

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

Sugárzási anomáliák térképezése UAS- ra integrált Safecast szenzor segítségével

SZAKDOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK
TÉRKÉPÉSZ ÉS GEOINFORMATIKA SPECIALIZÁCIÓ

Készítette:

Katreiner Hédi

Témavezető:

Dr. Kovács Béla

egyetemi adjunktus

ELTE IK Térképtudományi és Geoinformatikai Intézet

Konzulens:

Dr. Horváth Ákos

egyetemi docens

ELTE TTK Fizikai Intézet



Budapest, 2022

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és célkitűzés	3
2. Elméleti alapok	4
2.1. Az UAV/UAS eszközök definíciója	4
2.2. A radioaktivitás és a sugárzás tulajdonságai	5
2.2.1. A radioaktivitás fogalma	5
2.2.2. A radioaktív bomlás típusai	6
2.2.3. A természetes radioaktív sugárzás forrásai	7
3. Korábbi kutatások	8
3.1. Gamma-sugárzás felderítésének és mérésének módszerei	8
3.1.1. Hagyományos sugárzásmérések	8
3.1.2. Drónról végzett sugárzásmérések	11
4. Vizsgált terület bemutatása	12
4.1. A kövágószőlősi uránbánya	12
4.2. A teszterület bemutatása	13
4.3. Az urán és tulajdonságai	13
4.4. Korábbi mérések a teszterületen	14
5. Módszertan	15
5.1. Használt eszközök és szenzorok	15
5.1.1. A drón/ UAS	15
5.1.2. A Safecast szenzor	16
5.2. A felmérés menete	18
5.2.1. Repülési paraméterek	19
5.2.2. Az UAS és a Safecast által rögzített felmérési útvonalak	20
5.3. Adatok feldolgozásának lépései	22
5.3.1. Az adattáblák és eltéréseik	22
5.3.2. Adatkonverzió és számítási műveletek	23
5.3.3. A leválogatás	23
5.3.4. Az orthomozaik elkészítése	24
5.3.5. Az izovonalas térképek előállítása	24
6. Eredmények	25
6.1. Az orthomozaikok	25
6.2. A különböző magasságban végzett mérések izovonalas térképei	26
6.3. Az egyperces és öt másodperces sugárzási értékekből előállított izovonalas térképek összehasonlítása	29
6.4. Összehasonlítás korábbi mérésekkel	31
6.5. Drón előnyei és hátrányai a terepi méréshez képest	31
7. Diskusszió	32
8. Konklúzió	32
9. Összefoglalás	33
10. Irodalomjegyzék	34
11. Köszönetnyilvánítás	36
12. Nyilatkozat	36

1. Bevezetés és célkitűzés

A történelem során több olyan nukleáris baleset előfordult, melyeknek mértékét, következményeit az akkori technológiai adottságokkal nem tudták megfelelően felmérni. Ez a helyzet állt fent a 2011-es fukushimai atomerőmű-baleset esetében is. A baleset következtében megsérültek az atomerőmű folytonos monitorozására alkalmas műszerei, így hatalmas adathiány lépett fel. Az adatgyűjtésre Geiger-Müller számlálóval felszerelt furgonokat alkalmaztak, ami rendkívül lassú volt. A baleset megtörténte után négy nappal tudtak csak a sugárzás kiterjedéséről adatot szolgáltatni. Ez a fajta hagyományos felmérés nem csak időigényes volt, hanem nagy költségekkel, továbbá emberi élet kockáztatásával járt. Ezzel egyidőben a katasztrófa mértékét légi úton is felmérték, bár ez a módszer gyorsabbnak bizonyult, de nehéz volt és költséges. Ezt követően a terület felmérése egy kis méretű T-Hawk nevű UAS eszközzel is megtörtént (Reavis and Hem, 2011). Ugyanez a feladat akkor is felmerült, amikor uránbányák potenciális helyszínét kutatták a világ több országában a 60-as és 70-es években. Ekkor repülőgépekre helyezett gamma-sugárzást mérő detektorokkal készítettek dózisintenzitás térképeket. Ezek a természetes radioaktivitás felszín közeli eloszlásáról közvetítenek információt. A szakirodalomban azóta is számos kutatás fellelhető a drónnal végzett sugárzásmérésekkel kapcsolatban. A szakdolgozatom célja, hogy megvizsgáljam a sugárzási anomáliák térképezésének lehetőségeit egy UAS eszközre szerelt költséghatékony sugárzásmérő szenzorral. A dolgozat bemutatja továbbá a sugárzási anomáliák értékének változását a magasság függvényében és a mért sugárzási adatok izovonalas vizualizációját. A kutatásom helyszínének a lakhelyem közelében fekvő Kővágószőlős községet választottam. Ezen a területen a Kádár-korszak alatt uránércbányászat kezdődött és folyt egészen 1997-ig. A bányauzemhez tartozó részeket azóta a legtöbb helyen rekultiválták, de így is maradtak vissza kisebb szennyezett területek, ilyen a dolgozatomban vizsgált „kocsimosó” is. A kutatáshoz használt két fő eszköz a Térképtudományi és Geoinformatikai Intézet által biztosított DJI Matrice 210 V2 RTK UAS és egy Safecast bGeigie Nano Kit szenzor volt, amelyet Garamhegyi Gábor és az isaszegi Gábor Dénes Gimnázium biztosított számomra. A Safecast egy Geiger-Müller csővel ellátott sugárzásmérő eszköz, amelyet a drónra rögzítettünk. A felmérést három különböző magasságban, 25, 15 és 5 méter felszín feletti magasságból végeztem és egy földi, terepi bejárást is végrehajtottam 1,2 méter magasságban tartva a szenzort. A 25 és 15 méteres magassági repülés során egy-egy orthomozai is készült.

Az adatokat a QGIS szoftver segítségével dolgoztam fel, majd a Surfer 13 program segítségével izovonalas térképeket generáltam.

2. Elméleti alapok

2.1. Az UAV/UAS eszközök definíciója

A pilóta nélküli repülő eszközök, (más néven drónok) definiálására többféle variáció terjedt el kisebb különbségekkel, ezért fontosnak tartom már az elején a gyakran előforduló fogalmak tisztázását. Ha pilóta nélküli légi járművek témakörében tájékozódunk, a leggyakrabban szembejövő kifejezések az UAV és az UAS.

Az **UAV** (*Unmanned Aerial Vehicle*), más néven „pilóta nélküli légijármű” vagy „drón” olyan hajtott légijármű, mely nem hordoz emberi kezelőszemélyzetet, aerodinamikai erőket használ a jármű felhajtóerejének biztosítására, képes önállóan vagy távirányítással repülni. Lehet egyszer használatos vagy visszatéríthető, hordozhat halálos vagy nem halálos hasznos terhet magán (Palik, 2007).

Az **UAS** (*Unmanned Aircraft System*) „Egy-vagy több pilóta nélküli légijárműből álló légi alrendszer, és annak működését biztosító földi alrendszer, valamint a köztük lévő adatkapcsolat összessége” (Palik, 2007).

Az **UCAV** (*Unmanned Combat Air Vehicle*) és **UCAS** (*Unmanned Combat Air System*) rövidítés a felfegyverzett UAV-kre utal, ezek harci repülőgépek. Az UCAS pedig ezek rendszerét jelenti.

Az UAS rendszerek rendkívül sok célra használhatók és felhasználási területük is rohamosan bővül, így nehéz őket kategóriákba sorolni. Több tulajdonságuk alapján is osztályozhatjuk őket. Hajtásrendszerük szerint elkülöníthetők a robbanómotoros, villanymotoros és hibrid drónok. Legelterjedtebbek a villanymotorosok, ezeknek a modelleknek egyszerűbb a használata és javításuk is egyszerűbb és költséghatékonyabb. A robbanómotoros és hibrid modellek már komplexebbek, de alkalmasak nehéz teher szállítására és repülési idejük is hosszabb. Szárnyaik szerint is kategorizálhatóak a drónok, eszerint lehetnek merevszárnyasok vagy rotorosok. A polgári célokra leggyakrabban rotoros gépeket alkalmaznak, katonai célokra pedig leginkább a merevszárnyas drónok bevetése a jellemző (Palik, 2013; Major et al., 2016; Tóth, 2021). A szárnyak számától függően is tovább bonthatóak a csoportok. Léteznek háromrotoros, négyrotoros (kvadrokopter), hatrotoros (hexakopter), nyolcrotoros (oktokopter) pilóta nélküli légi járművek is. A szárnyak számával arányosan nő a modell teherbírása is (Alex, 2017). Fontos csoportosítási szempont a fel- és leszállás módja szerint történő

besorolás. Ez alapján megkülönböztethető a vízszintesen felszálló (Horizontal Take Off and Landing – HTOL) és a függőlegesen felszálló (Vertical Take Off and Landing - VTOL) továbbá két utóbbi kombinációja (Palik, 2013). Ha figyelembe vesszük a drón repülési magasság és repülési hatótávolság szerinti képességeit, akkor ezek alapján többféle is differenciálható. A HALE (high altitude, long endurance) típusba olyan pilóta nélküli légi járművek tartoznak, melyek képesek nagy magasságban és nagy hatótávolságban jól működni. Ezek a komplex légi járművek akár 20 000 méter magasságban és több ezer kilométer hatótávolságban is képesek ellátni feladataikat. A MALE (medium altitude, long endurance) közepes magasságban kb. 9000 méterig, de nagy hatótávolságra, akár több száz kilométer megtételére képesek. A LALE (low altitude, low endurance) és LASE (low altitude, short endurance) típusúak alacsony magasságban, pár ezer méter magasságig képesek csak repülni (Watts et al., 2012). A különbség a LALE és LASE között a hatótávolságuk, amely a LALE esetében nagy, a LASE esetében viszont rövid. Ezen tulajdonságok összefoglalását az 1. táblázat mutatja. A jelen dolgozatban használt drón egy VTOL típusú kvadrokopter (lsd. 5.1.1.).

	magasság	hatótávolság
HALE	nagy	nagy
MALE	közepes	nagy
LALE	alacsony	nagy
LASE	alacsony	rövid

1. táblázat: Drónok magasság és hatótávolság szerinti csoportosítása (Restás, 2017)

2.2. A radioaktivitás és a sugárzás tulajdonságai

2.2.1. A radioaktivitás fogalma

Ahhoz, hogy a radioaktivitás fogalmát tárgyalni tudjuk, fontos az atom és részeinek ismerete. Az atom átmérője 10^{-10} méter nagyságrendű, ezen belül található a kb. 10^{-14} méter átmérőjű magja, mely pozitív töltéssel rendelkezik. Az atommagot pozitív töltésű protonok és töltés nélküli neutronok alkotják, melyeket erős kölcsönhatás tart össze. Ezek közös elnevezése a nukleonok. Az atommagot negatív töltésű elektronok veszik körbe, ezzel elektronfelhőt létrehozva körülötte. Az atom így semleges, mert a pozitív töltésű protonok száma pont annyi, mint a negatív töltéssel rendelkező elektronok száma. A radioaktivitás szempontjából az atommagban lévő protonok és neutronok száma a meghatározó. Sok elem esetében előfordul, hogy protonszámuk (másképpen rendszámuk) megegyezik, de neutronjaik száma eltér. Azon atomokat, melyeknek

rendszáma azonos, de neutronszámuk eltérő, izotópoknak nevezzük. A rendszám és a nukleonok együttes száma határoz meg egy izotópot. A nukleonok számát másnéven tömegszámnak hívjuk. Az izotópokat a tömegszámmal ellátott vegyjelükkel jelöljük, amelyet a vegyjel bal felső sarkába helyezünk, például: ^{238}U . Az elem izotópjai lehetnek stabil és instabil izotópok neutronjaik és protonjaik arányai alapján. Ha az atom túl sok vagy túl kevés neutronnal rendelkezik a protonokhoz képest, akkor az instabil, másnéven radioaktív izotóp lesz. Ha az elem több, mint 82 protonnal rendelkezik, az biztosan instabil izotóp. A radioaktivitás bomlás, mely történhet természetes és mesterséges úton is. Radioaktivitásról akkor beszélünk, ha egy instabil atommag energiát veszít azáltal, hogy ionizáló sugárzási részecskéket bocsát ki. Miközben minden egyes atommag szétesik, hogy stabilabb állapotba kerüljön, a folyamat során olyan töltött részecskéket bocsát ki, melyek mozgási energiájuk miatt képesek áthatolni szilárd anyagokon (Meredith és Massey, 1977).

2.2.2. A radioaktív bomlás típusai

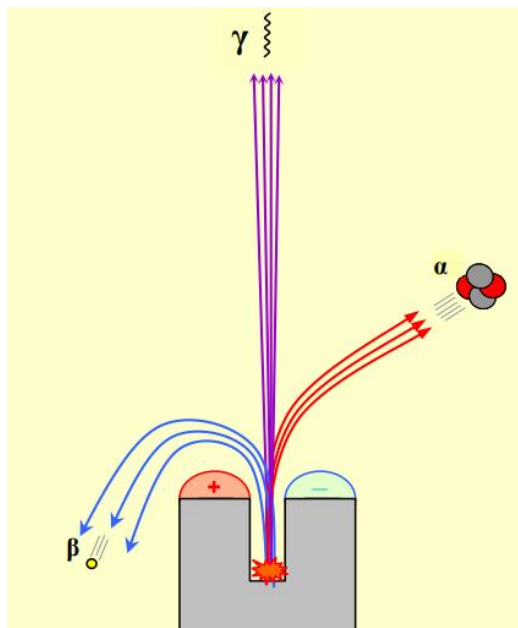
Ernest Rutherford mutatta ki először 1899-ben, hogy az urán által kibocsátott sugárzás szétválasztható egymástól mágneses és elektromos térben. Ezek alapján három fajtája megkülönböztethető: α , β , γ .

