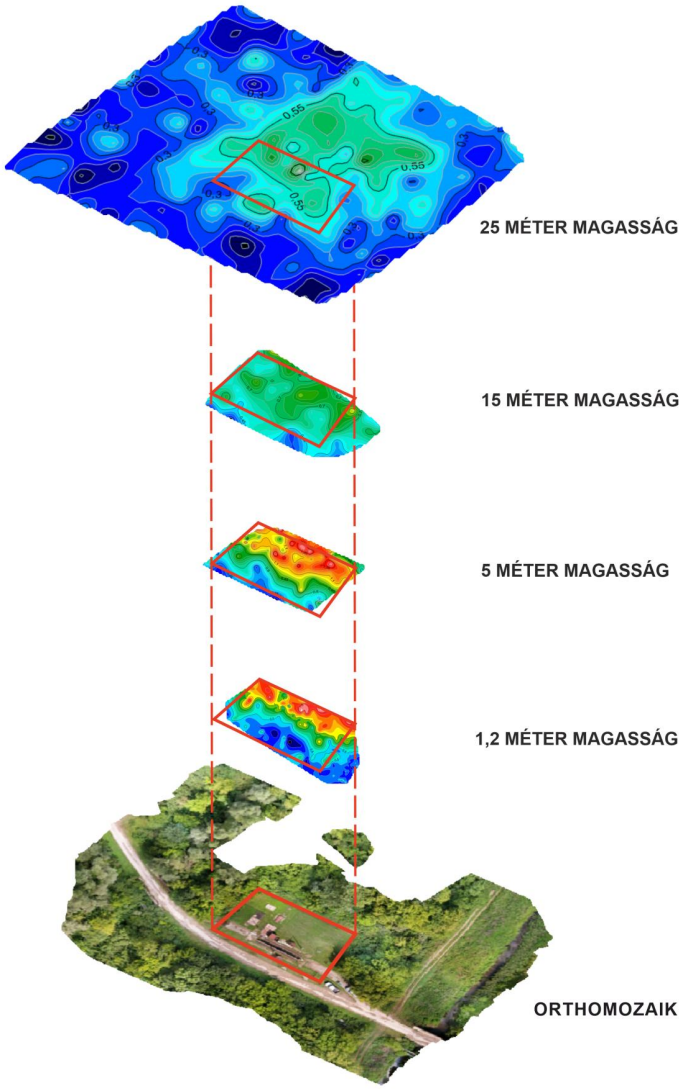
Gamma-dózisteljesítmény térképezése drónra integrált sugárzásmérő szenzorral

Tudományos diákköri dolgozat

Készítette: Katreiner Hédi



Témavezetők: Kovács Béla adjunktus és Horváth Ákos docens

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Térképtudományi és Geoinformatikai 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 természetes radioaktív sugárzás forrásai ... 6
3. Korábbi kutatások ... 7
3.1. Gamma-sugárzás felderítésének és mérésének módszerei ... 7
3.1.1. Hagyományos sugárzásmérések ... 7
3.1.2. Drónról végzett sugárzásmérések ... 10
4. Vizsgált területek bemutatása ... 11
4.1. Kővágószőlős és a kővágószőlősi uránbánya ... 11
4.2. Az urán és tulajdonságai ... 11
4.3. A teszterületek bemutatása ... 12
4.4. Korábbi mérések a teszterületeken ... 13
5. Módszertan ... 15
5.1. Használt eszközök és szenzorok ... 15
5.1.1. A drón/ UAS ... 15
5.1.2. A Safecast szenzor ... 15
6. Felmérések ... 17
6.1. A „kocsimosó” felmérése ... 17
6.1.1. Repülési paraméterek ... 17
6.2. A Kossuth Lajos utcai felmérés ... 18
7. Az adatfeldolgozás lépései ... 19
7.1. Az adattáblák és eltéréseik ... 20
7.2. Adatkonverzió és számítási műveletek ... 21
7.3. A leválogatás ... 21
7.4. A Safecast által mért adatok RTK GPS-re pontosítása ... 22
7.5. Az orthomozaik elkészítése ... 22
7.6. Az izovonalas térképek előállítása ... 23
8. Eredmények ... 23
8.1. A „kocsimosó” különböző magasságú izovonalas térképei ... 23
8.2. A Kossuth Lajos utcai anomália különböző magasságú izovonalas térképei ... 26
8.3. Az egyperces és öt másodperces sugárzási értékekből előállított izovonalas térképek összehasonlítása ... 29
8.4. Autonóm GPS-szel mért és RTK GPS-re illesztett sugárzási adatok összehasonlítása 31
8.5. Összehasonlítás korábbi mérésekkel ... 36
8.6. Drón előnyei és hátrányai a terepi méréshez képest ... 37
9. Diszkusszió ... 37
10. Konklúzió ... 38
11. Összefoglalás ... 39
12. Irodalomjegyzék ... 40
13. Köszönetnyilvánítás ... 42
14. Nyilatkozat ... 42

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 fukusimai 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 ÉS 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 (lsd. Korábbi kutatások).

