ugyanakkor elég gyorsan áthalad a szeles zónákon.

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.

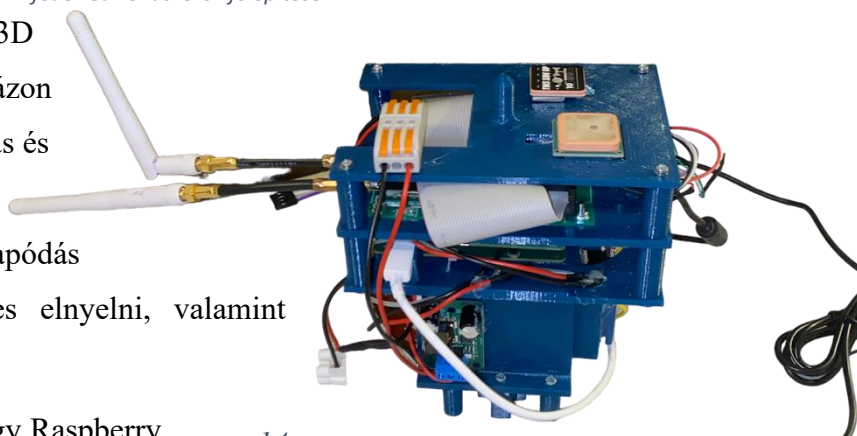
Elektronika

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



15. ábra – A fedélzeti rendszerek felépítése

A rendszerek egy 3D nyomtatással készült PET-G vázon helyezkednek el, melyek a hőeloszlás és az eszköz kompaktágát hivatottak elősegíteni. Emellett a váz a becsapódás energiájának nagy részét is képes elnyelni, valamint stabilan tartja a kamerákat.



14. ábra – A hasznos teher belső felépítése

A vezérlés központi eleme egy Raspberry Pi 5 számítógép, mely összesíti az adatokat és kommunikációt végez a földi vezérlővel. A számítógéphez I2C kapcsolaton keresztül csatlakozik egy Arduino Nano ATmega 328P mikrovezérlő, mely az analóg hőmérők és a másodlagos GNSS modul adatait gyűjti össze és

továbbítja a Raspberry Pi-hez. Az Arduino-n csupán az adatok rendezése, és előzetes ellenőrzése történik. Az I2C buszhoz csatlakoznak egyéb szenzorok is, melynek adatait a mikrokontroller és a Raspberry Pi számítógép is eléri (pl.: gyorsulásmérő, nyomásmérő).

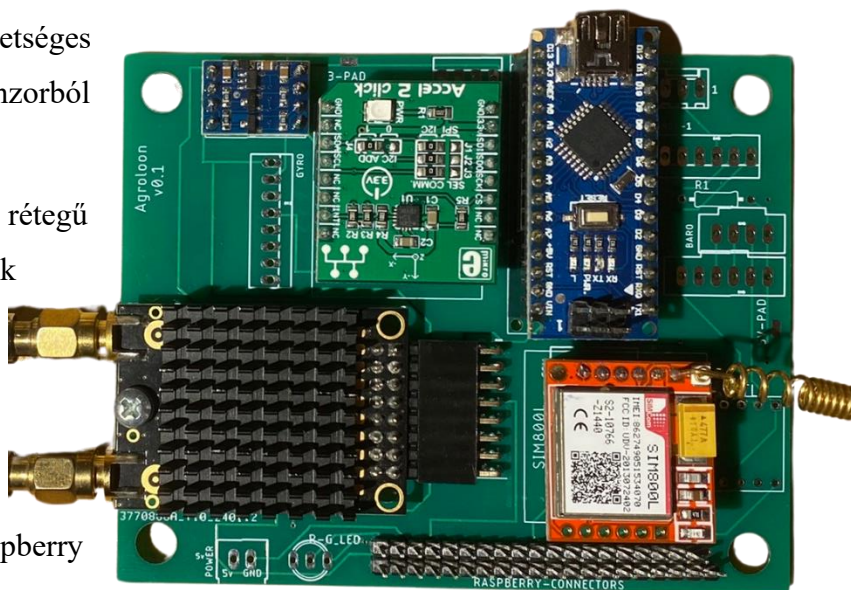
A hasznos teher egyik legfontosabb eszköze a GNSS helyzetmeghatározó szenzor, melyből kettő kapott helyet a fedélzetén. Az elsődleges megoldás a Goku GM10 Pro modulja [22], mely igen nagy pontosságú, beépített antennával rendelkezik és a tapasztalatok alapján magas energiafogyasztással működik. A magasságot, a hosszúsági és szélességi körök alapján megadott pozíciót és a ballon sebességét is ismeri, és továbbítja a Raspberry Pi felé soros kapcsolaton keresztül, UBX formátumban. A másodlagos megoldás egy Ublox Neo 6m GY-GPS6MV2 modul. A másodlagos szenzor gyenge pontja volt, hogy az antenna mechanikailag nem tartós csatlakozón U.FL-en keresztül csatlakozik a modulhoz. Ez sok esetben eredményez kontakthibát, mely a rádiótechnikai eszközökben megengedhetetlen. Ezt a hibát doboz előnyös elrendezésével orvosoltuk, és így megfelelően működött az eszköz ebből a szempontból.



16. ábra – A hasznos teher szigetelődoboz

A külső és a belső hőmérséklet mérésére a legújabb verziókban DS18B20+ analóg szenzorokat használtam, melyek működését a szélsőséges időjárási viszonyok sem befolyásolják. A szenzor $\pm 2^\circ\text{C}$ hibahatárral operál, azonban az elektronikai eszközök hőmérsékletének felügyeletére és a szigetelés hatékonyságának mérésére megfelelnek. Ezen eszközök is az Arduino Nano-hoz csatlakoznak, itt matematikai összefüggések segítségével lehetséges a hőmérséklet kiszámítása a szenzorból érkező feszültségből.

A részegységek egy két rétegű nyomtatott áramkörön kaptak helyet, ez egyrészt helytakarékos, másrészt üzembiztos megoldás. A saját tervezésű PCB-hez egy szalagkábelrel csatlakozik a Raspberry



17. ábra – A saját fejlesztésű nyomtatott áramkör a fontosabb modulokkal

Pi számítógép, a többi eszközt pedig forrasztással kötöttük össze a panellal.



18. ábra – A ballon akkumulátora

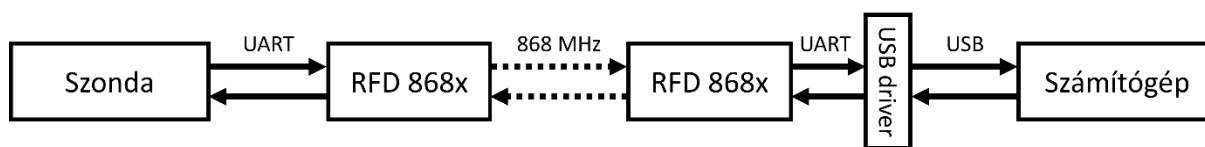
A ballonnak repülés közben önálló áramforrásról kell működnie órákon keresztül, így akkumulátort is szükséges rajta elhelyezni. Ez a ballon legnehezebb része, körülbelül 700 g-os tömegével. Panasonic NCR-18650 lítium-ion cellákból, ponthegeztéses módszerrel szereltük össze az egységet, mely így stabil, ill. a biztonsági áramkörök 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 csúcst. 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. Az áramforrás ezért saját 3D nyomtatott védődobozt kapott, melyet szigetelőanyaggal egészítettünk ki. A továbbiakban számolni kell azzal, hogy az akkuk az átlagos felhasználáshoz képest gyorsabban amortizálódnak [23]. 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 antennákhoz. 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. Ezt a rendszert egy 3D nyomtatott PLA dobozban helyeztük el, valamint folyamatban van egy nyomtatott áramkör fejlesztése a felszíni egységekhez is.

Kommunikáció



19. ábra – A ballon kommunikációs rendszerének felépítése

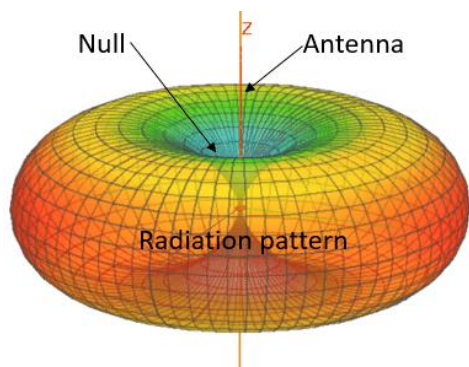
A rendszer egyik legfontosabb eleme, hogy a levegőben levő eszköz képes a földi irányítással folyamatosan kapcsolatban lenni. Így nyomon követhető a ballon útja, valamint az adatokat is képes a felszínre továbbítani.

A kommunikáció fejlesztése során több rendszert és megoldást is teszteltünk. A fő elvárás, hogy a hatótávolság nagy legyen, 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 valamelyikén működhessen a rendszer. A sávszélességgel kapcsolatban nem volt konkrét elvárásunk. 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 választottuk. Előnye, hogy előre elkészített szabványos csomagokon keresztül lehetséges az adattovábbítás, nem kell saját formátumot készíteni az eszközhöz.