Az alfa-sugárzás: Az alfa-sugárzás a Hélium atommaghoz hasonlítható, mely 2 protont és 2 neutron tartalmaz. Áthatoló képessége alacsony, elnyeli az emberi bőr vagy egy papírlap is, így csak lenyelve vagy belélegezve jelent veszélyt.

Béta-sugárzás: A béta-sugarak nagy sebességű elektronok, elérhetik akár a fénysebesség 99%-át is. Mivel ezek elektronok, így negatív töltéssel és kis súllyal rendelkeznek. Áthatoló képessége nagyobb, mint az alfa-sugaraké. Áthatol a papírlapon, az emberi bőrön is néhány cm mélységig, de hamar lefékeződnek fémekben, mint egy vastagabb alumíniumlap. A levegőn pár méterig képes áthatolni (Collum, 2017).

Gamma-sugárzás: A gamma-sugárzás töltés nélküli elektromágneses sugárzás, melynek hullámhossza $5 \cdot 10^{-11}$ és $5 \cdot 10^{-13}$ méter közé tehető. Sebessége megegyezik a fénysebességgel, de energiája jóval nagyobb a fény energiájánál. Akkor jön létre, ha az atom a bomlást követően még gerjesztett állapotban marad, és ezt egy vagy több gamma-foton formájában adja le. Így csak a mag energiája változik meg, a tömegszám és rendszám változatlan marad. Mivel töltés nélküli sugár, ezért legnagyobb áthatolóképeséggel rendelkezik. A betonfalon, több száz méter levegőn is áthatol, védelmet ellene a vastag ólom, vas, vagy beton réteg nyújthat. A levegőben akár több

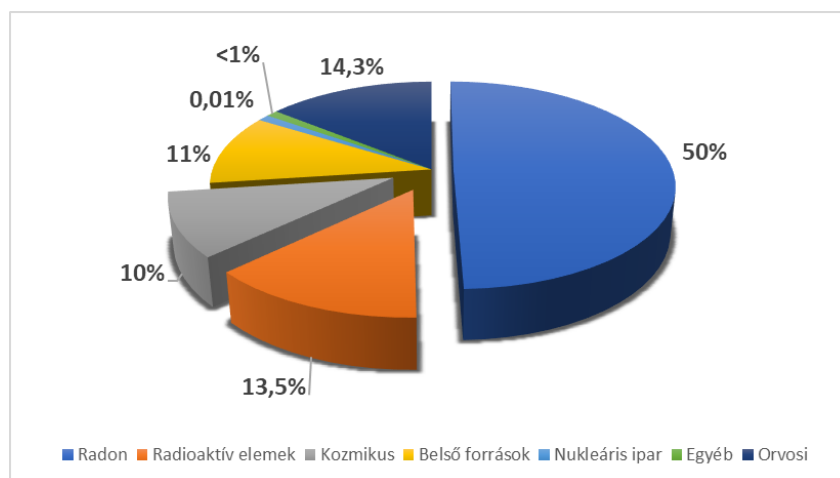
száz vagy több ezer méterre is eljut (Collum, 2017). A háromféle radioaktív sugárzás eltérülését mágneses térben az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra: Radioaktív sugárzások eltérülése mágneses térben (Sebestyén, 2010)

2.2.3. A természetes radioaktív sugárzás forrásai

Radioaktív sugárzás mindenhol ér minket a természetben, ez a háttérsugárzás származhat természetes és mesterséges forrásból, viszont legnagyobb része természetes forrásból származik. Az embert érő sugárterhelés átlagos összetételét a 2. ábra mutatja be kerekített értékekkel, melyből kiderül, hogy a legnagyobb sugárforrás a radonból és leányelemeiből származik (Kiss, 2007). Az ábrán kiemelt körcek a természetes eredetű források csoport alkotói.



2. ábra: Az embert érő sugárzásterhelés átlagos összetétele (Kiss, 2007)

A téma kiterjedése miatt jelen dolgozatomban csak a természetes radioaktivitás jellemzőit tárgyalom részletesebben. A természetes radioaktivitás jelensége

visszavezethető a Föld keletkezését 6 milliárd évvel megelőző végbement szupernóva-robbanásra, az azzal együtt keletkező hosszú felezési idejű atommagokra. Ezen hosszú felezési idővel rendelkező izotópok még nem bomlottak el, így leányizotópjaikkal együtt hozzájárulnak a természetes radioaktivitáshoz. Ilyen például az urán és a tórium (Kiss és Tasnádi, 2012). A természetes sugárzás származhat kozmikus vagy teraszitikus (földi) forrásból is. Az elsődleges kozmikus sugárzás az atmoszféra felső részében játszódik le, mikor a nehéz ionok reakcióba lépnek az atmoszféra gázaival. Ilyen izotóp például a ^{14}C , amelyet hatékonyan alkalmaznak a radiometrikus kormeghatározás területén. A kozmikus sugárzásból kapott sugárdózis változó, kismértékben függ a földrajzi szélességtől, de legfőképpen a tengerszint feletti magasságtól. A magasság növekedésével csökken a légkör „árnyékoló” hatása. A kozmikus sugárzásból származó dózis a tengerszinten kb. $260\text{ }\mu\text{Sv/év}$ (Eisenbud and Paschoa, 1989). A fölkéregből származó radioaktivitás három elemnek köszönhető, ezek a Kálium (K), Tórium (Th) és az Urán (U). Egy 1965-ös kutatásból (Heier és Adams, 1965) kiderül, hogy a kéreg nagyobb radioaktivitást mutat, mint a köpeny, és az is megállapítható, hogy a kontinentális kéreg nagyobb U, Th és K tartalommal rendelkezik, mint az óceáni kéreg. Ennek magyarázata, hogy a gránitöv nincs jelen az óceáni területeken. A kőzetekben a természetes radioaktivitás egyenesen arányosan nő az adott talaj urán-, tórium- és káliumtartalmával. A savanyú magmás kőzetek, mint a gránit és riolit nagyobb aktivitást mutatnak, mint a semleges vagy bázikus kőzetek (Evans és Goodman, 1941). A megnövekedett háttérsugárzás értékéhez hozzájárul a talaj és kőzetek U, Th, K tartalma és a kozmikus sugárzás is. A háttérsugárzás értéke ingadozó, befolyásolja a tengerszint feletti magasság, a talajtípus, időjárási körülmények és ezek változásai. Az Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság szerint Magyarországon a természetes háttérsugárzás átlag mértéke $50\text{--}180\text{ nSv/óra}$, ami $0.05\text{--}0.18\text{ }\mu\text{Sv/óra}$ értéknek felel meg.

3. Korábbi kutatások

3.1. Gamma-sugárzás felderítésének és mérésének módszerei

3.1.1. Hagyományos sugárzásmérések

A gamma-sugárzás felderítésére többféle módszer terjedt el. Azt, hogy milyen felderítési módszert választunk nagyban befolyásolja az adott környezet. Más mérési módszert alkalmazunk szárazföldi, légi vagy vízi környezetben. A téma terjedelme miatt e három környezet közül csak a szárazföldi és légi mérési műszereket tárgyalom. A szárazföldi felderítés esetén is több dolog közül választhatunk, a sugárszennyezettség

mértékétől függően. Amennyiben a sugárzás értéke nem éri el az emberre veszélyes határértéket, akkor alkalmazható a gyalogos felmérés, amely többféle műszerrel történhet (Manga, 2018). A legelterjedtebbek a félvezető detektorok, szcintillációs detektorok, és a Geiger-Müller számlálók. Ezen három műszer közül jelen dolgozatban az utolsó kettő eszközt alkalmaztam, így fontosnak tartom ezen két műszer működési elvének rövid kifejtését. A félvezető detektorok (3. ábra) tulajdonképpen diódák, amelyeket elsősorban félvezetők (nagyreszt szilícium és germánium) egykristályából készítenek.



3. ábra: Germánium félvezető detektor (Semiconductor detector-Wikipedia,2022)

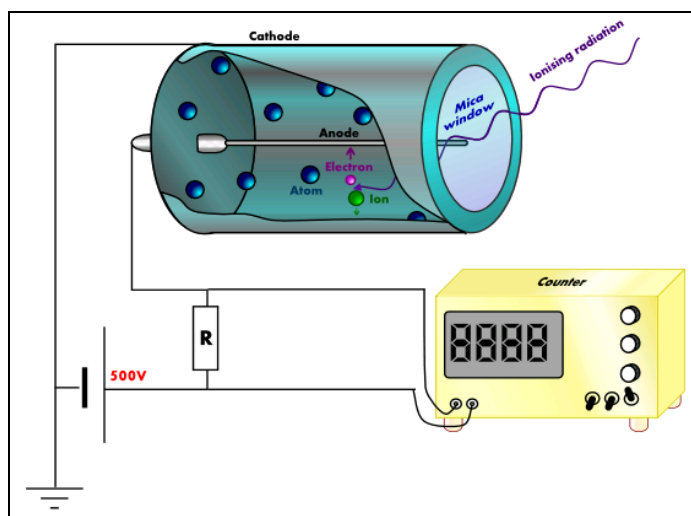
A szcintillációs detektorok (4. ábra) két fő elemből tevődnek össze; egy kristályból és fényérzékelőből. Léteznek olyan kristályok, amelyek fényt bocsájtanak ki minden alkalommal, mikor elnyelnek egy gamma-fotont. Ha ezeket a kristályokat minden más fényforrástól elzárjuk és csatlakoztatunk hozzá egy érzékeny fényérzékelőt, akkor a villanások érzékelhetők elektromos impulzusok formájában. Többféle szcintillációs kristályt különböztethetünk meg, ezek közül a talliummal szennyezett nátrium-jodid Na (TI) a leggyakrabban használt (Panikkath *et al.*, 2020). Ez a kristály rendkívül nagy vízmegkötő képességgel rendelkezik, a víz megkötésével pedig romlik hatékonysága, így ezeket a kristályokat hermetikusan el kell zárni.



4. ábra: FHZ 672 E-10 szcintillációs detektor a felmérés helyszínén

A Geiger-Müller számláló koncepcióját H. Geiger és E.W. Müller dolgozta ki 1928-ban. A műszert gyakran részecskeszámlálóként is emlegetik, ugyanis a készülék minden

érzékelte fotonhoz elektromos impulzusokat társít. A Geiger-Müller számláló egy alacsony nyomású nemesgázzal töltött elektromos kisülési cső, amelynek fala negatív töltésű (katód), közepén egy pozitív töltésű fémszállal (anód). Ha radioaktív sugárzás érkezik a csőbe, a beérkező elektron ütközik a nemesgáz atomjaival és kiüt egy elektront minden atomhéjról. Az ütközés után az elektronok nagy sebességgel ütköznek más atomokkal, amelyekről így további elektronok szakadnak le és ezek együttesen tartanak a pozitív töltésű fémszál felé. Ezek a részecskék szállítódnak tovább egy elektronikus számlálóba. A Geiger-Müller számláló felépítését az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra: Geiger-Müller számláló felépítése (Geiger-Müller számláló-Wikipédia,2022)

Nagy szárazföldi területek sugárfelderítése esetén érdemes inkább a gépjárművel történő felderítést alkalmazni, amennyiben a terep adottságai ezt lehetővé teszik. Ezek a gépjárművek úgy vannak kialakítva, hogy azok sugárárnyékolt környezetet biztosítsanak a benne ülő kezelőszemélyzetnek, illetve képesek nagyobb súlyú detektorokat pl. nagy kristállyal rendelkező szcintillációs detektorokat szállítani. Megemlítendő továbbá az utóbbi időben rohamosan fejlődött robottechnológia is, aminek segítségével már robotokkal is elvégezhető a dózisteljesítmény mérése. A robotok számos előnnyel rendelkeznek; nem igénylik emberi élet kockáztatását, számos szenzorral felszerelhetők és könnyen szállíthatók. Bevetésüknél viszont figyelembe kell venni számos korlátozó tényezőt, mint a terepi akadályok, időjárási viszonyok, hatótávolság, akkumulátor kapacitása és az extrém magas sugárzás. Légi környezetből történhet a felderítés helikopterekkel, merevszárnyú repülőgéppel vagy akár drónnal is. A helikopteres felderítés már bizonyítottan felhasználható felületi szennyezettség térképezésére. Magyarországon a helikopterről történő mérést kezdetben egy MI-8-as helikopterbe épített IH-31L sugárszintmérővel oldották meg, majd később MI-24D

harci helikopterre felszerelhető „Gamma konténerrel” (Zelenák *et al.*, 2009). Ez a konténer valójában egy NDI/SK szcintillációs detektor és egy BNS-89 dózisteljesítmény-távadóból tevődik össze. A légi felderítések bevetéséhez fontos megállapítani azt a távolságot és sebességet, melyből a műszer még megbízhatóan képes detektálni a sugárzást, de a kezelőszemélyzetet nem teszi ki veszélyes sugárdózisnak. A merevszárnyú légi felderítés a helikoptereshoz képest kettő lényeges dologban tér el; nem képes lebegésre és alacsony sebesség tartására, így adott magasság alá nem képes tartósan süllyedni (Manga, 2018).