A dolgozatom 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 bányaüzemhez 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 rögzítettem.

A felmérést két különböző pontossággal vizsgáltam. Az első egy autonóm GPS pontosságát veszi alapul, a másodikban RTK GPS-re pontosított adatokkal dolgoztam.

A dolgozatban két területet vizsgálok. Az első területet 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 orthomozaik is készült. A második területet szintén három magasságban mértem fel, ez esetben 48 méter, 24 és 12 méter magasságból, majd ennek a területnek a földi bejárása is megtörtént a terepi viszonyokhoz mért részletességgel. Az adatok előkészítését Excelben és Global Mapper-ben kezdtem, 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 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 elkülöníthetőek 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 *et al.*, 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. A jelen dolgozatban használt drón egy VTOL típusú kvadrokopter (lsd. 5.1.1.).

2.2. A radioaktivitás és a sugárzás tulajdonságai

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 (másnéven 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).

2.2.1. 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 sugárterhelésének legnagyobb sugárforrása a radonból és leányelemeiből származik (KISS és TASNÁDI, 2012).

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 terresztrikus (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 μSv/év (EISENBUD és 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 50-180 nSv/óra, ami 0.05-0.18 μSv/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 dózisintenzitás 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 (*1. ábra*) tulajdonképpen diódák, amelyeket elsősorban félvezetők (nagyrészt szilícium és germánium) egykristályából készítenek.

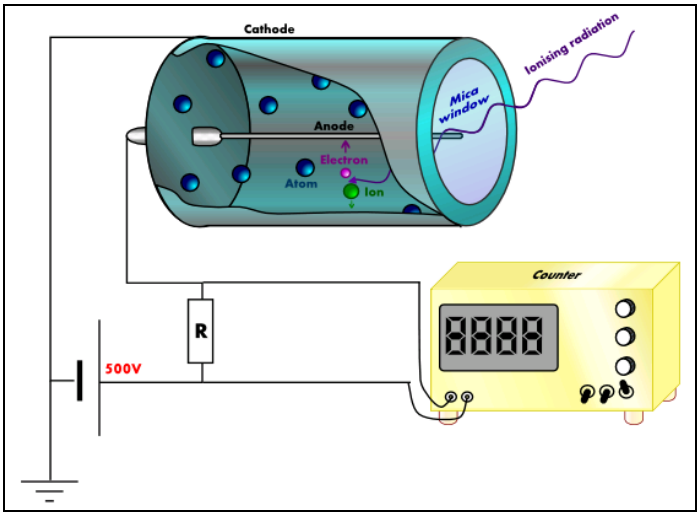
1. ábra: Germánium félvezető detektor (Semiconductor detector-WIKIPEDIA,2022)

A szcintillációs detektorok (*2. 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.

2. 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 érzékelt 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 *3. ábra* szemlélteti.



3. 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 felszerelhetőek 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 helikoptereshez 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. Ez a szerkezet alkalmas szennyezett területek lokalizálására és felderítésére is, de merevszárnyú kivitelezése miatt inkább nagyobb kiterjedésű és aktivitású területeken hatékonyak.

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 $LaBr_3$: 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 területek bemutatása

4.1. Kővágószőlős és 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 és 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).