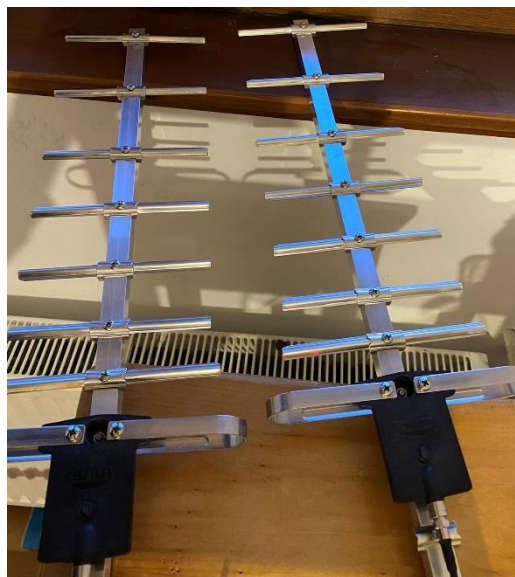


20. ábra – A kommunikációs modul



22. ábra – A dipólusú antenna karakterisztikája

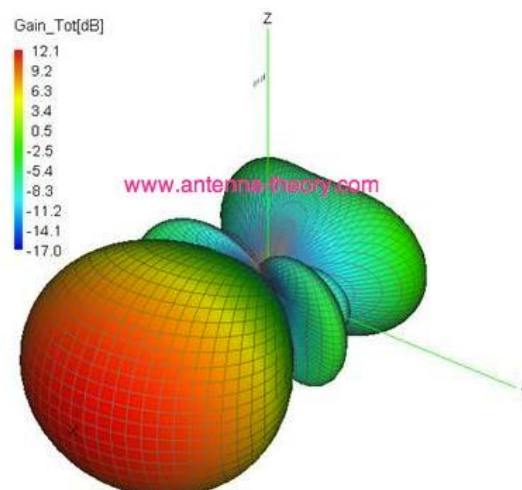
A hatótávolság szempontjából kiemelt fontosságú az antennák karakterisztikája és egyéb tulajdonságai, így ezek kiválasztását is elemzések előzték meg. A magasban lévő eszközön fontos, hogy a jel minden irányban egyformán erős legyen, vagyis nincs lehetőség irányított antenna használatára. A modul képes 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, mivel a ballon a repülés és ereszkedés közben minden tengelye mentén átfordulhat. Az antenna erősítése azonban 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 használunk, itt is kihasználva a két csatlakozó nyújtotta előnyöket. Az antennák irányítottak, kb. 20°-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 hozzávetőleges helyzetét is elegendő ismerni. Már dolgozunk az automata, autó tetejére szerelhető antenna mozgató mechanikán, azonban jelenleg az antennát még kézzel kell irányba állítani. Ez a legtöbb esetben nem jelentett nehézséget, mivel a jel akár 50°-nál nagyobb szögben is megfelelő erősségű.



21. ábra – A felszínen használt yagi antennák

Kommunikációra a már említett MAVLINK keretrendszert használom. [24] Ez egyrészt a modulomban beépített támogatással rendelkezik, másrészt a jól bejáratott protokollok legtöbb

esetben megbízhatóbbak, mint egy saját rendszer. A MAVLINK egy drónos kommunikációs keretrendszer, mely támogatja a telemetria, képi és egyéb állapotjelzők továbbítását. Emellett van lehetőség teljesen testreszabott adatsomagokat is küldeni, melyben a ballonra specifikus adatokat tudom továbbítani a felszínre. A rendszer fél másodpercenként továbbítja a felszínre a telemetria 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, vagy egyes al folyamatokat, mely hasznos lehet esetleges összeomlás esetén (erre eddig nem volt példa éles repülésen). A felszínen a beérkező adatokat a rendszer megjeleníti grafikus és szöveges formában is.

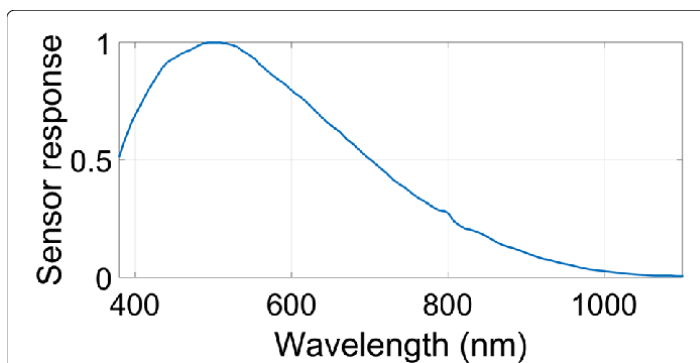


23. ábra – A yagi antenna karakterisztikája

Képkalkoló rendszer

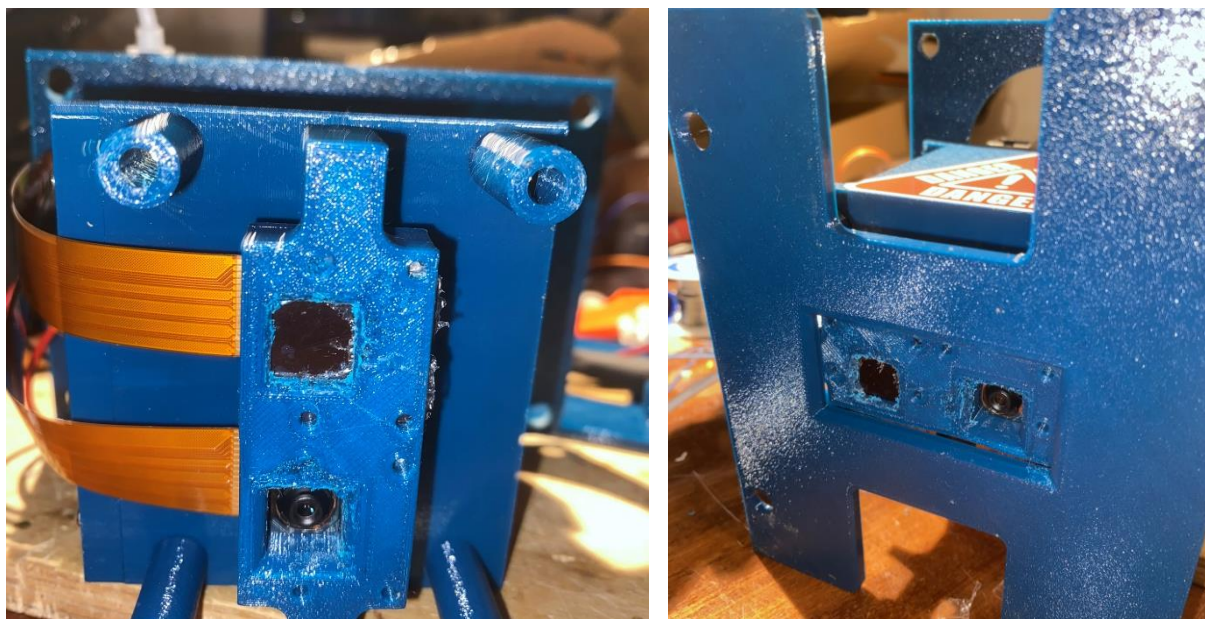
A legújabb, negyedik indítás során használtuk a legjobb minőségű kamerarendszert. A korábbi ballonok gyenge minőségű kamerával indultak, hiszen az előző repülések során a kommunikációs és egyéb rendszerek tesztelésére fordítottuk a legnagyobb hangsúlyt.

A jelenlegi kamerarendszer két, Raspberry Pi kamera v3-as modellből áll, az egyik egy általános modell, míg a másik nem tartalmaz színszűrőt. A kamerákban található Sony IMX708-as szenzor képes érzékelni a közeli infravörös (NIR) tartományt, így az általános RGB képek elkészítéséhez NIR blokkoló, a közeli infravörös képek készítéséhez NIR áteresztő, és RGB blokkoló szűrőt használtam. A repülés során a kamerarendszer a látható fény tartományában és a közeli infravörös (700-1000 nm) tartományban dolgozott. A két kamerát egy 3D nyomtatott tartóra



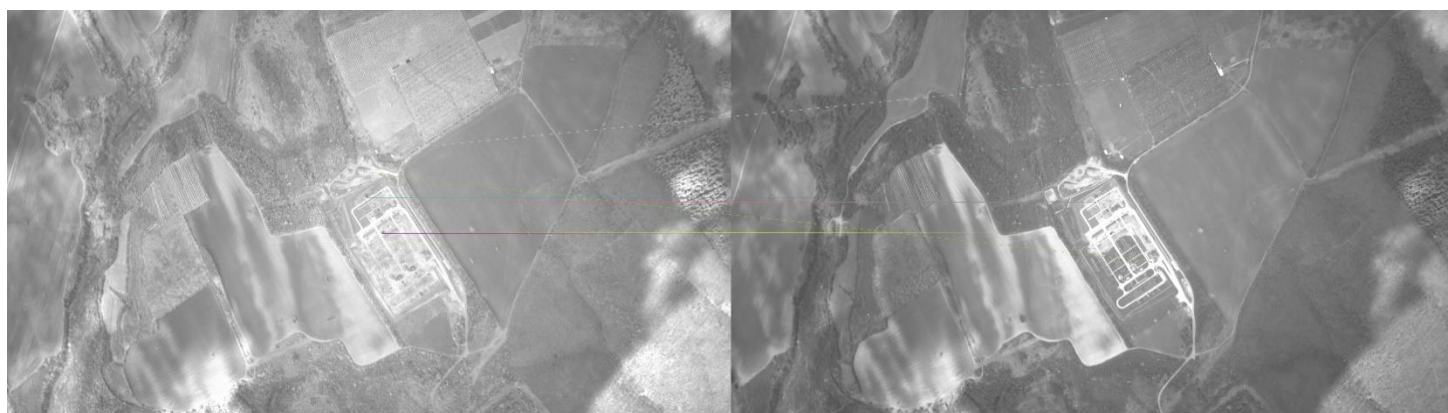
24. ábra – A használt kamera IMX708 szenzorának érzékenysége a hullámhossz függvényében [35]

rögzítettem, majd szorítócsavarok segítségével kalibráltam azzal a céllal, hogy egy irányba nézzenek. Az alkalmazott megoldás egy igen gazdaságos opció a multispektrális képalkotásra.



26. ábra – A kamerarendszer felépítése

Az elemzésekhez használható multispektrális képeket tehát két külön kamera képéből kell összeállítani. Ez annak ellenére egy igen bonyolult folyamat, hogy a kamerák a lehető legpontosabban egy irányba néznek, és a képek majdnem teljesen egy időben, párhuzamosan készülnek el. Az eszköz forgása és oldalirányú mozgása miatt azonban a két kép elcsúszása egymáshoz képest ronthatja az elemzések pontosságát, így ezt utólag, szoftveresen kell korrigálni. Ennek során egy gépi látásra épülő modell segítségével a képek kulcspontjait azonosítom, majd ez alapján készül el a négy csatornás multispektrális kép. A fedélzeti szenzorok adatai alapján a rendszer a képeket automatikusan el tudja helyezni a térképen is, ez alapvető fontosságú az elemzések hasznossága szempontjából.



25. ábra - Az infravörös és látható fény tartományában készült érzékelések összesítése a CV2 kulcspontkereső modellje alapján

A ballon orientációjának megfigyeléséhez egy oldalsó kamerát is elhelyeztünk az eszközön, mely gyengébb minőségű, és kevésbé hasznos, de annál szebb képeket készített a

harmadik repülés során folyamatosan. A kamera képeiből összeállított videót a YouTube videómegosztó platformon megtekinthetik. [25]

Az előző repülések során a legújabb rendszer másodlagos kamerájához hasonló USB-s webkamerákat használtam az elemzendő képek elkészítésére is. Ezek is használhatóak korlátozottan elemzésekre, de a képalkotó rendszer fejlesztése nagy mérföldkő a projekt fejlődésében.