3.1.2. Drónról végzett sugárzásmérések

A drónok felhasználási körének bővülésével és a területen történő kutatásokból már kiderült, hogy képesek ellátni sugárzásmérési feladatokat is. Léteznek más kifejezetten erre a célra kifejlesztett sugárfelderítő drónok, mint például a Szojka-III. merevszárnyú drón (6. ábra). Ez a szerkezet alkalmas szennyezett területek lokalizálására és felderítésére is, de merevszárnyú kivitelezése miatt inkább nagyobb kiterjedésű és aktivitású területeken hatékonyak.



6. ábra: Szojka-III sugárfelderítő drón (Manga és Csurgai, 2017)

Precíziós feladatok ellátásához és alacsonyabb aktivitások detektálásához alkalmasabbak a forgószárnyas típusúak, melyek képesek egy pont feletti lebegésre és alacsonyabb magasságból képesek vizsgálni az adott térrészt. A drónok legnagyobb előnye, hogy emberi élet kockáztatása nélkül képesek felmérni olyan szennyezett területeket, amelyek az emberi szervezetre már veszélyt jelentenek (Manga, 2018). A drónok sokoldalú felhasználását vizsgálva, hamar felmerült a kutatókban a drónok bevetése megnövekedett sugárzással rendelkező környezetekben. Már 1993-ban készült tanulmány, mely UAS általi hordozásra alkalmas sugárzásmérő rendszer kifejlesztésével foglalkozik (Zafir *et al.*, 1993). Sok kutatás foglalkozik azóta is a multikopter és a merevszárnyú drónok sugárfelderítési lehetőségeivel.

Pöllänen és munkatársai (2009) egy merevszárnyú drónt teszteltek, amelyre egy CsI detektort és egy mintavevő berendezést erősítettek a levegőben szálló radioaktív részecskék érzékelésére

Sanada és Torii (2015) egy autonóm, pilóta nélküli helikoptert használtak (AUH), amelyre három $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ szcintillációs detektort rögzítettek. A mérést 80 méter felszín feletti magasságból végezték 8 m/s sebességgel

MacFarlane és munkatársai (2014) egy olyan könnyű súlyú drónt alkottak meg, mely képes lokalizálni a megnövekedett sugárzással rendelkező pontokat. A rendszer egy hexakopterre szerelt mikrokontroller, gamma spektrométer (CZT félvezető detektor), GPS és egy LiDAR-ból áll. A mérést 3 méteres magasságból végezték. Az összehasonlítás érdekében egy kézi felmérést is végrehajtottak a teszterületen, a felszín felett 1 m magasságban azonos detektorral (MacFarlane *et al.*, 2014).

Molnár és munkatársai (2021) két UAS eszközt és kétféle detektor alkalmaztak; egy Geiger-Müller számlálót és egy CsI (TI) szcintillációs detektort, amelyeket a drónhoz erősítettek. Az általuk meghatározott felmérési folyamat szerint a készülék több előre meghatározott ponton végez mérést, minden ponton 10 másodpercet lebegve. A kutatás többek között vizsgálja az optimális repülési magasság értékét is.

4. Vizsgált terület bemutatása

4.1. A kővágószőlősi uránbánya

A területen először dr. Szalay Sándor professzor, Szalay Tibor és dr. Földvári Aladár geológusok kezdtek kutatásokat 1947-ben. A méréseket saját készítésű Geiger-Müller számlálóval végezték, olyan területeken melyeket a Magyar Állami Földtani Intézet (MÁFI) jelölt ki. Az eredmények alapján 1949-ben hasadóanyag kutatást kezdtek Magyarországon a szovjet szakemberek (Bánvölgyi and Kukai, 2014). Az uránércbányászat 1957-ben kezdődött, és 1997-ig folyt ezen a területen. A terület geológiai jellemzői miatt uránércben gazdag. A község földtani környezetét a permi Kővágótöttös, Tótvár és Cserkúti Homokkő (mint a Kővágószőlősi Formáció szakaszai), valamint a triász Jakabhegyi Homokkő Formáció jellemzi. A perm képződményekben konglomerátum, iszapkő és aleurolit váltakozik (Gyalog és Síkhegyi, 2005).

4.2. A teszterület bemutatása

A vizsgált terület az egykori kővágószőlősi uránbánya, ma a Bányavagyon-hasznosító Nonprofit Közhasznú Kft területén található. A bánya vágataiból kitermelt ércet a kővágószőlős területén lévő feldolgozó üzembe szállították. A jelen vizsgálatban egy érintett terület, a teherautók lemosására használt 20×33 méteres „kocsimosó”. A kocsikról lefolyó víz az évtizedek alatt a talajba szállította az ércről lemorzsolódó természetes uránt tartalmazó port, és radioaktív felhalmozódást hozott létre. Ezt az anomáliát korábban már ismerték, a felszíni feltérképezése többször megtörtént (lsd. 4.4. fejezet)

4.3. Az urán és tulajdonságai

Az Urán a természetben előforduló radioaktív elem. proton és neutronszámának arányai alapján több izotópja is előfordul. A 92-es tömegszámával ő képviseli a legnehezebb természetben előforduló elemet. Nyers változatában ezüstös színű fém, és majdnem kétszer sűrűbb az ólomnál. A természet három természetes izotópja fordul elő, ez a három az U-234, U-235 és az U-238. A leggyakrabban előforduló uránizotóp az U-238. Ezek közül mind a három spontán bomlik, ezért mindegyik radioaktív (Fujino *et al.*, 2001). Az urán koncentrációja nagyobb a kontinentális kéregben, mint az óceániban. A földkéreg 2-3 ppm mennyiségben tartalmaz uránt, ez főleg a vulkáni magmás kőzetekből származik, azon belül is a savanyú vulkáni és magmás kőzetek, ilyenek például a gránit (4-10 ppm) és a riolit (2,5-5 ppm) (International Atomic Energy Agency, 2003). A 4 és 6 vegyértékű urán savas pH-jú vizes környezetben oldódik és ez főleg oldatba kerülve szállítódik tovább. Kicsapódásának kedveznek a redukív környezetek, amelyben a szerves anyagok bomlása lelassul. Ilyen környezet például a homokkő, ezért a homokkő formációkban gyakori az uránérc telepek előfordulása (Breitnel *et al.*, 2012). A 2. táblázat tartalmazza néhány üledékes kőzet uránkoncentrációját ppm értékben. A 3. táblázat a magmás kőzetek uránkoncentrációját mutatja (Pethő és Vass, 2011).

<i>kőzet</i>	Urán (ppm)
<i>mészkö</i>	1.5-2
<i>homokkő</i>	1.5-2.1
<i>agyag</i>	4-6

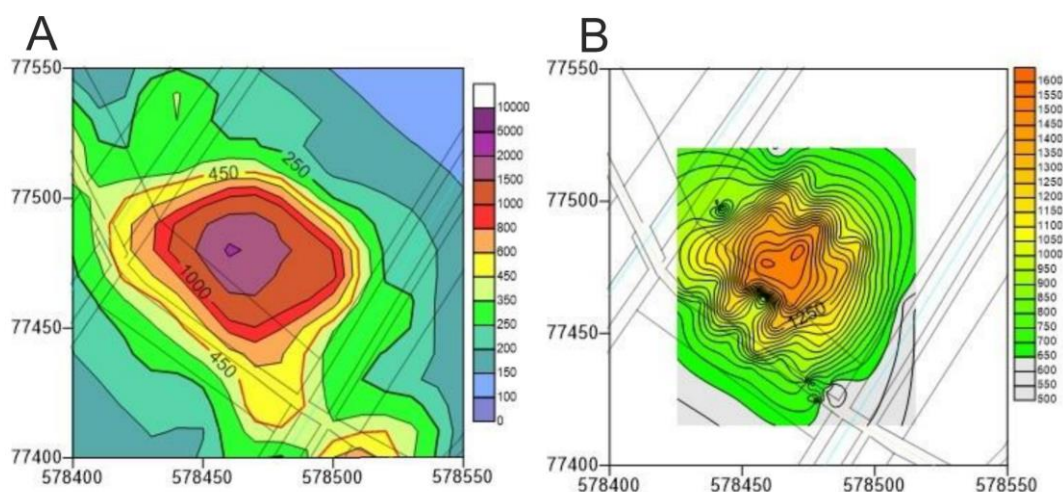
2. táblázat: Üledékes kőzetek uránkoncentrációja ppm értékben

<i>kőzet</i>	Urán (ppm)
<i>ultrabázitok</i>	0.001-0.01
<i>peridotit</i>	0.01-0.015
<i>gabbro</i>	0.5-0.9
<i>bazalt</i>	0.5-1.5
<i>andezit</i>	1.8-2.1
<i>diorit</i>	1.8-2
<i>riolit</i>	2.5-5
<i>gránit</i>	4-10

3. táblázat: Magmás kőzetek uránkoncentrációja ppm értékben

4.4. Korábbi mérések a teszterületen

A szennyezett területen 1994 óta számos felmérés zajlott. Az első ilyen felmérést a Geo-S Bt. végezte 1994-ben. Az általuk készített térkép egy 1:2500 méretarányú gammadózis térkép volt, mely nem csak az általam vizsgált „kocsimosó”, de a hozzátartozó bekötőutat is magába foglalta. 1996-ban elkezdődött a felmérés geofizikai szondákkal. Ennek célja a szennyezett talaj függőleges vastagságának megállapítása volt, a rekultivációs tevékenységek elvégzéséhez. Ezekkel a szondákkal néhol 2 méter vagy annál is mélyebbre szivárgott szennyeződések mértek (Szilágyi, 2017). Az általam vizsgált „kocsimosó” területét a Mecsekérc Zrt. is felmérte 2017-ben egy szcintillációs detektor segítségével, terepi bejárással. Ugyan ezen a területen egy akkori hallgató kísérletet tett egy drónra erősített spektrométerrel történő felmérésre 2017-ben (Szilágyi, 2017). Az általa készített térkép a másodpercenként beérkező beütésszámot (CPS) ábrázolja. A két korábbi térképet a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra: A Mecsekérc Zrt. által készített gammadózis térkép nGy/h értékben (A) és Szilágyi Antal hallgató által készített gammadózis térkép CPS értékekkel (B)

5. Módszertan

5.1. Használt eszközök és szenzorok

5.1.1. A drón/ UAS

A felméréshez használt készülék egy DJI Matrice 210 V2 RTK UAS forgószárnnyas kvadrokopter volt (8. ábra). A pilóta nélküli légi jármű rendszerét több fő komponens alkotja; a repülő eszközön kívül egy távirányítós kontroller és a DJI D-RTK 2 Mobile Station RTK bázisállomás. A helyben telepített DJI D-RTK 2 bázisállomás álláspontjának precíz helymeghatározáshoz egy Stonex S9III Plusz RTK GNSS műszert is használtunk.

A DJI Matrice 210 V2 RTK UAS specifikációi:

- Méretei:
 - kihajtva (propellerrel és futóművekkel együtt) 883x886x427 mm
 - összehajtva (propeller és futóművek nélkül) 722x282x242 mm
- Súlya: 4.91 kg (2db TB55-ös akkumulátorral együtt)
- Maximum felszállási súly: 6.14 kg
- Maximum hasznos teher: 1.23 kg
- Adatkommunikációs frekvencia: 2.4000-2.4835 GHz; 5.725-5.850 GHz
- Lebegési pontosság:
 - vertikális: +- 0.1m
 - horizontális: +- 0.1m
- Maximum vertikális sebesség:
 - emelkedés esetén 5m/s
 - csökkenés esetén: 3m/s
- Maximum sebesség:
 - Dual Downward Gimbal/Single Upward Gimbal esetén:
 - S-mód/A-módban: 73.8 km/h
 - P-módban: 61.2 km/h
 - Single Downward Gimbal (Gimbal Connector) esetén:
 - S-mód/A-módban: 81 km/h
 - P-módban: 61.2 km/h
- Maximum tengerszint feletti magasság: 3000 m (1760S propellerekkel)
- Maximum szélellenállás: 12 m/s
- Maximum repülési idő: 2db TB55 akkumulátorral
 - hasznos teher nélkül: 33 perc
 - maximum felszállási súllyal (6.14 kg): 24 perc
- Használt GNSS: GPS + GLONASS + BeiDou +Galileo
- Működési hőmérséklet: -20 fok- 50 C -ig
- Maximum távolság: 8 km
- Akkumulátora: 2 db TB55
 - kapacitása: 7660 mAh

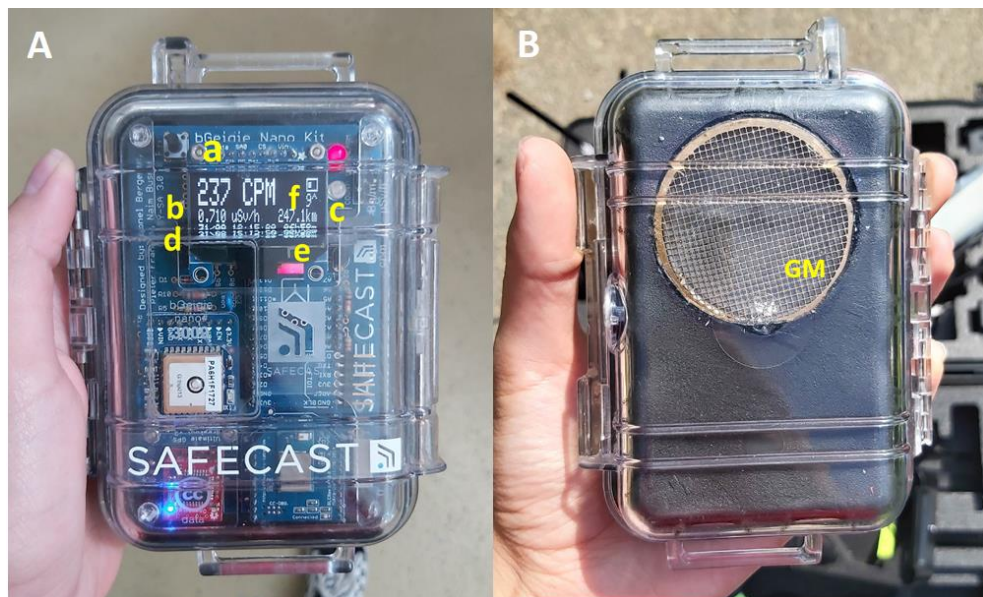
- feszültsége: 22.8 V
- Főbb szenzorok és műszerek:
 - RTK antennák (2db): D-RTK
 - Dual IMU (Inertial Measurement Unit): giroszkóp, gyorsulásmérő
 - barométer
 - AirSense: repülésbiztonsági szenzorok, ütközésérzékelők
 - Távolságmérő szenzorok:
 - infravörös szenzorok: 2db a tetején
 - elöl és alul elhelyezkedő sztereo képalkotó szenzor és kettő ultrasonikus szenzor (Downward vision system, Forward Vision System), ultrahangot használ
 - TimeSync: kamera, GPS, RTK, repülésvezérlő folyamatos összehangolása a feladata
 - Dual gimbal
 - RGB kamera: Zenmuse X5S
 - többszörösen stabilizált
 - Multispektrális szenzor: MicaSense Altum
 - FPV kamera (First-person-view):
 - felbontása: 608 x 448 px



8. ábra: DJI Matrice 210 V2 RTK UAS rögzített Safecast szenzorral a teszterületen

5.1.2. A Safecast szenzor

A Safecast bGeigie Nano Kit (9. ábra) egy könnyű, könnyen hordozható, beépített autonóm GPS-szel támogatott sugárzásmérő eszköz, mely képes „naplózásra”. Ebben a naplózó módban a készülék a választható integrálási időben mérést végez, majd egy MicroSD kártyára továbbítva és időbélyeggel és koordinátákkal ellátva tárolja azokat (bGeigie Nano | Safecast, 2018). A készülékből kettő darab állt rendelkezésünkre.



9. ábra: Safecast bGeigie Nano Kit felülről (A) és alulról (B)

A Safecast bGeigie Nano Kit kilenc fontos alkotóelemből épül fel. Ez a kilenc rész a következő:

1. „Palacsinta” Geiger – Müller cső (LND-7317, 500V)
2. Nagyfeszültségű lap (Medcom IMI iRover)
3. Nyomtatott áramkör (bGeigie Nano 1.1r5a)
4. Arduino Fio mikrokontroller
5. 8 MB-os mikro SD kártya, nyílt forráskódú adatgyűjtővel (SparkFun Openlog)
6. GPS (Adafruit Ultimate)
7. Grafikus OLED kijelző (Monochrome 128x64 SPI)
8. Akkumulátor: 2000mAh 3.7V 7.4W (Li-Po) → lítium-polimer
9. Polikarbonát védőtok (Pelican 1010 micro-case)

A bGeigie Nano készülék képes alfa, béta és gamma-sugárzás detektálására, ezen sugárzások dózisteljesítményének és beütésszámának mérésére (Walsh, 2019). A dózisteljesítmény mérésére egy LND 7317 „Palacsinta” Geiger Müller számlálót használ. Ez a GM cső (9. ábra, GM jelzés) egy Neonnal és halogén gázokkal megtöltött ca.1 cm vastag süllyesztett henger (LND, n.d.) A Safecast készülék három mérési módban képes működni; az első a „bGeigie mód”, mely egy CPM (counts per minute) értéket és egy dózisteljesítmény értéket ($\mu\text{Sv/h}$) ad vissza minden 5 másodpercben. A második mérési módja az „xGeigie mód”, amely dózisteljesítményt adja eredményül $\mu\text{Sv/h}$ mértékegységben, de ez nem „naplóz”. A harmadik mód az „iGeigie”, amely

kompatibilis az iPhone telefonokkal és azokon valós időben meg tudja jeleníteni a mért dózisteljesítményt egy applikáción keresztül, majd ezeket ezzel párhuzamosan továbbítani tudja a Safecast API weboldalára (Pieter, 2013). Ezek az adatok megjelennek a műszerre szerelt grafikus OLED kijelzőn is, elsőként a CPM érték (a), majd a kalkulált dózisteljesítmény (b), megtett távolság (c), dátum és idő (d), mellette pedig a bekapcsolástól számított időtartam (e), illetve a „befogott” műholdak száma (f). A beütésszámot és dózisteljesítmény mérési eredményeit a mikrokontroller időbélyeggel és a GPS segítségével koordinátákkal látja el majd „naplózza”, továbbítja egy MicroSD kártyára. A MicroSD kártyáról egy számítógép segítségével pedig kinyerhető az méréseinket tartalmazó log fájl. Egy rekord egy mérési kontrollpontot jelöl. A készülék elemeit egy vízálló polikarbonát tok fogja közre, mely erősen hasonlít a japán uzsonnásdobozokra. A bGeigie Nano esetében így a „b” a japán „bento” szó rövidítését takarja, mely a japán uzsonnásdobozok elnevezése (Brown *et al.*, 2016). A tok funkciója nem csak egy vízálló réteg képzése az érzékeny szegmensek körül, hanem az alfa és béta részecskék kiszűrése. A vastag polikarbonát réteg lehetővé teszi, hogy a GM-csőbe csak a gamma részecskék juthassanak be (Walsh, 2019). Súlya nagyjából 560 g (1.30 pounds), így az általunk használt UAS eszköz teherbíróképességét nem haladja meg. A kutatásban használt Safecast szenzor beszerzési ára 2019-es beszerzésének idején 211 300.-Ft volt. A műszer megvásárolható három formában; kérhetjük „Kit” formában bluetooth nélkül, szintén „Kit” formában, de bluetooth modullal. A „Kit” forma azt jelenti, hogy a műszert mi magunk szereljük, forrasztjuk össze egy leírás segítségével. A harmadik lehetőség, hogy teljesen összeszerelt állapotban rendeljük meg. Az ár a felsorolás sorrendjében növekszik. A felméréshez használt eszköz „Kit” formában, bluetooth modullal ellátva érkezett Magyarországra. Ennek akkori ára 600 USD volt, amelyhez még hozzáadódik a szállítási költség és a vámjelzés költsége, így jött ki végösszegként a 211 300.-Ft (Garamhegyi, 2019).

5.2. A felmérés menete

A teszterület felmérésére 2021. augusztus 31-én került sor Kővágószőlősen, a Bányavagyon-hasznosító Nonprofit Közhasznú Kft. területén. A mérést az előbbieken említett DJI Matrice 210 V2 RTK UAS forgószárnyas kvadrokopterrel végeztem, erre erősítettem rá a Safecast bGeigie Nano Kit készülékét. Megtörtént a DJI RTK bázisállomás inicializálása és a drón kalibrálása. A Safecast készülékekből kettő darab állt rendelkezésemre, így ezt kihasználva az egyiket a drónra erősítve, a másikat terepi

bejárásra használtam (1,2 méter magasságban a földfelszíntől). A terepi bejárást végrehajtottam még egy FHZ 672 E-10 típusú szcintillációs detektorral is (4. ábra), a helyszínen történő összehasonlítás érdekében. A szcintillációs detektor és a Geiger-Müller számlálóval ellátott Safecast szenzor között a legjelentősebb különbség, hogy eltérő módon méri a sugárzást, ezért érzékenységük is eltér.

5.2.1. Repülési paraméterek

Az első repülés egy tervezett repülés „Mission Flight” módban 25 méter magasságban történt 1 m/s sebességgel (10. ábra). A „Mission Flight” mód lehetőséget ad egy előre megtervezett felmérésre. Ha ebben a módban repülünk, beállíthatunk számos tényezőt a felméréssel kapcsolatban, ilyen az útvonal útpontokkal, sebesség, magasság, irány, gimbal (stabilizátor), és a végrehajtás módja. Ezekből a megadott beállításokból a drón kalkulál nekünk egy távolságot és időt, illetve egy fotószámot is, amely lefedi a megtervezett útvonalat. A 25 méter magasságban készített felmérés nem csak a sugárzás intenzitását volt hivatott mérni, hanem az RTK segítségével centiméter pontos orthofotók készítését is lehetővé tette. A kamerát az orthofotók elvárásainak megfelelően -90 fokba fordítottuk, ezzel a drón nagyjából 24 perc alatt 12 sávot fotózott. A képek közötti átfedés x és y irányban is 70 és 70% volt.



10. ábra: A tervezett útvonal "Mission Flight" módban, 25 méter felszín feletti magasságban

A második repülési magasságnak a 15 métert határoztuk meg, mely magasságban 1 m/s sebességgel még egy tervezett útvonalon történt felmérés, amely kicsivel több, mint 6 percet vett igénybe.

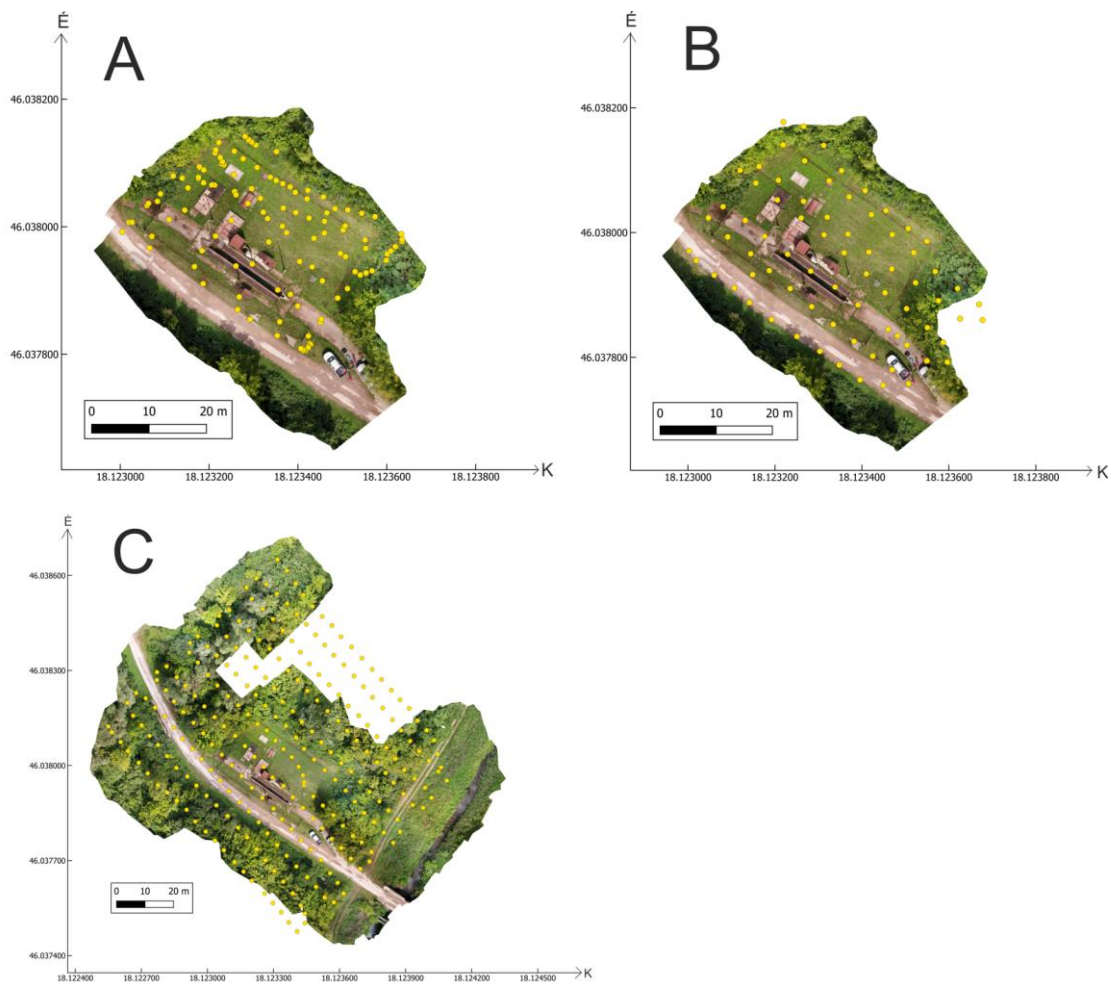
	I. repülés	II. repülés	II. repülés
repülési magasság	25 m	15 m	5 m
repülési sebesség	1 m/s	1 m/s	1 m/s
repülési idő	24 perc	6.25 perc	11.25 perc
kontrollpontok száma	261 db	75 db	135 db

4. táblázat: A három különböző magasságú repülés főbb repülési paraméterei

A harmadik felmérés a különböző magasságú terepi objektumok miatt már manuális módon történt 5 méteres magasságban. Az útpontok hálózata a kézi vezérlés miatt nem egyenletes, de a magasságon nem módosítottam, így az minden pont esetében 5 méter. Ezt szintén 1 m/s sebességgel kicsivel több, mint 11 perc alatt sikerült lerepülni. A három repülés fő adatait a 4. táblázat tartalmazza.