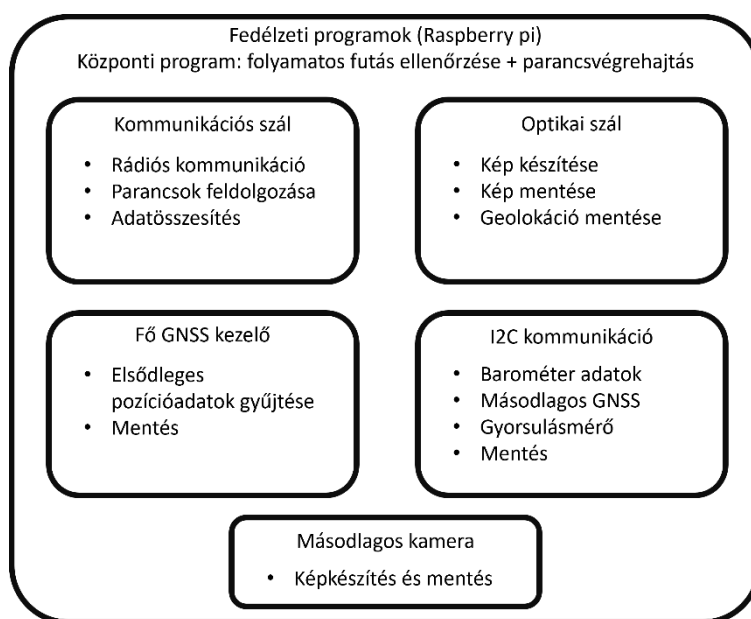
Szoftverek

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 lecseréljük C++ Qt keretrendszerben készített grafikus megjelenítőre. [26]

A ballon fedélzetén futó rendszerek működése kulcsfontosságú, 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.

A fedélzeti számítógépen futó programok 5, egymástól elkülönítve futtatott folyamaton keresztül végzik a feladatukat. Ennek köszönhetően egy alrendszer esetleges meghibásodása esetén is képes a többi egység tökéletesen működni. A folyamatok külön kezelik az elsődleges kommunikációt, a fő GNSS modullal való kommunikációt, a szenzorokkal és a mikrovezérlővel való



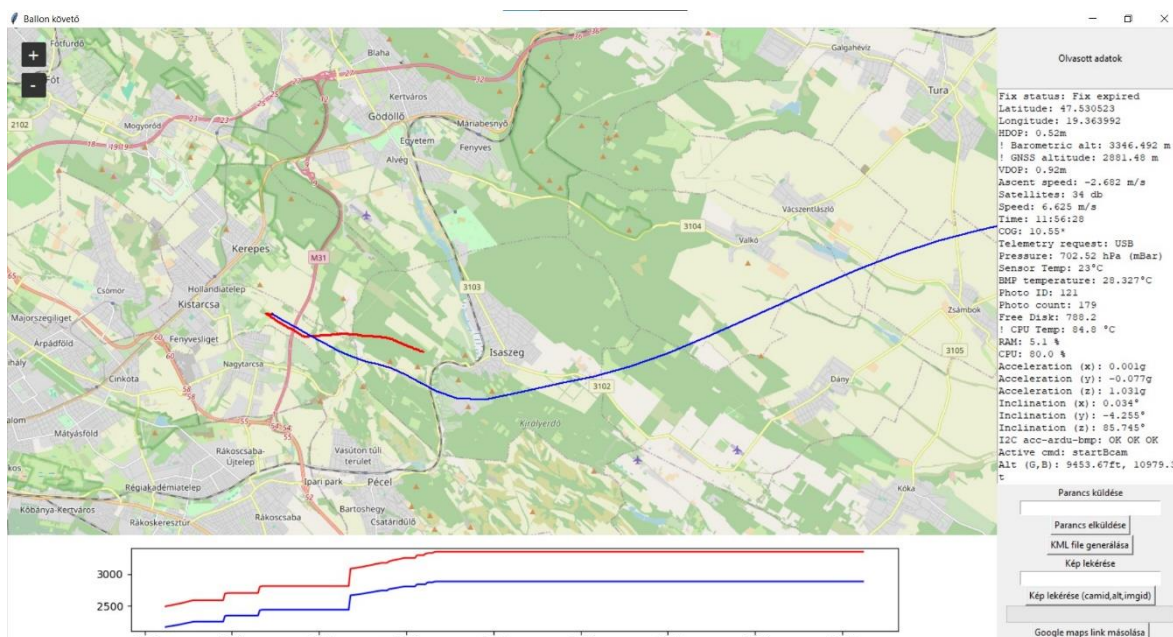
27. ábra – A fedélzeti szoftverek

kommunikációt, a fő kamerarendszert, illetve a másodlagos kamerát.

Ezek közül három folyamat minősíthető kulcsfontosságúnak. Az első kezeli a kommunikációt a felszínnel, valamint a továbbítandó adatok összegyűjtését a többi alprogramtól. A második az elsődleges GNSS modulból érkező adatok feldolgozásával foglalkozik, mely a rendszer helyzetének ismerete miatt kiemelten fontos. A harmadik kulcsfontosságú program az elsődleges kamerát kezeli. A kód a két kamerával egy időben készíti el a két képet.

Két másik folyamat kezeli az egyéb szenzoroktól és az Arduino Nano-tól érkező adatok feldolgozását, a másik pedig a másodlagos kamera képalkotását.

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 telemetria 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 elvetettük. Van lehetőség analóg kép továbbítására is, erre azonban az esetleges jelzavarok okozta minőségromlás miatt egyáltalán nincs szükség.



28. ábra – A vezérlőprogram képernyőképe

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 jelenítjük meg grafikusán, csupán szövegesen. A koordináták értelmezése ránézésre egy picit nehézkes, így a telemetriát egy térképen megjelenítettem. Emellett az alsó részen van lehetőség parancsokat továbbítani a fedélzetre. A több, mint 20 ilyen utasítás segítségével képesek vagyunk a rendszer működésének befolyásolására a felszínről is az automata megoldások mellett.

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

Repülés

Az alábbiakban szeretnénk bemutatni, hogy hogyan zajlik egy repülés, illetve bővebben bemutatnánk az eddigi eredményeket.

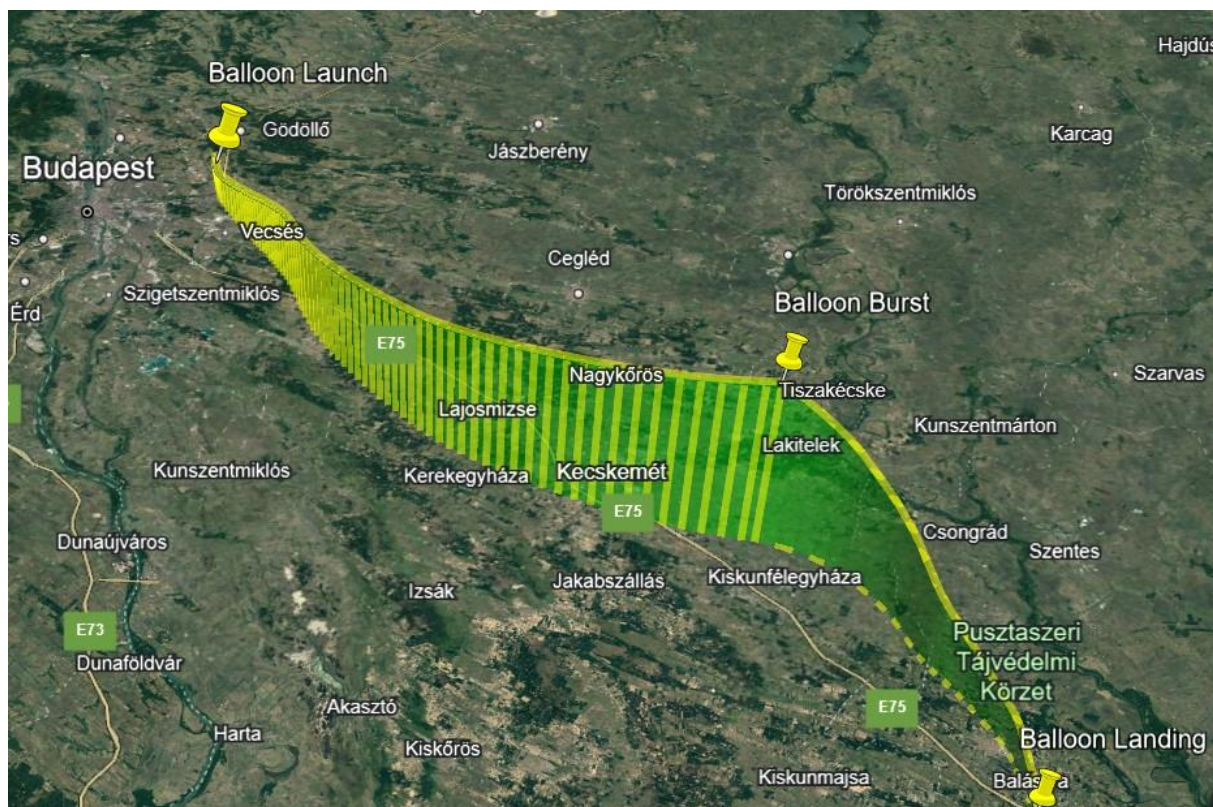
Egy repülés végrehajtása előtt a legfontosabb, hogy a Légügyi Hivatalnál kötelező ennek a bejelentése. Ez a könnyű kategóriába tartozó személyzet nélküli ballonok esetén bejelentési kötelezettséget jelent. A benyújtott adatok alapján a légitert használó járműveknek a légiirányítás megadja a megfelelő 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 helyének kijelölése során fontos szempont.

A repülés során a ballon az időjárás viszontagságaira 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 betartandók, de nem törvényben előírt kötelezettségek. A pontos földfelszíni időjárást csupán az indítást megelőző órákban lehetőség biztonsággal előrejelezni, ugyanakkor a magaslégköri szélviszonyok jellemzően ennél jóval kiszámíthatóbbak, így a szonda tervezett repülési pályája hatékonyan tervezhető. [27]



29. ábra – A második indítás alatt tapasztalható erős szél



30. ábra – Az első repülés tervezett útvonala

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. A ballonba eresztett gáz mennyisége alapján pontosan meghatározható a ballon szakadási magassága. 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. [28] Fejlesztés alatt áll egy saját tervezőszoftver, melynek segítségével repülés közben akár folyamatosan, az élő adatok figyelembevételével követhetjük és tervezhetjük előre az útvonalat.