5.2.2. Az UAS és a Safecast által rögzített felmérési útvonalak

A DJI Matrice 210 V2 RTK UAS-hoz opcionálisan megvásárolt DJI D-RTK 2 Mobile Station RTK bázisállomás, a drón hálózat-, és szolgáltató független precíziós repülését biztosítja. Az RTK (Real-Time Kinematic) egység lehetővé teszi a felhasználó számára a centiméter pontosságú helymeghatározást, valós időben. A gyors inicializálást segítő, a DJI RTK bázisállomás telepítési helyének pontos meghatározásához használtuk a Stonex S9III Plusz RTK GNSS műszerét is az Intézetnek. A Safecast műszer ezzel ellentétben egy autonóm üzemmódú GPS-szel felszerelt egység, így pontossága akár több méter eltérést is mutathat. A Safecast által rögzített felmérési útvonalakat az általam készített orthomozaikra (ld. 5.3.4 fejezet) vetítettem, ezeket szemléltetik a következő ábrák. A 15 méter magasságból készült orthomozaik képére rávetítettem az 5 (11. ábra/A) és a 15 méter magasságban megtett útvonal (11. ábra/B) pontjait. A 25 méter magasságból készült orthomozaikra a 25 méter magasságban bejárt útvonal kontrollpontjait vetítettem (11. ábra/C). Az útvonalakat mindhárom térképen a sárga pontsor jelzi.

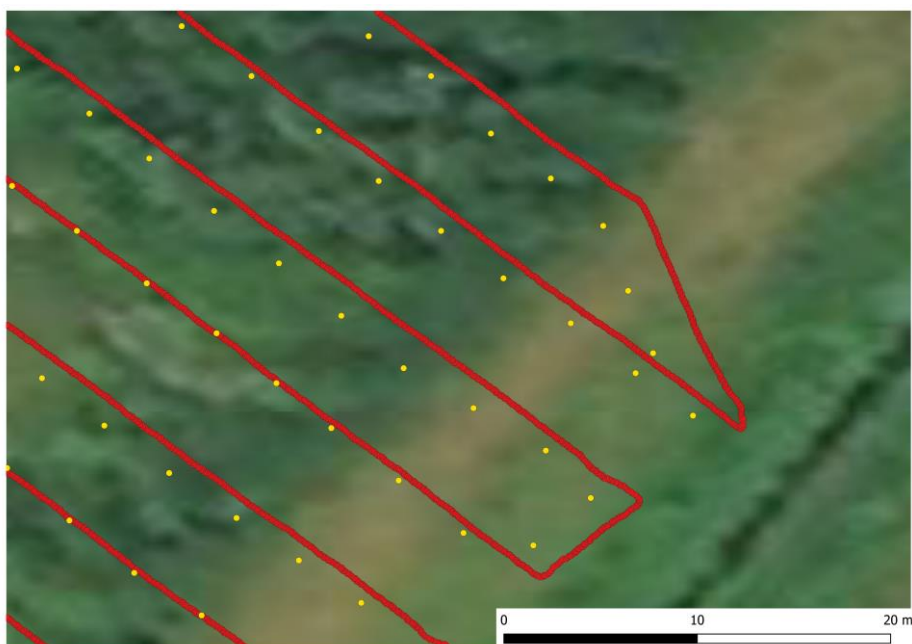


11. ábra: Az 5 méteres (A), 15 méteres (B) és 25 méteres (C) repülés útvonalai

A Safecast és a drón által bejárt azonos magasságú útvonal is összehasonlításra került. Az UAS által rögzített útvonalat (vörös pontsor) és a Safecast által bejárt útvonalat (sárga pontsor) egymásra helyezve jól látható az x és y irányú eltérés (12. ábra). Ennek kinagyított verzióját mutatja a 13. ábra.



12. ábra: Az UAS (vörös) és a Safecast szenzor (sárga) útvonala összehasonlítva 25 méteres magasságban



13. ábra: Az UAS (vörös) és a Safecast szenzor (sárga) útvonala összehasonlítva 25 méteres magasságban kinagyítva

Az adatsorból kiderül, hogy a Safecast szenzor és az UAS pozíciója között változó az eltérés. Helyenként pontos, de néhol akár a 3,5 métert is eléri az x és y irányú eltérés.

5.3. Adatok feldolgozásának lépései

A drón és a Safecast műszer is különböző formátumban tárolja a rögzített pontjait. A drón esetében txt, a Safecast esetében egy log kiterjesztésű fájl áll rendelkezésünkre. Nyers formátumában egyik tábla sem használható. A drónból származó txt fájl ANSI kódolású, így ehhez egy csv formátumba konvertálás szükséges. Az általam használt térinformatikai szoftver a QGIS 3.20.2 Odense verziója. Ahhoz, hogy ebben a szoftverben megjeleníthető és elemezhetőek legyenek az adatsorok, több előkészítő művelet is szükséges, amelyeket a következő fejezetekben részletesen taglalok.

5.3.1. Az adattáblák és eltéréseik

A drón összesen 274 féle adatot tárol a mérés során, ezek közül a kiértékelés szempontjából a legfontosabbak: az idő (óra: perc: másodperc), a szélességi fok, a hosszúsági fok és a relatív magasság. A Safecastból kinyert log file esetében jóval kevesebb adatról beszélhetünk, a legfontosabb tárolt adatok ebben a táblában szintén az idő (óra: perc: másodperc), szélességi fok, hosszúsági fok, magasság, CPM érték. A két adatsor között kettő nagyon fontos eltérés van, az egyik a koordinátákban, a másik az időben. A drón a koordinátáit fok, perc, másodperc (DMS) formátumban tárolja, a Safecast viszont decimális fokban (DDMM.MM). A drón és a Safecast szenzor is

GMT (Greenwich Mean Time) időzónában számol. A Safecast szenzor ezt jeleníti meg a mérés időpontjában a kijelzőn. Importálásakor azonban az adattáblában a helyi időt mutatja, amely esetünkben GMT+2, a nyári időszámítás szerint. Az UAS minden tized másodpercben, a Safecast pedig minden ötödik másodpercben végez mérést.

5.3.2. Adatkonverzió és számítási műveletek

Ahhoz, hogy a Safecast által mért koordináták értelmezhetőek legyenek egy térinformatikai szoftver számára, először Excelben szükséges azt átalakítani. A nyers log fájlban a koordináták a következőképpen néznek ki: 4602.2653, N,01807.4137, E. Ezt a fajta decimális fok koordinátát nem képes kezelni egyik általam elérhető térinformatikai szoftver sem, így először a hosszúsági fok értéke került átalakításra egy „0” számot beszúrva az érték elé. Az így létrejött DDDMM.MM formátumú koordinátát már képes kezelni a Global Mapper szoftvere, így ezt a fájl exportálva csv formátumban importálható a szoftverbe. A Safecast GPS WGS84 dátumfelületen mér, így importáláskor vetületnek a négyzetes hengervetületet választottam, amelynek dátumfelülete WGS84. Az így megjelent pontokból álló nyomvonal innen már egyszerűen exportálható egy QGIS által is felismert shapefile-ba. A Safecast műszer nem tárolja a kalkulált dózisteljesítményt, csak a percenkénti (CPM) és az öt másodpercenként beérkező impulzusszámot. Ahhoz, hogy a dózisteljesítményt megkapjam, a CPM értékből a következő képlettel kell számolni (Cervone és Hultquist, 2018):

$$1 \mu \frac{Sv}{h} = \frac{1}{334} cpm$$

5.3.3. A leválogatás

A Safecast az által rögzített útvonalat egyetlen egy fájlban tárolja, így a nem a tesztterületen végzett adatok leválogatásra kerültek. Az adatok szelektálásának első lépéseként kiszűrtem azokat az adatokat, ahol a GPS jel vagy a sugárzásmérés érvénytelen volt. Ezt a „érvényességi adatot” a Safecast adattábla külön mezőben tárolja. A következő leválogatás a tesztterületre szűrés volt. A drón külön fájlban tárol minden külön repülést és időbélyeggel látja el azt, így a drón ideje alapján megállapítható a Safecast tartózkodási helye is. Miután megtörtént a tesztterületre szűrés, a magassági adatok szétválasztása következett. A Safecast által mért x, y értékre vonatkozó HDOP rendkívül magas értéket mutat. A HDOP (horizontal dilution of precision) az x és y irányú, vagyis a horizontális helyzet pontosságát mutatja. Minél kisebb ez az érték, annál pontosabb a horizontális pozíciómérés. A z irányú hiba mindig

nagyobb, mint az x és y irányú, így a Safecast magassági adatai ez alapján nem szolgáltatnak megbízható adatot. Az UAS a mérés során folyamatosan rögzíti a felszín feletti magasságot (AGL) és időbélyeggel ellátva tárolja azt. A Safecast magassági adatainak bizonytalansága miatt időbeli leválogatást alkalmaztam.

5.3.4. Az orthomozaik elkészítése

Orthofotókat a drón 15 és 25 méteres magasságban történő repülés közben, az RGB kamera nagyfelbontású felvételeiből készített. A 25 méteres magasságban készült felvétel nagyobb területet fed le, mint a 15 méter magasságból készült, ezért itt 271 db kép készült. 15 méter magasságban ez a darabszám 168. Az orthomozaikokat az Agisoft Metashape nevű programban állítottam össze. Ez a szoftver a képek közötti átfedések alapján keresi az egymáshoz illeszthető képeket. Miután a képek beimportálása megtörtént, a fényképeket az „Align Photos” paranccsal egymáshoz igazítottam, ezzel egy sűrű pontfelhőt létrehozva. Ahhoz, hogy ez a pontfelhő összefüggő felületet alkosson a „Build mesh” parancsot használtam. Ezzel a pontok közötti hézagok megszűntek és ebből egy psx formátumú fájl mentése után már generálható az orthomozaik. Az orthomozaik generálás beállításainál beállítható a vetület és az alapfelület, ami az általunk használt drón esetében a négyzetes hengervetület és WGS84. Az orthomozaik exportálását tiff formátumban végeztem 0.005 méteres térbeli felbontással. Az olyan fényképeket, ahol nem talált egyezést a szoftver, nem tudta összeilleszteni. Ilyen terület példámban a fás, lombos területek, így ezek helyére hézagok kerültek. A hézagok eltüntethetők kézi illesztéssel, de ez jelentős emberi beavatkozást igényel.

5.3.5. Az izovonalas térképek előállítása

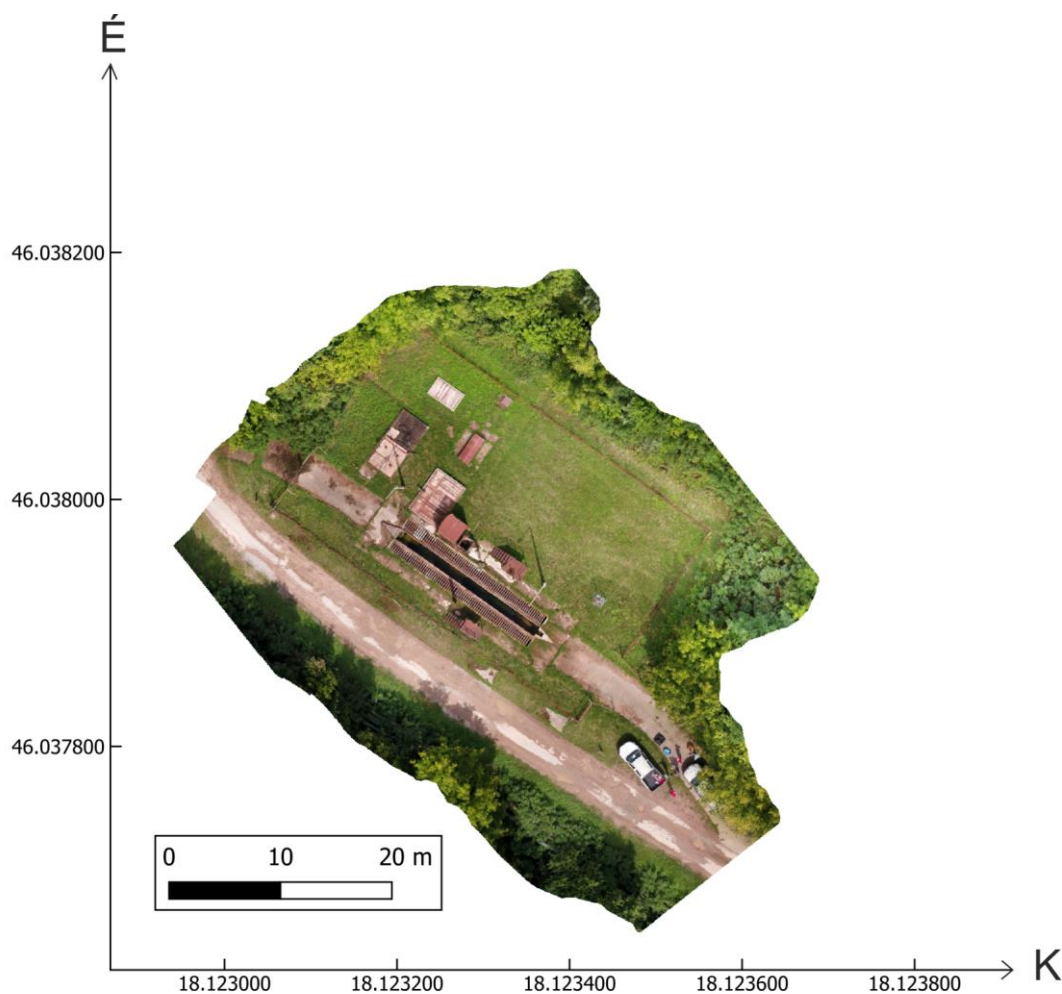
Az izovonalas térképek előállítását a Surfer 13 nevű programban végeztem. Ez a program csak decimális koordinátákat képes kezelni, ezért a QGIS programból kinyert koordinátákkal dolgoztam. Importálás után a fájlból egy grid fájlt generáltam, amelyre már helyezhető volt egy izovonalas térkép. Az interpolálási módszernek a krigelést választottam. A krigelés módszere a környező pontok értékeit veszi figyelembe, de a távolság függvényében különböző súllyal (Telbisz, et al., 2013). A Surfer működési elve alapján a vizsgált pontfelhő köré egy befoglaló téglalapot rak. Mivel az általam bevitt pontfelhő nem pont téglalap alakú, ezért a hiányzó pontok helyén extrapolál. Ez az extrapoláció hamis eredményt ad, hiszen ott is mért értéket mutat, ahol a szenzor nem járt. Ez kiküszöbölhető, ha beállításként megadjuk, hogy konvex burkot alkosson a

mérési pontjaink körül. Ahhoz, hogy az izovonalas térképek összehasonlíthatóak legyenek a színek összehangolására volt szükség. Ehhez a földi mérés színskáláját vettem alapul, ennek a színskálájához igazítottam a többi magasságban végzett mérést.

6. Eredmények

6.1. Az orthomozaikok

A 25 és a 15 méter magassági repülésből generált orthomozaikokat a 14. ábra és 15. ábraszemlélteti.



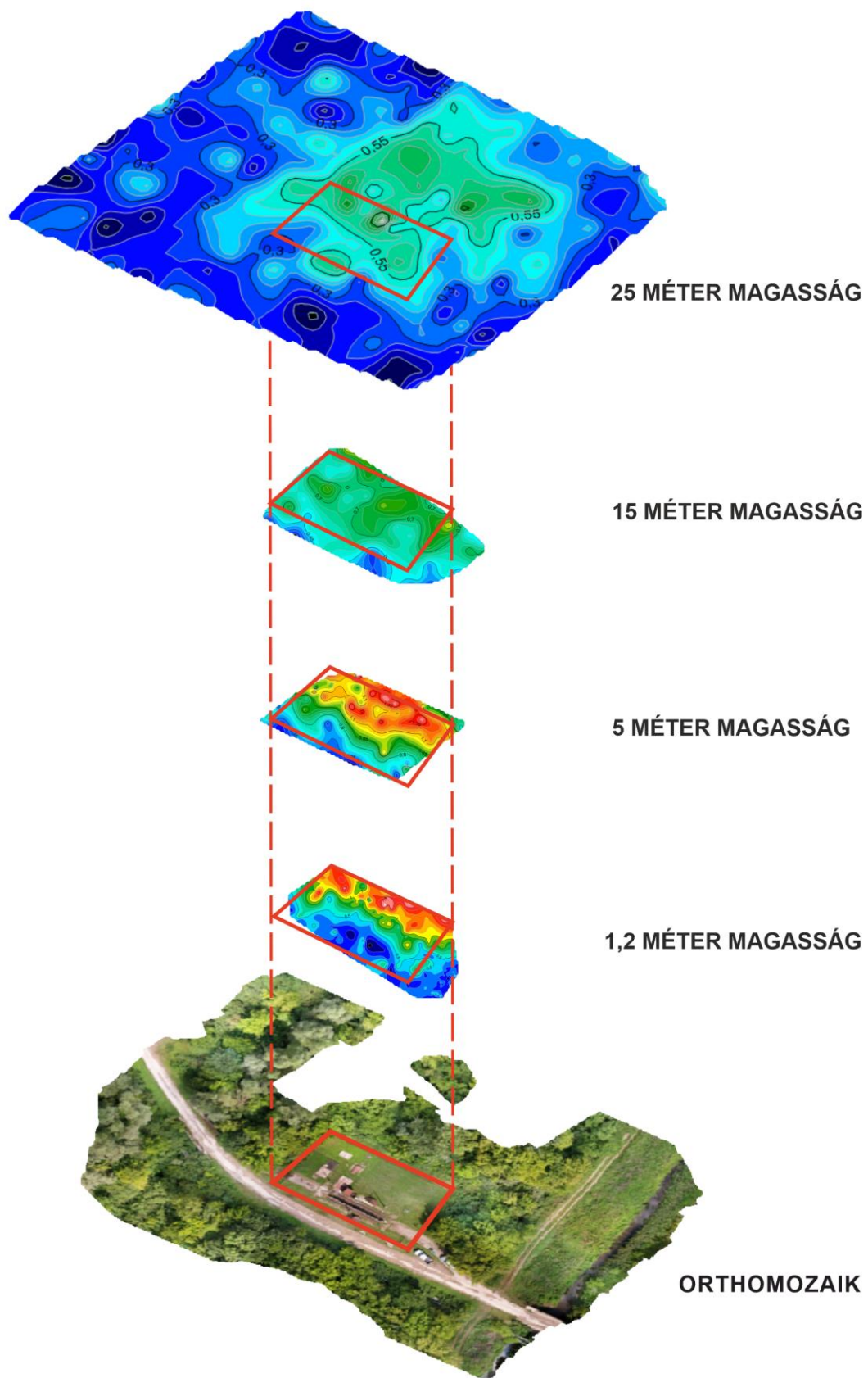
14. ábra: 15 méteres magasságú repülés képeiből generált orthomozaik



15. ábra: 25 méteres magasságú repülés képeiből generált orthomozaik

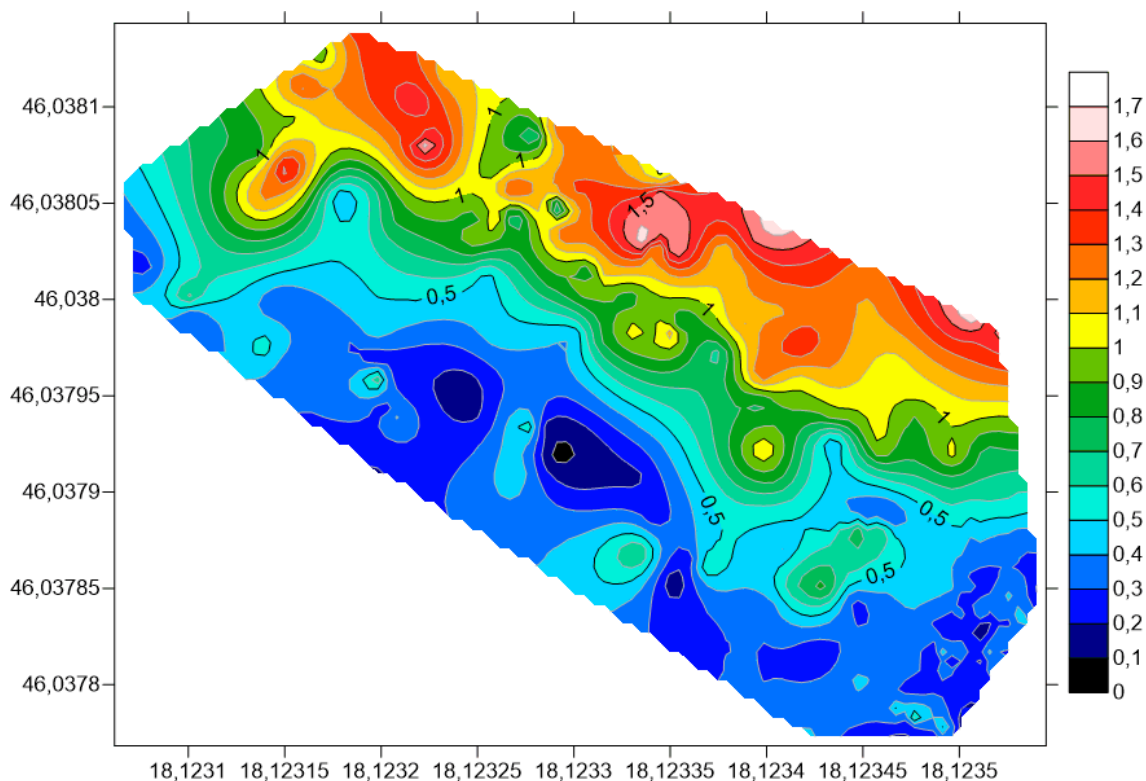
6.2. A különböző magasságban végzett mérések izovonalas térképei

A dolgozatban szereplő összes mérés idő alapján került leválogatásra. A drón adattáblájából kiolvasható, melyik óra, perc és másodpercben érte el a drón a 25 méteres, 15 méteres és 5 méteres magasságot. Átszámolva az időeltérést a Safecast szenzor és a drón között, kiemeltem a Safecast adatsorából azokat az időpontokat és hozzájuk tartozó értékeket, amelyek abban az időintervallumban biztosan 25, 15 és 5 méter magasságban voltak. Az így kapott adatsorból a Surfer 13 szoftverben izovonalas térképeket készítettem. Az áttekinthetőség érdekében a különböző rétegeket a magassággal arányosan egymásra helyeztem (16. ábra). A kocsimosó területét piros kerettel jelöltem, majd a területet felvetítettem az eltérő magasságú rétegekre.

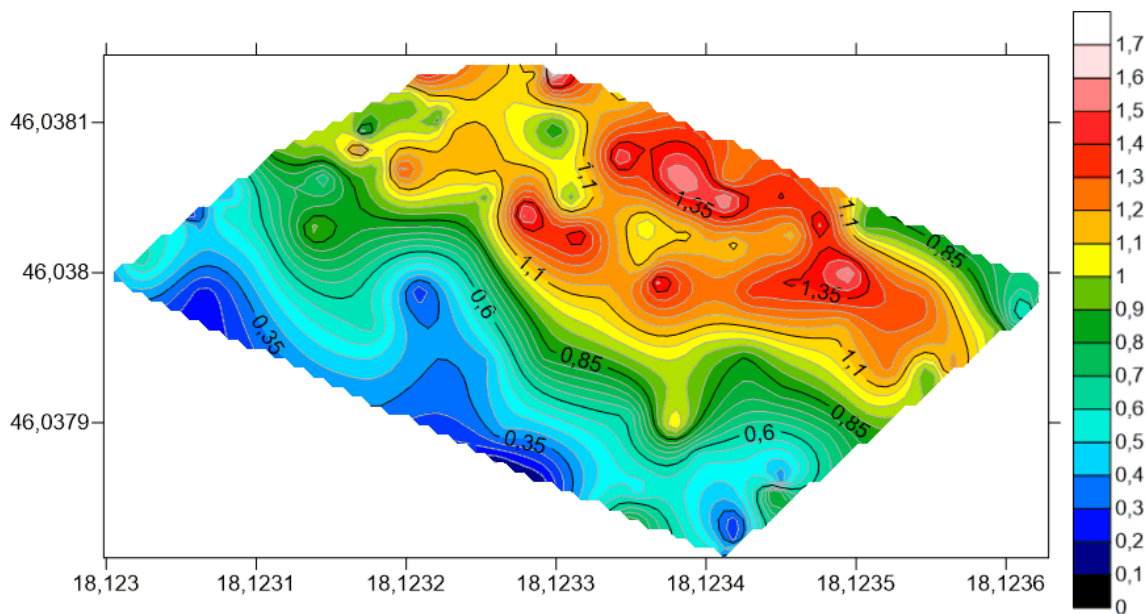


16. ábra: A kocsimosó területe (piros keret) felvetítve eltérő magasságú rétegekre

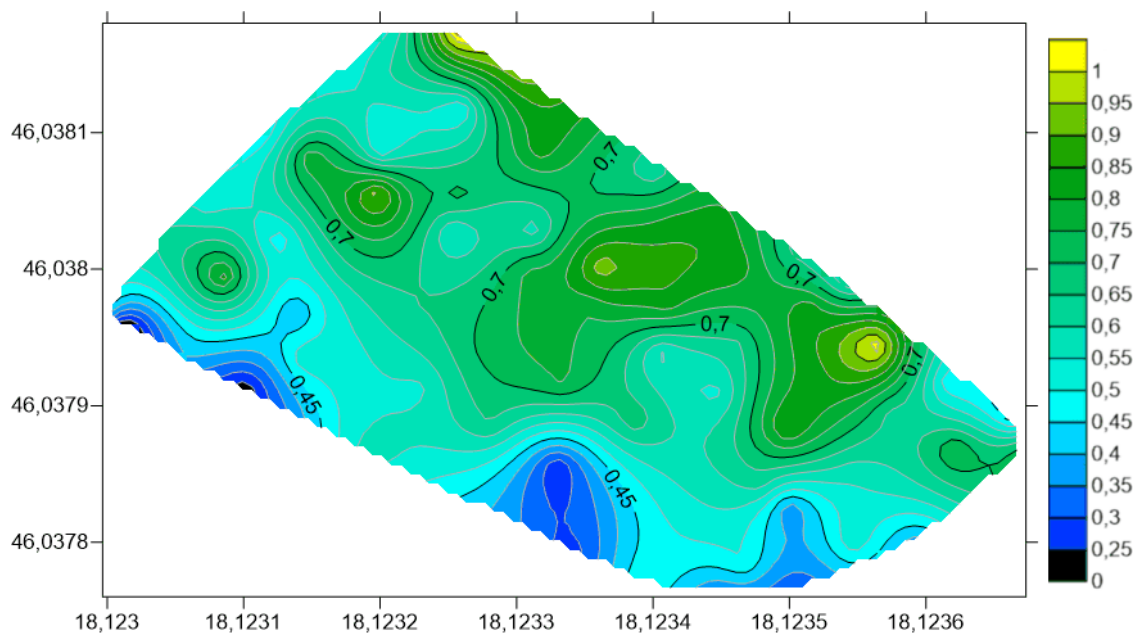
Az eltérő magasságokban készült mérésekből előállított izovonalas térképek a következőkben láthatók. Elsőként az 1,2 méter felszín feletti magasságban készült földi mérés és színskálája (17. ábra) majd az 5 (18. ábra), 15 (19. ábra), 25 (20. ábra) mérésé.