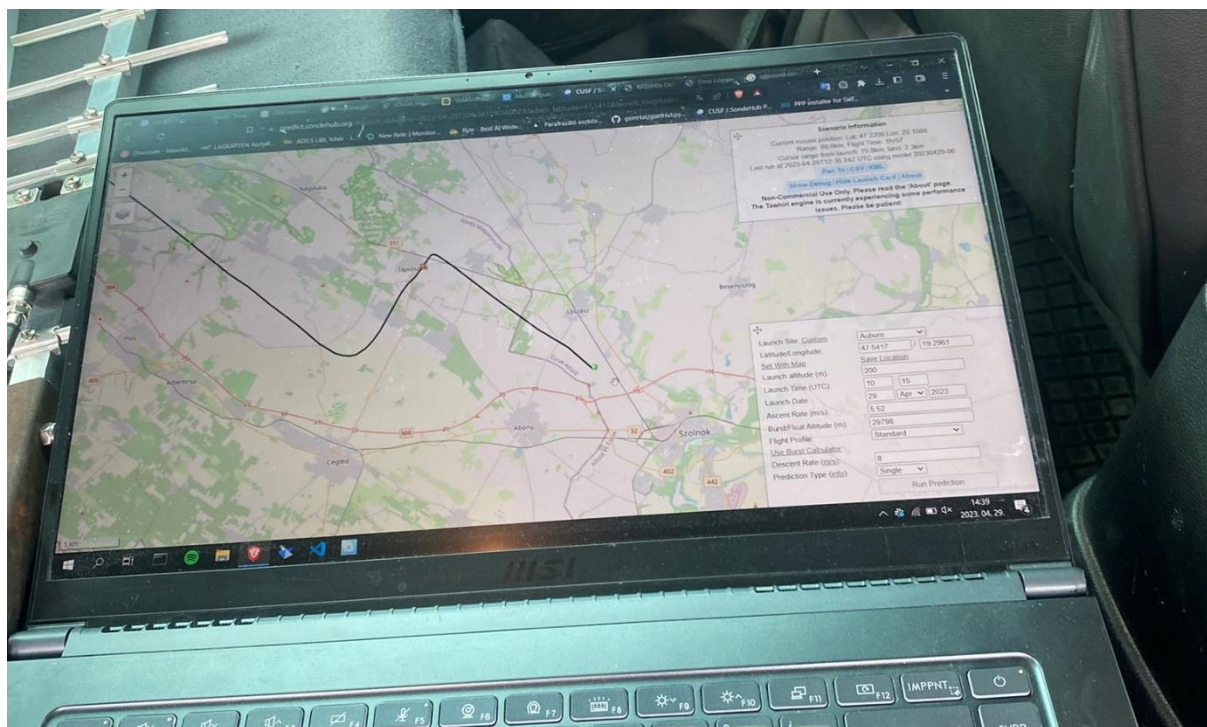
A ballonba töltendő gáz mennyiségét űrmértékben számíthatjuk, azonban a töltéskor csak a gázpalack nyomását, illetve annak változását ismerjük. A megfelelő mennyiség számítására nincsenek kész rendszerek, így elkészítettük a saját, minimális grafikus felülettel rendelkező kalkulátorunkat, mely képes kiszámítani a

31. ábra – A szükséges gáz mennyiségét számító program

szükséges nyomásváltozást a palackban, adott mennyiségű gázbetöltés igényére. A kalkulátor az egyesített gáztörvényt alkalmazza a kieresztett gáz térfogatának meghatározásához a nyomás változása alapján.

Eddig négy repülést hajtottunk 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 nem működött ez a megoldás. A hasznos teherbe egy mobiltelefont is beépítettünk egy gyermekek követésére alkalmas applikációval, azonban ez a rendszer sem működött a saját SMS-küldő rendszer mellett. A becsült útvonalból és a mobilhálózati lefedettségi térképek alapján arra következtettük, hogy mobil lefedettség nélküli területen érhetett földet az eszköz. Ennek a hibának köszönhetően a tervezettnél korábban kifejlesztettük a kommunikációs rendszert annak érdekében, hogy a szondával folyamatosan legyen lehetőség kapcsolatot tartani repülés közben. A második indítás napján rossz idő volt, így egy nappal halasztottuk a repülést. Aznap, a kb. 30 km/h-s felszíni szél ellenére megkíséreltük az indítást. Az indulás előtt azonban a ballon kidurran, így az indítás sikertelen lett. Ebből a megfelelő következtetéseket levonva szigorítottuk az indításra alkalmas időjárás kritériumait.

A harmadik 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 valószínűsíthető, esetleges külső behatás miatt, például egy nagyobb kilengés után. Ennek alapján az USB kapcsolatot integrált áramkörti kommunikációs megoldásokra (I2C, SPI, UART) cseréltük 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 később is reálisnak tekinthettük. A repülés utolsó szakaszában, az ereszkedés során a felszíni akadályok miatt megszakadt a rádiós kapcsolat is. 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, háromszögeléses 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.



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

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

A negyedik repülés során az eszközön több értékes technológiai eszköz helyett kapott, emiatt, illetve a biztonságos begyűjtés érdekében a kommunikációs és helymeghatározó rendszert duplikáltuk. Az indítás során egy hibásan rögzített gyorskötöző egy ballont kilyukasztott, azonban a következő ballon már sikeresen a magasba emelkedett. A felszínen körülbelül 15 km/h szélsősebesség nehézséget jelentett, a többi indításra bejelentett napon azonban ennél is rosszabb körülményeket jelzett előre a Meteorológiai Szolgálat. Emiatt a nem tökéletes körülmények ellenére az indítás mellett döntöttünk.



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

A repülés során közel folyamatosan sikerült kapcsolatban maradni az eszközzel, néhány időjárási okokkal indokolható kimaradáson kívül. A repülés rendben ment, azonban a vártnál hamarabb, kb. 5000 méteres magasságban megszűnt a kapcsolat a szondával, részben egy hibás autós útvonal választása miatt. A szondát a Tiszától keletre fekvő Újszentmargita térségében sikeresen begyűjtöttük, így a 600 GB adat elemzésével értékes információkhoz jutottam a további fejlesztésekhez.

A másodlagos GNSS kommunikáció nem az elvárásoknak megfelelően működött. A másodlagos helyzetmeghatározó rendszer rendszer a repülés során az emelkedés közben kb. 12 kilométeres magasságban letiltott – egyes, kevésbé hiteles leírások alapján a modul ballisztikus rakétának érzékelte a mozgást. Ráadásul a GSM modul a hálózatra csatlakozást hibásan végezte el, egy általam ismeretlen hiba miatt. Emiatt a másodlagos megoldás átdolgozására szükség van.

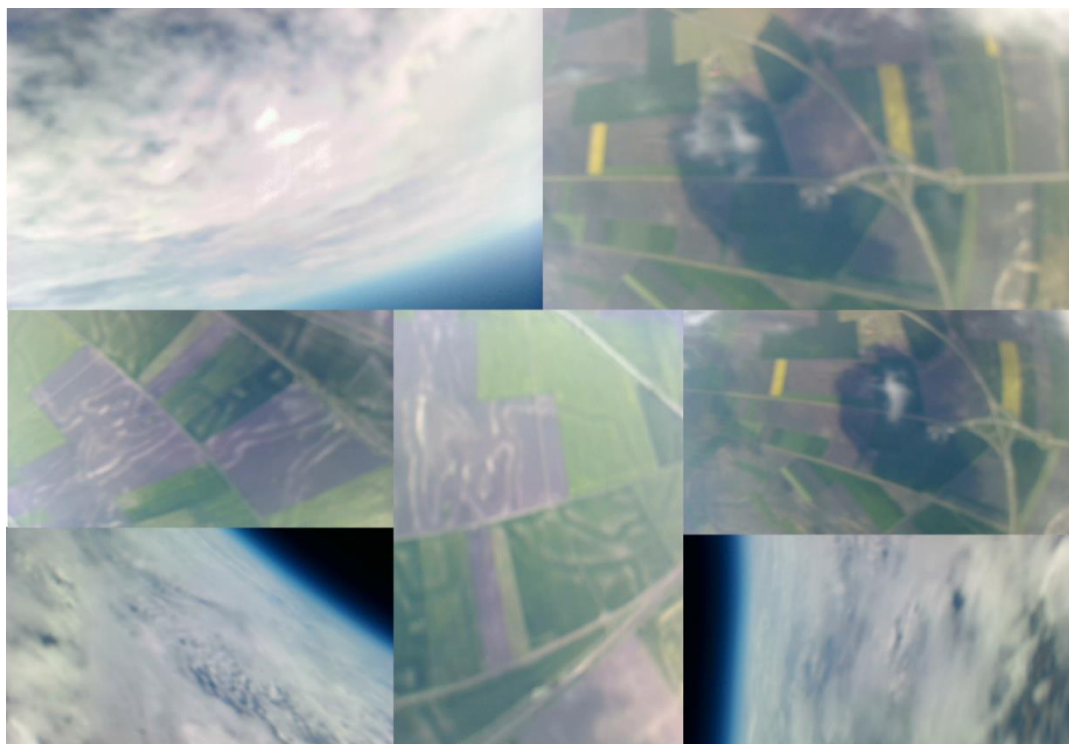
Képelemzés

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 második prototípusának a repülése már megtörtént. A képelemző szoftvereken a többi fejlesztéssel párhuzamosan, folyamatosan dolgozunk. A legfrissebb elemzések már hasznosíthatóak a mezőgazdaságban.