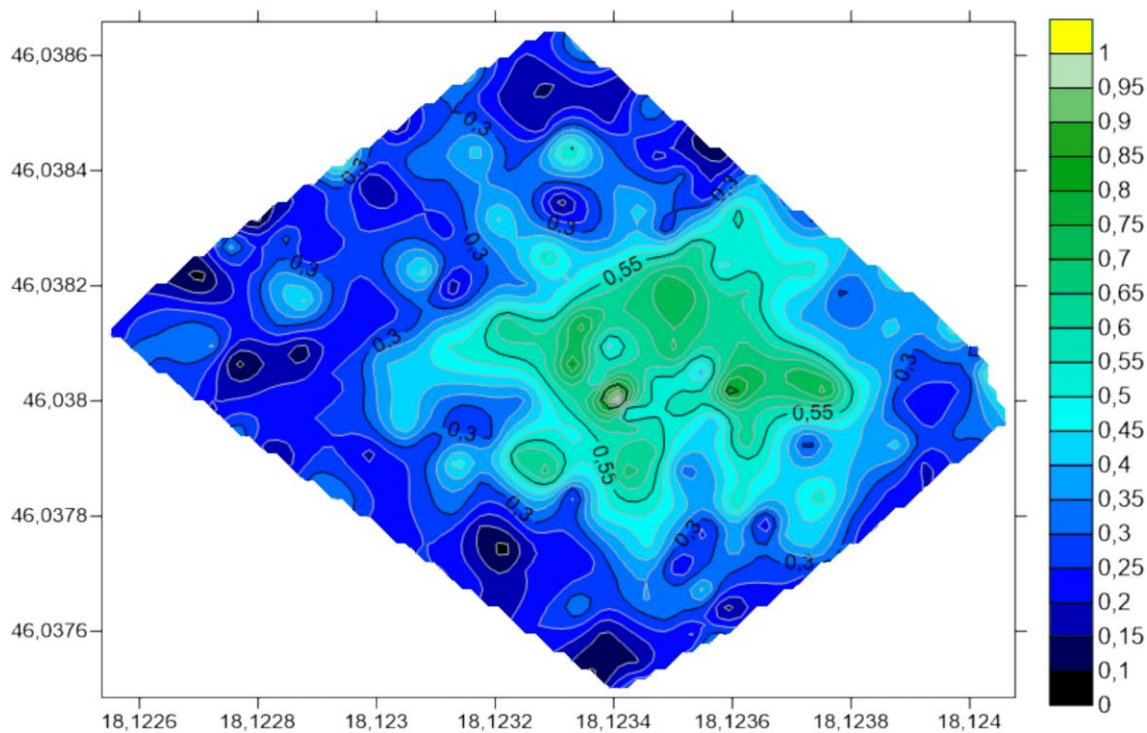
17. ábra: 1,2 méter magasságban készült mérés izovonalas térképe [$\mu\text{Sv/h}$]



18. ábra: 5 méter magasságban készült mérés izovonalas térképe [$\mu\text{Sv/h}$]



19. ábra: 15 méter magasságból történt mérés izovonalas térképe [$\mu\text{Sv/h}$]

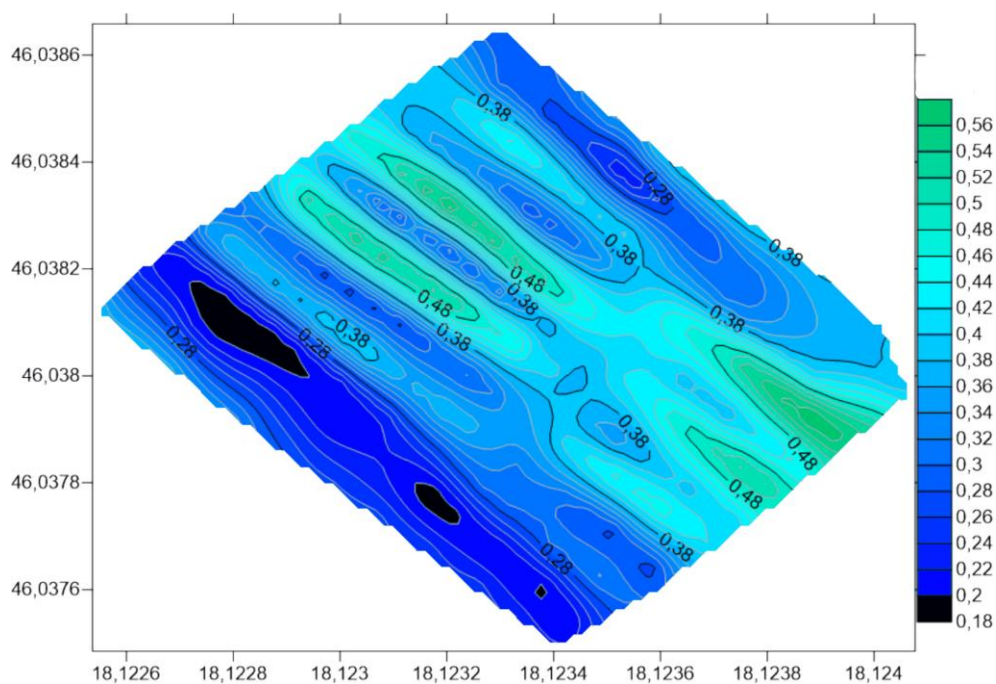


20. ábra: 25 méter magasságból végzett mérés izovonalas térképe [$\mu\text{Sv/h}$]

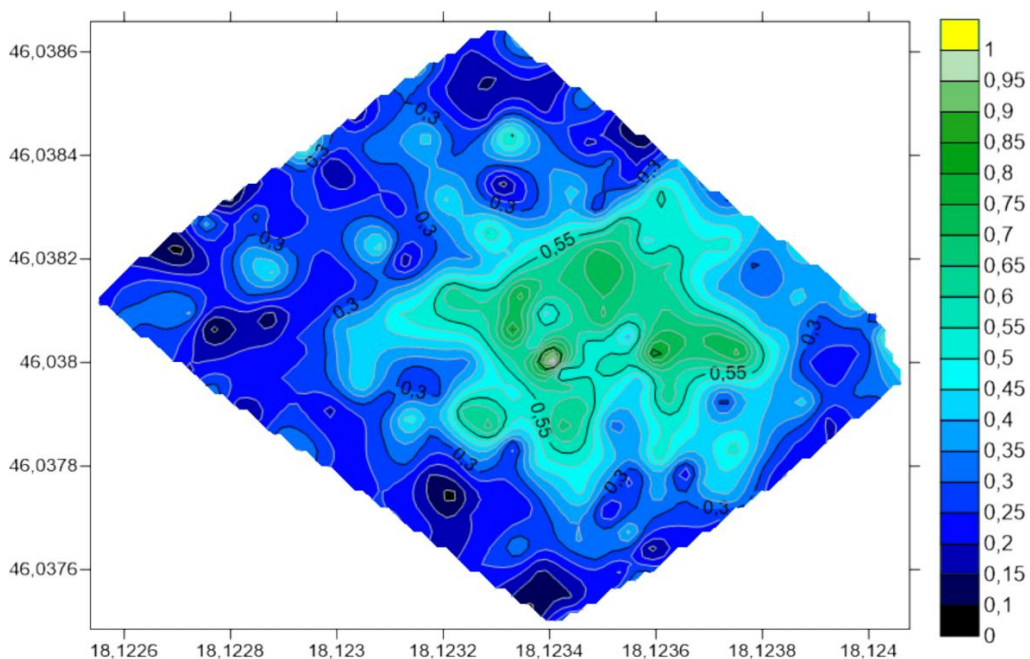
6.3. Az egyperces és öt másodperces sugárzási értékekből előállított izovonalas térképek összehasonlítása

A Safecast szenzor három féle sugárzási adatot tárol. Tárolja az öt másodpercenként mért beütésszámot, egy ezekből átlagolt 1 perces beütésszámot (CPM) és egy a mérés kezdete óta mért összes beütésszámot. A percenként mért sugárzási adat (CPM) és az öt másodperces sugárzási adatból számolt dózisértékek összehasonlításra kerültek a 25

méteres magasságú izovonalas térképpel szemlélítve. A 21. ábra a CPM értékekből származtatott izovonalas térkép, a 22. ábra az öt másodperces sugárzási adatokból származtatott térkép.



21. ábra: A CPM értékből kalkulált dózisteljesítmény izovonalas térképe [$\mu\text{Sv/h}$]



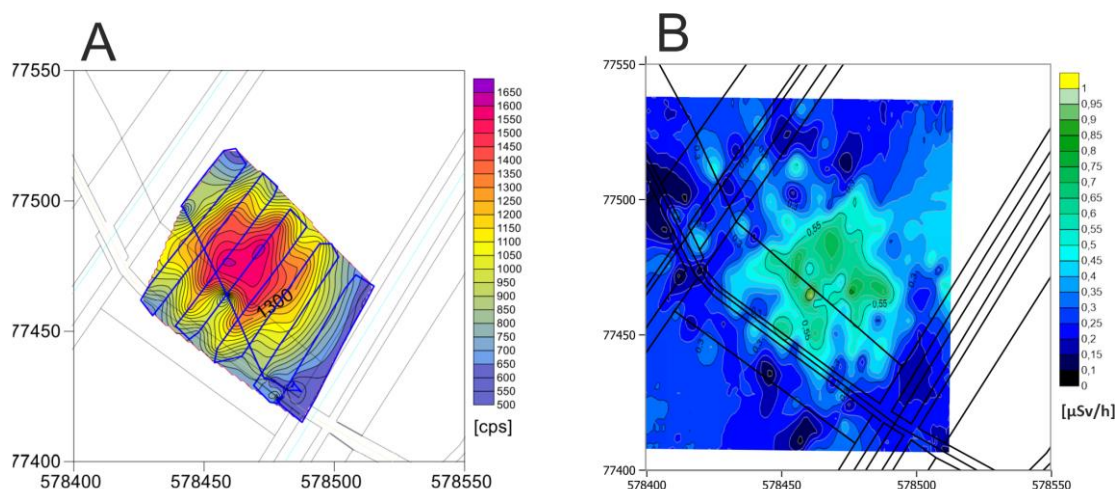
22. ábra: Az öt másodperces értékből kalkulált dózisteljesítmény izovonalas térképe [$\mu\text{Sv/h}$]

A fent bemutatott két ábrán szembevető a különbség. Az első ábrán az anomália nagyobb kiterjedést és sávszerű elrendeződést mutat. De nem csak eloszlásában tér el,

lokációjában is teljesen más pozíciót ad. A két ábra közti eltérések oka a drón útvonalának tulajdonítható. A drón sávokban térképez egy előre megszabott útvonalon, a terület pereménél pedig mindig adott nyomtávval visszafordul. Ha a dózisteljesítményt a percenkénti beütésekből (CPM) számolom, akkor a mért érték a legutóbbi 12 mérési pont átlaga lesz. 1 m/s haladási sebesség mellett így két mérési pont között 5 méter távolság van, ami felszorozva 12-vel már 60 méter átlagát jelenti. Ha az öt másodperces átlagokból számoljuk ezt az értéket, itt az érték már csak 5 méterre vonatkozik.

6.4. Összehasonlítás korábbi mérésekkel

Összehasonlításképpen a saját 25 méter magasságból végzett mérés eredményét összevetettem egy korábbi pécsi szakdolgozó 25 méter magasságú eredményével (23. ábra). Fontos eltérés a két térkép között az ábrázolt mennyiség mértékegysége. A korábbi mérés esetében ez CPS (counts per second), ami a beütések számát jelenti másodpercenként. Az általam végzett mérés percenkénti beütésszáma át lett számolva $\mu\text{Sv/h}$ dózisteljesítménnyé. A μSv mértékegység jelentősége, hogy következtethető belőle sugárzás emberi szervezetre gyakorolt hatása.



23. ábra: Hallgató által készített légi mérés CPS mértékegységben (A) és saját 25 méter magasságból készített légi mérés $\mu\text{Sv/h}$ értékben (B)

6.5. Drón előnyei és hátrányai a terepi méréshez képest

Az UAS eszközök számos előnnyel rendelkeznek a terepi mérések során. Egy megnövekedett háttérsugárzással rendelkező terület felmérése esetén felmerülhet a kockázat, hogy emberi élet veszélybe kerülhet. A drónok erre kitűnő megoldást nyújtanak, mert a pilótának nem kell a helyszínen tartózkodnia a mérés során. Alkalmazhatóak továbbá olyan területen is, ahol a terepviszonyok korlátoznák a terepi

bejárást. Ezeken felül a terepi mérésnél, bejárásnál lényegesen gyorsabban bevethetőek, ami egy fontos kritérium vészhelyzetekben. Hátrányai közé tartozik az UAS költsége, mely elég masszív és erős kell legyen, hogy egy sugárzásdetektort elbírjon. Korlátozó tényezője továbbá, hogy függ az időjárás viszonyosságaitól és az akkumulátor kapacitásától.

7. Diszkusszió

A négy különböző magasságban készített mérést összehasonlítva látható, hogy a sugárzási anomália mértéke a távolság növekedésével méterenként átlagosan $0.05 \mu\text{Sv/h}$ -val csökken. A földi, terepi bejárás intenzitásértékeihez viszonyítva az is megállapítható, hogy a földi mérésen kirajzolódó anomália a földtől távolodva egyre inkább összeolvad. Az ábrákhoz használt koordináták a Safecast autonóm üzemmódú GPS egységéből származnak. Az is leírható, hogy bár a magasság növekedésével a sugárzás intenzitása csökken, a megemelkedett háttérsugárzással rendelkező terület 25 méteres magasságból is beazonosítható. A vizsgált terület esetében a földtől 1,2 méterre a legmagasabb mért érték $1.7 \mu\text{Sv/h}$, a legaktívabb pont a 25 méter esetében már csak $1 \mu\text{Sv/h}$. A korábbi mérésekkel összehasonlítva elmondható, hogy a sugárzási anomália mindegyik esetben hasonló módon kirajzolódik. A CPM és az öt másodperces sugárzási adatból kalkulált dózisteljesítmény összehasonlításánál jól látszik, hogy ha csak a perces átlagot vesszük figyelembe, a térkép a detektor mozgása miatt eltranszformálódik, a valóságtól eltérően sávós szerkezetet mutat. Jövőbeli feladatom, hogy a sugárzásmérő eszköz pozícióját rápontosítsam a drón RTK alapú koordinátáira, ezzel pontosabb képet kapva a sugárzási anomáliák pozíciójáról.

8. Konklúzió

A fent leírtak értelmében megállapítható, hogy:

1. Egy költséghatékony szenzor is képes nagy sugárzási anomáliák detektálásra
2. A teraszterikus forrásból származó sugárzás detektálhatósága a magasság növekedésével méterenként átlagosan $0.05 \mu\text{Sv/h}$ -val csökken.
3. Ha a mérő eszköz a sugárzási anomáliák detektálása során mozog (a dolgozat esetében az UAS), akkor nem elegendő az egyperces impulzusértékkel (CPM) számolni.
4. A felszínen $1,7 \mu\text{Sv/h}$ dózisú anomália kirajzolódik még akkor is, ha az adatokat 25 méteren 1 m/s sebességű drónnal vesszük fel.

9. Összefoglalás

Jelen dolgozatban megvizsgálom az UAS eszközökkel történő sugárzási anomáliák térképezésének lehetőségét. Bevezetésként kitérek a sugárzás és az UAS eszközök főbb tulajdonságaira. A szakirodalmat áttekintve kitérek a gamma-sugárzás térképezésének korábbi módszereire és egy kővágószőlősi példán keresztül egy költséghatékony sugárzási szenzorral terepi mérést végeztem. A terepi mérés során három különböző magasságokban hajtok végre repülést a dolgozatban részletesen bemutatott UAS eszközzel; 5, 15 és 25 méter magasságban. Az összehasonlíthatóság érdekében egy földi bejárást is végeztem a területen, a műszert 1,2 méter magasságban tartva a földfelszíntől. Az adatok feldolgozásához először átalakításukra volt szükség, ehhez az Excel program függvényeit, majd a GlobalMapper nevű szoftvert használtam. Összehasonlítottam az UAS és a Safecast szenzor által bejárt útvonalat, ebből megállapítottam, hogy a Safecast szenzor x és y hibája átlagosan __ méter. Ebből azt a következtetést vontam, le, hogy a Safecast z irányú hibája biztosan nagyobb, így nem szolgáltat pontos magassági adatot. Ennek nyomán a különböző magasságú repülések kontrollpontjai idő alapján kerültek leválogatásra. A Safecast által tárolt kétféle sugárzási adatokból (CPM és öt másodperces impulzusok száma) dózisteljesítményt kalkuláltam és a két értékből kapott eredményt összehasonlítottam, majd levontam a következtetést, hogy mozgó járművel történő mérés esetén nem elegendő az egyperces átlag (CPM) használata, ez hamis eredményt ad. Ennek tudatában az öt másodperces adatból számolt dózisteljesítményt izovonalas térképeken ábrázoltam a négy eltérő magasságban és ezeket összehasonlítottam. Az összehasonlításból kiderül, hogy a sugárzási anomália intenzitása átlagosan méterenként $0.05 \mu\text{Sv/h}$ -val csökken a magasság növekedésével párhuzamosan. A 15 és 25 méter magasságban végzett repülés során orthofotók is készültek. Ezekből a képekből orthomozaikokat állítottam össze az Agisoft Metashape nevű szoftver segítségével, majd ezeken a mozaikokon mutattam be a QGIS program segítségével a bejárt útvonalakat.

10. Irodalomjegyzék

Alex, E. (2017) *DRÓNOK KÉZIKÖNYVE. ALKALMAZÁS - KARBANTARTÁS - MŰKÖDTETÉS - ÉPÍTÉS*. Cser Kiadó.

Bánvölgyi, F. and Kukai, A. (2014) 'Volt egyszer egy uránbánya'.

bGeigie Nano | Safecast (2018). Available at: <https://blog.safecast.org/bgeigie-nano/>.

Breitnel, D., Török, S. and Márton, I. (2012) 'Globális urántartalékok földtani és mennyiségi értékelése', *Nukleon*, V, p. 103. Available at: <https://nuklearis.hu/nukleon/cikkek>.

Brown, A. *et al.* (2016) 'Safecast: Successful citizen-science for radiation measurement and communication after Fukushima', in *Journal of Radiological Protection*. Institute of Physics Publishing, pp. S82–S101. doi:10.1088/0952-4746/36/2/S82.

Cervone, G. and Hultquist, C. (2018) 'Calibration of Safecast dose rate measurements', *Journal of Environmental Radioactivity*, 190–191(April), pp. 51–65. doi:10.1016/j.jenvrad.2018.04.018.

Collum, B. (2017) 'Radiation', *Nuclear Facilities*, pp. 45–60. doi:10.1016/B978-0-08-101938-2.00002-7.

Eisenbud, M. and Paschoa, A.S. (1989) *ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY **, 470 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*.

Evans, R.D. and Goodman, C. (1941) 'Radioactivity of Rocks', *BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*, 52, pp. 459–490.

Fujino, T. *et al.* (2001) 'Uranium chemistry', *Chemical and Engineering News*, 79(41), p. 31.

Garamhegyi, G. (2019) *SAFECAST-PROJEKT MEGVALÓSÍTÁSA AZ ISASZEGI GÁBOR DÉNES GIMNÁZIUM ÉS SZAKGIMNÁZIUMBAN*. Available at: <https://safecast.org/tilemap>.

Heier, K.S. and S Adams, J.A. (1965) *Concentration of radioactive elements in deep crustal material*. Pergamon Press Ltd.

International Atomic Energy Agency (2003) 'Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data', *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 4(July), pp. 1549-1555. Available at: http://cdiac.esd.ornl.gov/oceans/GLODAP/glodap_pdfs/Thermohaline.web.pdf.

Kiss, Á. (2007) 'Környezetfizika', *ELTE-munkafüzetek*, pp. 22–29.

Kiss, Á. and Tasnádi, P. (2012) *Környezetfizika*. Available at: http://etananyag.ttk.elte.hu/FiLeS/downloads/EJ-Kiss_A_kornyezettan_alapjai.pdf.

LND (no date) *7317 Low voltage pancake mica window*. Available at: <https://lndinc.com/products/geiger-mueller-tubes/7317/>.

MacFarlane, J.W. *et al.* (2014) 'Lightweight aerial vehicles for monitoring, assessment and mapping of radiation anomalies', *Journal of Environmental Radioactivity*, 136, pp. 127–130. doi:10.1016/j.jenvrad.2014.05.008.

- Major, K. and Kozma-Bognár, V. (2016) 'Távírányítású drónok kutatási célú vizuális adatainak alkalmazása az oktatásban'. doi:10.13140/RG.2.1.1361.1122.
- Manga, L. (2018) *SÚLYOS NUKLEÁRIS BALESET ESETÉN ALKALMAZHATÓ SUGÁRVÉDELMI MÓDSZEREK (RADIATION PROTECTION METHODS IN CASE OF SERIOUS ACCIDENTS)*.
- Manga, L. and Csurgai, J. (2017) 'Pilóta nélküli repülők a sugárfelderítésben Tartalom'.
- MEREDITH, W.J. and MASSEY, J.B. (1977) 'RADIOACTIVITY', *Fundamental Physics of Radiology*, pp. 22–30. doi:10.1016/B978-0-7236-0778-6.50007-0.
- Molnar, A., Domozi, Z. and Lovas, I. (2021) 'Drone-based gamma radiation dose distribution survey with a discrete measurement point procedure', *Sensors*, 21(14). doi:10.3390/s21144930.
- Palik, M. (2007) *Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Hadtudományi Doktori Iskola*.
- Palik, M. (2013) *Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek*.
- Panikkath, P. et al. (2020) 'Estimation of neutron energy distributions from measured prompt gamma intensities: Experimental validation', *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 969. doi:10.1016/j.nima.2020.164101.
- Pethő, G. and Vass, P. (2011) *GEOFIZIKA ALAPJAI* 3.
- Pieter (2013) *The bGeigie Nano Kit*. Available at: <https://safecast.org/2013/03/the-bgeigie-nano-kit/>.
- Pöllänen, R. et al. (2009) 'Radiation surveillance using an unmanned aerial vehicle', *Applied Radiation and Isotopes*, 67(2), pp. 340–344. doi:10.1016/j.apradiso.2008.10.008.
- Reavis, B. and Hem, B. (2011) 'Honeywell T-Hawk Aids Fukushima Daiichi Disaster Recovery: Unmanned Micro Air Vehicle Provides Video Feed to Remote Monitors', *Honeywell Aerospace Media Center* [Preprint].
- Restás, Á. (2017) *A drónok közszolgálati alkalmazásának lehetőségei*.
- Sanada, Y. and Torii, T. (2015) 'Aerial radiation monitoring around the Fukushima Daiichi nuclear power plant using an unmanned helicopter', *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, pp. 294–299. doi:10.1016/j.jenvrad.2014.06.027.
- Sebestyén, Z. (2010) *Radioaktív sugárzások*.
- Telbisz, T., Székely, B. and Timár, G. (2013) *Digitális terepmodellek, adat, látvány, elemzés*. Available at: www.tef.elte.hu.
- Tóth, I. (2021) *Drónokkal történő terepi felvételezés a precíziós mezőgazdaság elősegítésének céljából*. Available at: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2019.html>.
- Walsh, J. (2019) *Assessment of Safecast bGeigie Nano Monitor, Radiation Environment and Medicine*. Available at: <http://safecast.org/tilemap/?y=38.7&x=135.1&z=5&l=0&m=0>.

Watts, A.C., Ambrosia, V.G. and Hinkley, E.A. (2012) 'Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use', *Remote Sensing*, 4(6), pp. 1671–1692. doi:10.3390/rs4061671.

Zafir, H. *et al.* (1993) 'Unmanned Airborne System in Real-Time Radiological Monitoring', *Radiation Protection Dosimetry*, 50(2–4), pp. 295–299.

Zelenák, J. *et al.* (2009) 'A légi sugárfelderítés képességei alkalmazhatóságának vizsgálata elveszett, vagy ellopt sugárforrások felkutatása, illetve szennyezett terepszakaszok felderítése során', *Hadmérnök*, IV(1), pp. 46–62. Available at: http://hadmernok.hu/2009_1_zelenak.pdf.

11. Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti Dr. Kovács Béla és Dr. Horváth Ákos témavezetőimet, akik idejüket nem sajnálva segítették a dolgozathoz kapcsolódó számos logikai összefüggés megértését.

Köszönettel tartozom továbbá Garamhegyi Gábornak és az isaszegi Gábor Dénes Gimnáziumnak, amiért a Safecast bGeigie Nano Kit készüléket rendelkezésemre bocsátották.

Köszönet illeti Hajdinákné Vörös Fanni doktoranduszt fáradhatatlan támogatásáért, rendelkezésre állásáért és segítségéért.

Megköszönöm továbbá Dr. Várhegyi Andrásnak és Tóth Szabolcsnak a terepi felvételezésen történt alapos körbevezetést és részletes magyarázatokat.

Köszönöm Pál Márton doktorandusznak a terepen és a szoftverek kiismerésében nyújtott segítségét.

12. Nyilatkozat

Nyilatkozat

Alulírott, Katreiner Hédi nyilatkozom, hogy jelen szakdolgozatom teljes egészében saját, önálló szellemi termékem. A szakdolgozatot sem részben, sem egészében semmilyen más felsőfokú oktatási vagy egyéb intézménybe nem nyújtottam be. A szakdolgozatomban felhasznált, szerzői joggal védett anyagokra vonatkozó engedély a mellékletben megtalálható.

A témavezető által benyújtásra elfogadott szakdolgozat PDF formátumban való elektronikus publikálásához a tanszéki honlapon

HOZZÁJÁRULOK

NEM JÁRULOK HOZZÁ

Budapest, 2022. május 15.

.....*Katreiner Hédi*.....
a hallgató aláírása