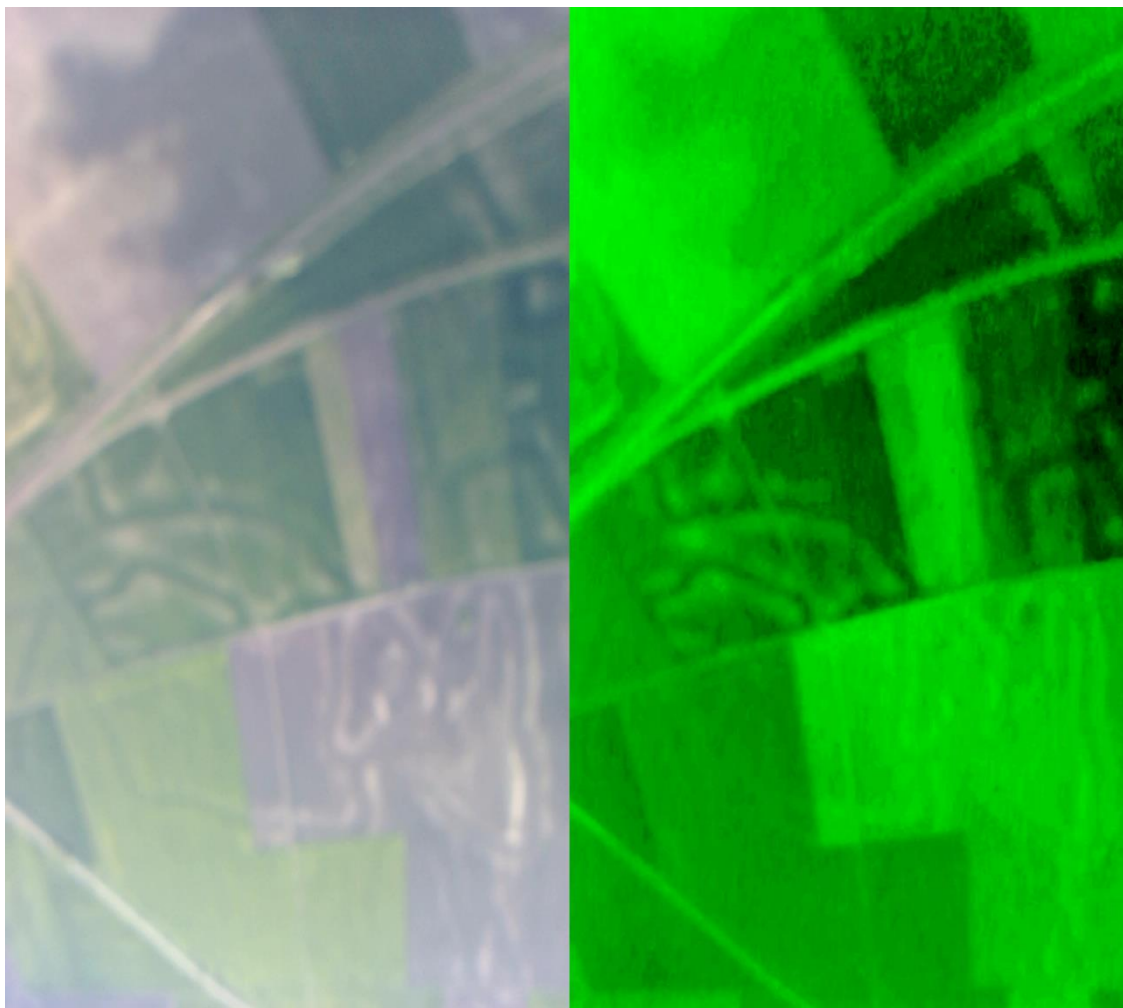
Elemzések a képalkotó rendszer első verziójának képeiből

A képalkotó rendszer első verziójában még nem rendelkezünk infravörös adatokkal, de már akkor is dolgoztam a jövőben rendelkezésre álló képek elemzésére is alkalmas rendszereken. A csupán a látható fény spektrumában elkészült 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. Ez a GRVI (Green and Red ratio Vegetation Index) néven ismert mutató. Hasonló eredményt ad, de jobban elválasztható a talaj háttérzajától, mint az NDVI, mely egy általánosabban használt érték. A GRVI hátránya, hogy nem tud teljeskörű, átfogó képet adni a növényzet állapotáról. [29] [30]



34. ábra – A harmadik repülés közben készült képek egy része

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 tartjuk, hogy saját rendszerrel is rendelkezünk, mivel minél több adat áll rendelkezésre, annál jobb gépi látásra épülő algoritmusok alkothatóak.



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

Elemzések a képalkotó rendszer második verziójának képeiből

A legutóbbi repülésre fejlesztett kamerarendszer új lehetőségeket nyitott a képelemzések területén. Az elkészült képek elemzését a drónos és műholdas elemzések nyilvánosan elérhető tapasztalatait felhasználva végeztük el. A drónok rendszerint hasonló hullámhossz tartományban érzékelnek, mint a jelenlegi eszköz, a műholdak viszont jellemzően szélesebb spektrumot vizsgálnak.

Az elkészült képek 4608x2592 pixelesek, ez közel 12 millió képpontot jelent. A rendszer a szenzorból érkező nyers adatokat DNG formátumban menti. Ez semmilyen esetben sem tömöríti a képeket, illetve az elemzések során finombeállítások elvégzésére is alkalmas.

A magasból készült 4 spektrumú képeken számtalan elemzést lehet elvégezni, mi az alapötletnek megfelelően elsősorban a mezőgazdasági felhasználást helyeztük előtérbe. A mezőgazdasági szereplők részére az egyik legfontosabb mutató az NDVI érték, mely pixelenként veszi fel a -1 és 1 közötti értékét, ezt az ESA Copernicus programjában használt skála szerint ábrázoltuk. Ebből a gazdálkodók a növények vegetációjának mértékét ismerhetik meg, segítségével meghatározhatják az öntözés és a trágyázás optimális helyét és mennyiségét. A számítás a közeli infravörös és a vörös hullámhossztartományok felhasználásával történik, az alábbi módon:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Lehetőség van a már említett GRVI értékek számítására is. A számítása a vörös és a kék hullámhossztartományok használatával történik, az alábbi módon:

$$GRVI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED}$$

Meghatározhatjuk a területeken a vizek elhelyezkedését és méretét is, ehhez az NDWI értékeket számíthatjuk. Ez belvizek és árterek vizsgálatakor lehet hasznos. Segítségével a felhők szerkezetét is vizsgálhatjuk. A számításhoz a zöld és az infravörös tartomány használatával történik.

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

Emellett hamisszínes képet is előállíthatunk az összegyűjtött adatokból, ezt a növények sűrűségének és egészségének megállapításához használhatják a szakértők.

A rendszer képes továbbá a felhőket és a felhők árnyékát kiválasztani, ezzel elérhető, hogy ne adjanak hamis adatot az elemzések.

Fontos tudni, hogy az elkészült képek pontosan hol, melyik területről készültek. Ezt a fedélzeti szenzorok segítségével lehet megtenni. A beépített gyorsulásmérő és iránytű adatai alapján megállapítható az eszköz dőlése és iránya, ezek alapján az összes kép és elemzés elhelyezhető a térképen. Az elemzések így pontos helyszínhez köthetőek.

Néhány elkészült képet és elemzést megtekinthetnek a dolgozat végén.

Fejlesztés lépései

A ballon fejlesztése rendkívül munka- és időigényes, eddig kb. 2000 részemről befektetett munkaórával számolhatunk.

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, bár jóval egyszerűbb 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. 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 vesztésként 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



36. ábra – Az első indítás

hibával én magam is majdnem 20 munkaórnyi 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.

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 fordítottunk a repülési körülmények szimulálására, de a sikeres teszt közben is adódtak hibák, jelenleg pedig ezeknek a problémáknak a megoldása adja a legnagyobb feladatot számunkra.

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. Ehhez tervezünk drága rendszerek nélküli repüléseket is végrehajtani. Fontos továbbá a kamerarendszer folyamatos fejlesztése, itt például a nagyító optikával és pásztázásra alkalmas mechanikus megoldásokkal tervezünk kísérletezni.

A vízióink szerint a mi eszközünket fogják a mezőgazdasági területek monitorozására használni szerte a világban, amivel nagy mennyiségű élelem előállítása lehet hatékonyabb.



Összefoglalás

A fejlesztés eddigi, körülbelül egy éve alatt számos mérföldkövet teljesítettünk, az általunk épített eszköz megjárta a sztratoszférát, készítettünk fényképeket 25 km magasan. Emellett rengeteget tanultunk mind mérnöki, technológiai kérdésekben, mind pedig a csapatmunka fontosságáról.

A nehézségek megoldása számunkra kihívás, mely nagyon sokáig tud motiválni, emiatt választottuk hobbinak és munkának is a mérnöki világot. Ebben a projektben olyan problémákra keresünk megoldást, mely valós piaci igényeken alapul, emiatt a projekt célkitűzései bármikor változhatnak. Ez az amúgy is folyamatosan változó terveinket felboríthatja, megváltoztathatja – mi azonban továbbra is várjuk a kihívásokat, és állunk a feladatok elé.

A projektet folytatjuk, reméljük, hogy minél tovább sikerül eljutnunk a készülő szolgáltatásunkkal, és hogy végső soron növelhetünk a mezőgazdaság és erdőgazdálkodás hatékonyságán.

Köszönetnyilvánítás

Elsőként köszönjük a támogatást szerzőtársammal a családjainknak!

Köszönet Dr. Gábris Katalin 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!

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

Köszönjük a segítséget Tóth Tamásnak a kommunikációval kapcsolatos iránymutatásáért!

Köszönjük Bózsik Vilmosnak a 37. ábra – Édesapám a hidrogénpalackkal (Kertész Domokos) képalkotással kapcsolatos segítségét!

Köszönjük a Nemzeti Agrárgazdasági Kamarának és szakértőinek az igényekkel és lehetőségekkel kapcsolatos segítséget!

Köszönöm a Budapest Innovation Group tagjainak támogatását!

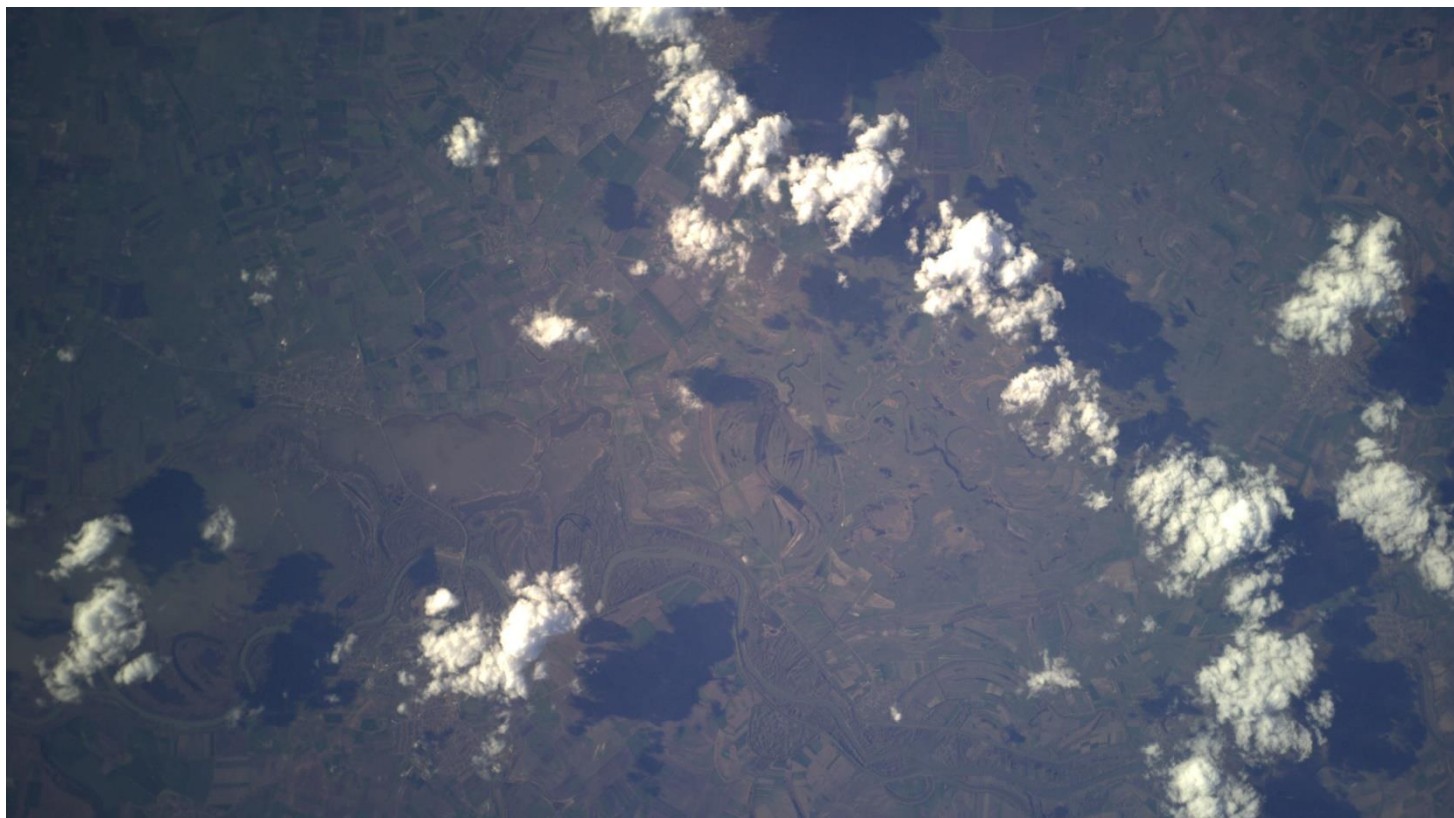
A projekt a Nemzeti Tehetség Program Nemzet Fiatal Tehetségei Ösztöndíj támogatásával valósult meg.



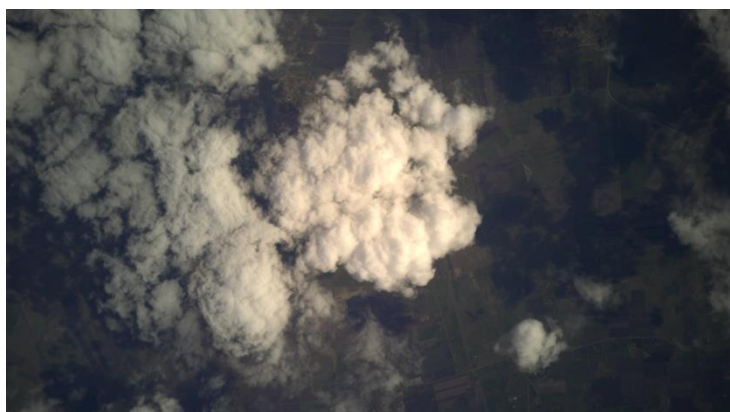
Elemzések képanyaga

A megfigyelések 2024. 03. 24-én készültek.

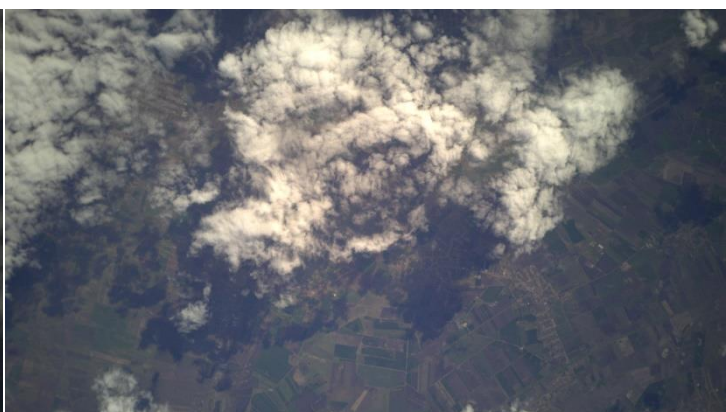
További példákért keressék fel az agroloon.com/demo weboldalt!



27450 méteres magasságban készült kép



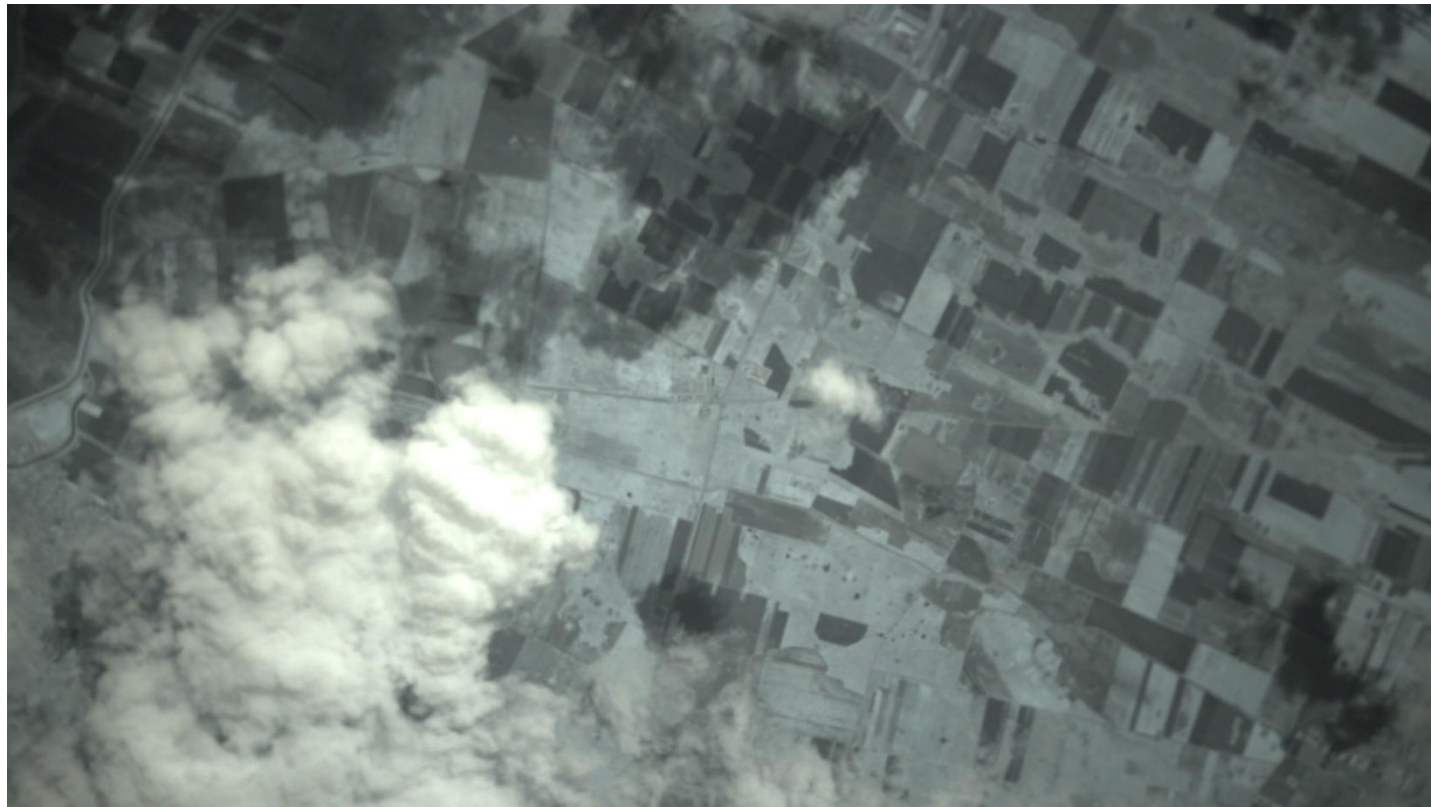
17800 méter magasságból készült kép



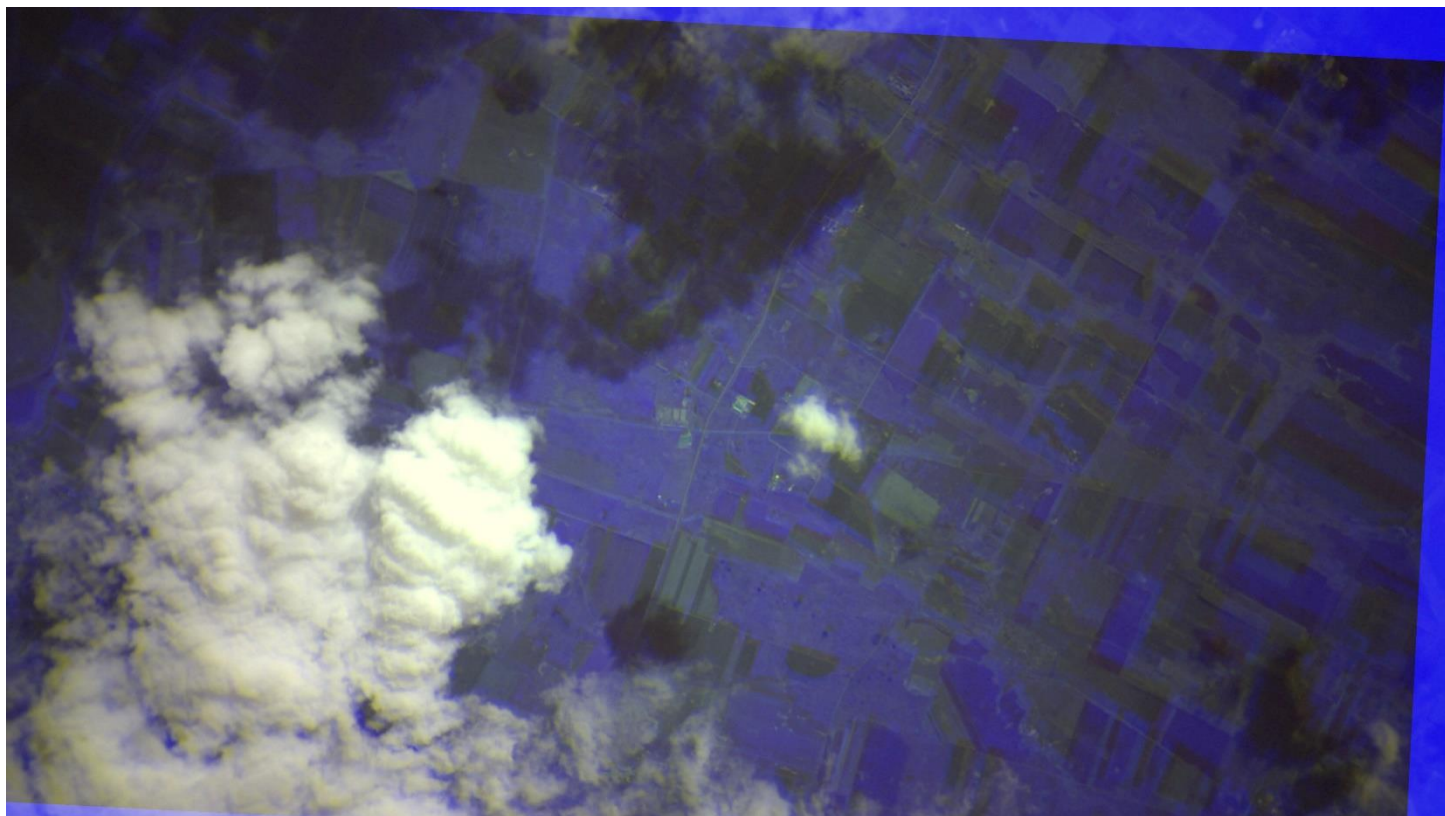
13400 méteres magasságból készült kép



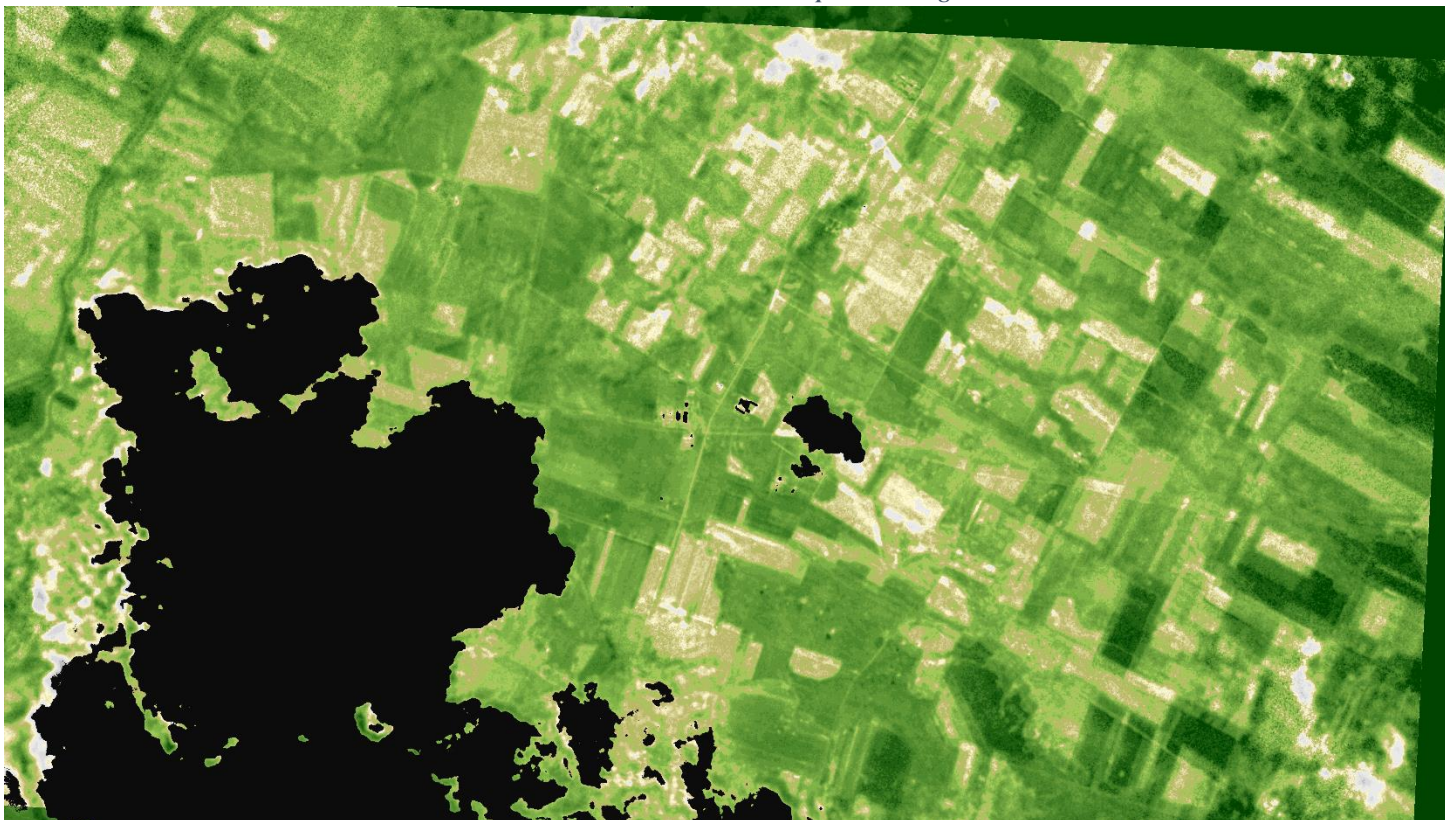
9850 méteres magasságból készült kép.



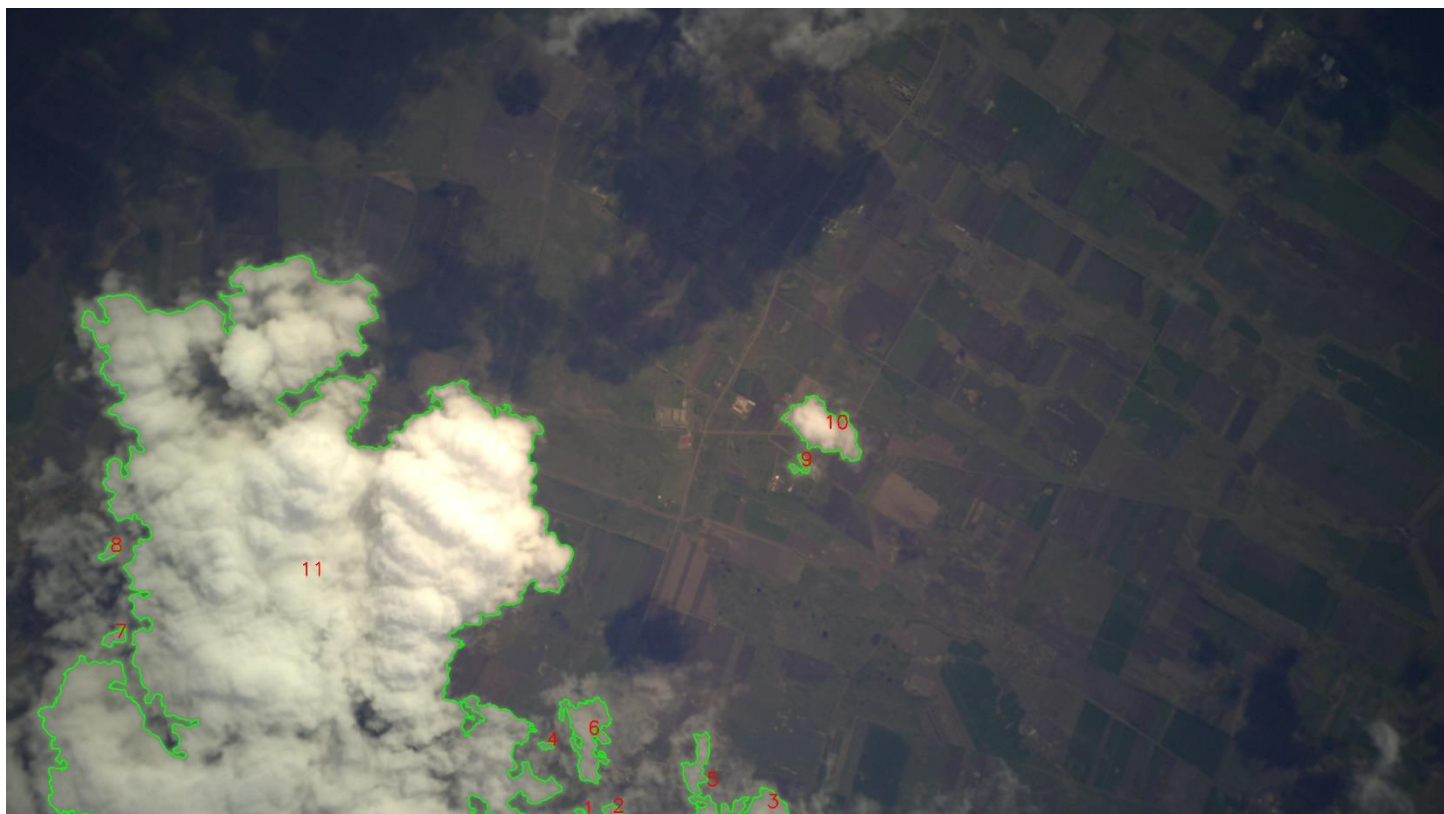
Az előző képhez tartozó közeli infravörös tartományban készült kép



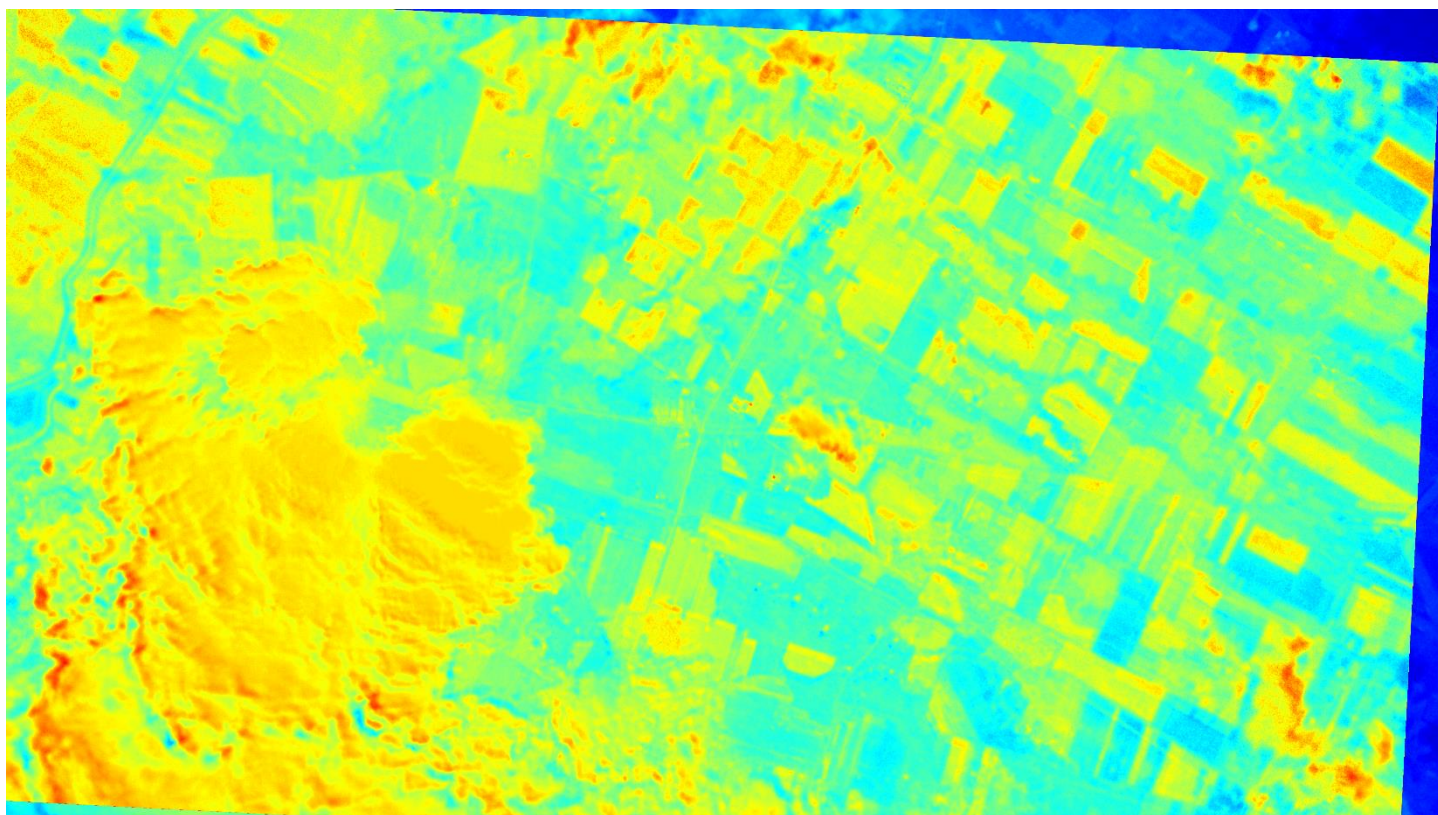
Hamisszínes kép, mely segít a felszíni területek kategorizálásában, illetve láthatóvá tesz olyan képződményeket, melyek az RGB képeken láthatatlanok. Az elemzésekhez a NIR és RGB képeket szükséges összeilleszteni.



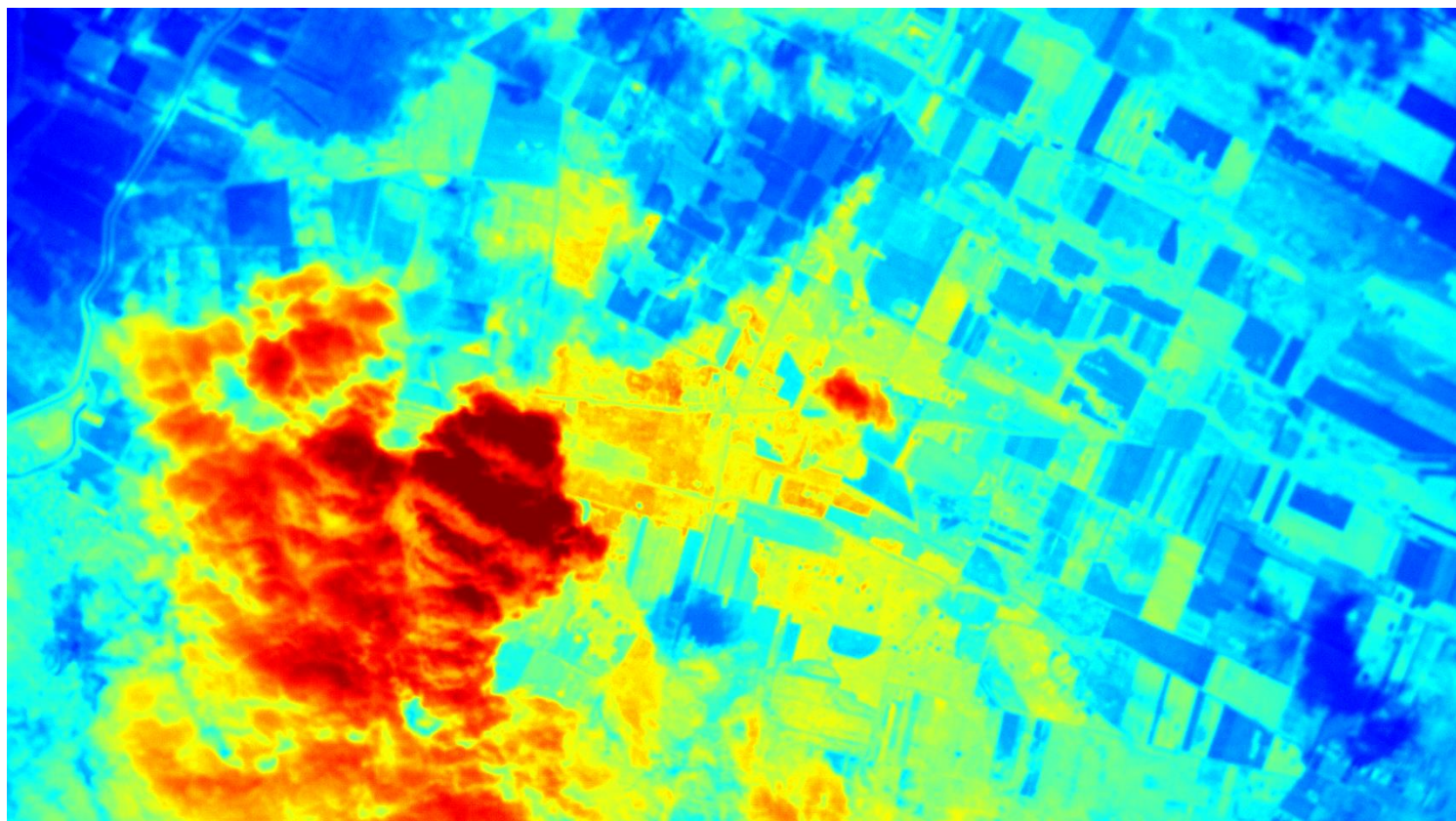
A normalizált vegetációs index (NDVI) az egyik legfontosabb mutató, mely a növények fotoszintetikus aktivitását mutatja. Az elemzett területen ezek az értékek magasabbak a sokéves átlagnál (met.hu/idojaras/agrometeorologia/). Az adataim egybevágnak a MET vonatkozó elemzéseivel. A kép szegélye az infravörös és látható fény tartományában készült elemzések elcsúszásából adódik.



A felhők azonosítása fontos feladat a hamis eredmények kiküszöbölése érdekében. Az NDVI térképen fekete színnel jelölt területek az algoritmus által felismert felhőket jelölik.



Az alábbi ábrán az NDWI értékeket ábrázoltam, ez a képen látható területek vízeségét mutatja.



Az alábbi ábrán a közeli infravörös fény visszaverésének intenzitását ábrázoltam a könnyebb értelmezhetőség érdekében.



Az ábrán a zöld-vörös vegetációs index (GRVI) értékeit ábrázoltam, ezen adatok az RGB információk alapján is hasznos információkat szolgáltatnak egy terület osztályozásához.

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 mérései*, 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] W. C. R. M. H. Douglas Brown, „<https://physlets.org/tracker/>,” [Online].
- [22] Flywoo, „Goku GM10 Pro,” Flywoo, [Online]. Available: <https://flywoo.net/products/goku-gm10-pro-v3-gps-w-compass>.
- [23] 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.
- [24] Dronecode, „MAVLink,” [Online]. Available: <https://mavlink.io/en/>. [Hozzáférés dátuma: 25 10 2023].
- [25] K. Domokos, „<https://youtu.be/2zTXyXRcggc>,” Agroloon, 27 03 2024. [Online].
- [26] „Qt,” [Online]. Available: <https://www.qt.io/>. [Hozzáférés dátuma: 25 10 2023].
- [27] „Cambridge University Spaceflight Landing Predictor - Leaflet Version,” [Online]. Available: <https://predict.sondehub.org/>. [Hozzáférés dátuma: 28 10 2023].
- [28] Sondehub, „CUSF,” [Online]. Available: <https://predict.sondehub.org/>. [Hozzáférés dátuma: 25 10 2023].
- [29] 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.
- [30] T. Motohka és K. Nishida, „A simple and robust method for remote sensing of phenology using green and red reflectance: GRVI-method,” 2009.
- [31] D. Kertész és L. Molnár, „Magaslégköri ballon fejlesztése,” in *BME TDK konferencia*, Budapest, 2023.
- [32] D. Kertész és B. Pál, „Magaslégköri ballon és képelemző rendszer fejlesztése mezőgazdasági megfigyelésekhez,” in *BME TDK konferencia*, Budapest, 2024.

- [33] „Sentinel-hub,” [Online]. Available: <https://www.sentinel-hub.com/index.html>. [Hozzáférés dátuma: 28 10 2023].
- [34] A. Mandal, „Stabilization and Trajectory Control of High-Altitude Balloons for Rockoons - A Review,” pp. 35-43, 2022.
- [35] P.-J. & T. J. B. & G. P. & R. Y. Lapray, „Energy balance in Spectral Filter Array camera design,” *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications.*, %1. kötet, összesen: %210.1186/s41476-016-0031-7., %1. szám-, pp. -, 2017.

Egyéb hivatkozások, források:

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

A dolgozatban D. Kertész L. Molnár Magaslégköri ballon fejlesztése földmegfigyelési feladatokra c. dolgozatát felhasználtam a legfrissebb kutatási eredményeim bemutatásának érdekében. A dolgozatban csak a saját eredményeimet mutatom be. [31] [32]

Képek forrása

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