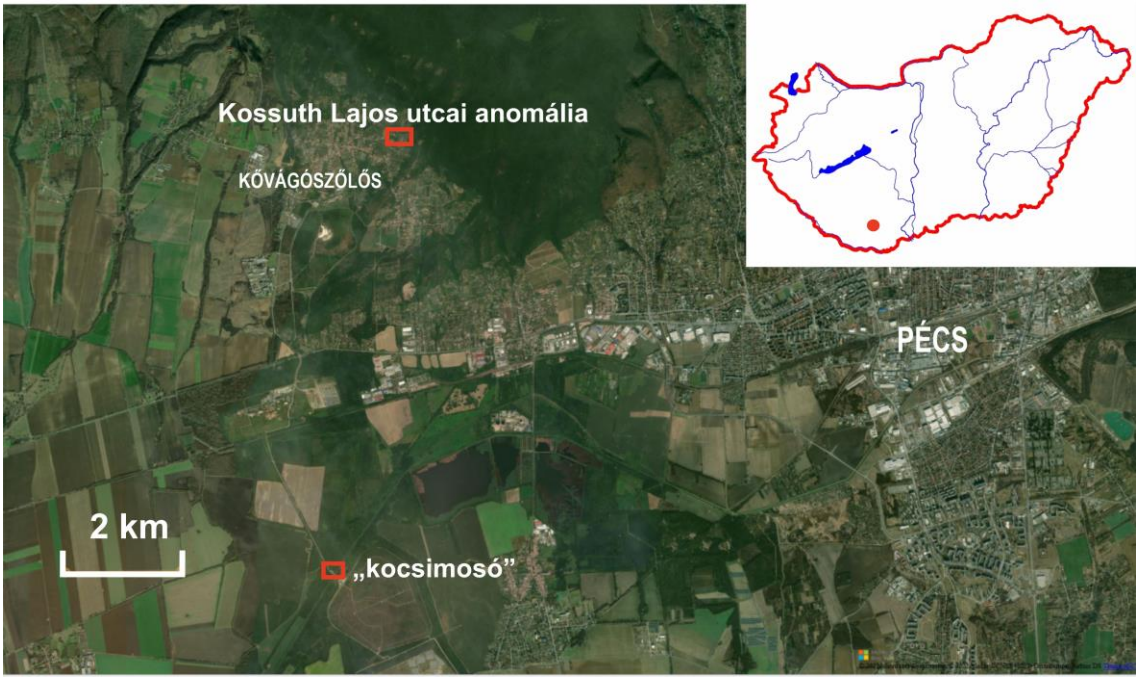
4.2. Az urán és tulajdonságai

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 természetben 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., 2008). 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 reduktív környezetek, amelyben a szerves anyagok bomlása lelassul. Ilyen környezet például a homokkő, ezért a homokkő formációkban gyakori az uránérc telepek előfordulása (BREITNER et al., 2012). A *1. táblázat* tartalmazza néhány üledékes kőzet és magmás kőzet uránkoncentrációját ppm értékben (PETHŐ és VASS, 2011).

Üledékes kőzetek uránkoncentrációja	
kőzet	**Urán (ppm)**
mészkő	1.5-2
homokkő	1.5-2.1
agyag	4-6
Magmás kőzetek uránkoncentrációja	
ultrabázitok	0.001-0.01
peridotit	0.01-0.015
gabbro	0.5-0.9
bazalt	0.5-1.5
andezit	1.8-2.1
diorit	1.8-2
riolit	2.5-5
gránit	4-10

1. táblázat: Uránkoncentráció különböző kőzetekben [ppm]

4.3. A teszterületek bemutatása



4. ábra: Áttekintő térkép a vizsgált területek elhelyezkedéséről

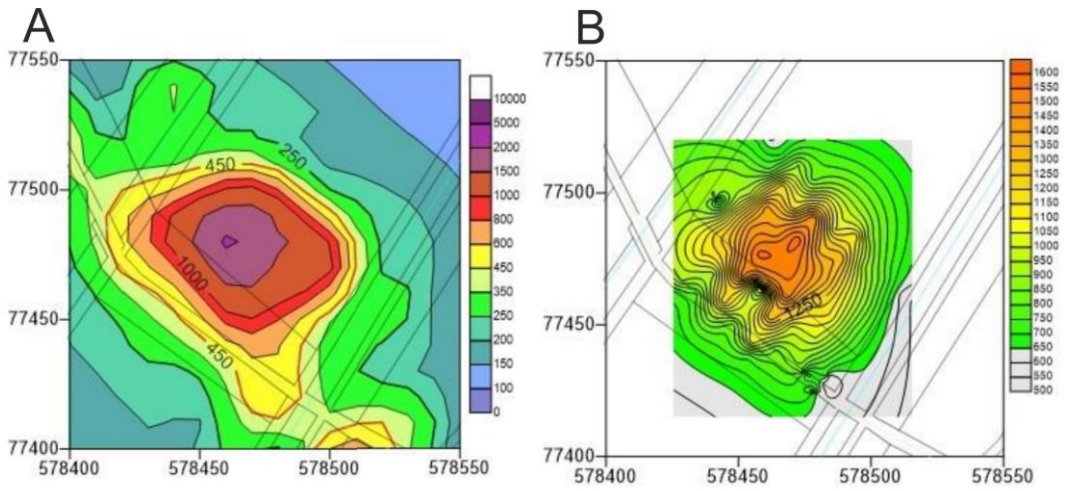
1) A „kocsimosó”: A vizsgált terület az egykori kővágószőlősi uránbánya, ma a Bányavagyon-hasznosító Nonprofit Közhasznú Kft területén található. A bánya vágataiból kitermelt ércet a Kővágószőlős területén lévő feldolgozó üzembe szállították. A jelen vizsgálatban egy érintett terület, a teherautók lemosására 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)

2) **Kossuth Lajos utca:** A vizsgálat második helyszínének egy a településen található utca (Kossuth Lajos utca) egy szakasza ad otthont. Az itt felbukkanó anomáliát már korábban többen feltérképezték különböző műszerekkel. Ez alapján készült a településről egy gamma-dózisteljesítmény térkép (NAGY, 2003). Majd a térkép alapján egy terület részletesebb vizsgálata (MOLNÁR, 2020). Korábbi kutatásokból kiderül, hogy a gamma-spektrum alapján uránhoz (U-238-as izotóp) köthető az anomália és egy felszínhez közeli uránlencse okozza az anomáliát. A terület alatt fut egy a Mecsekérc Ércbányászati Vállalat által birtokolt K-i táró, de ez bizonyítottan nem befolyásolja a sugárzás értékét (MOLNÁR, 2020).

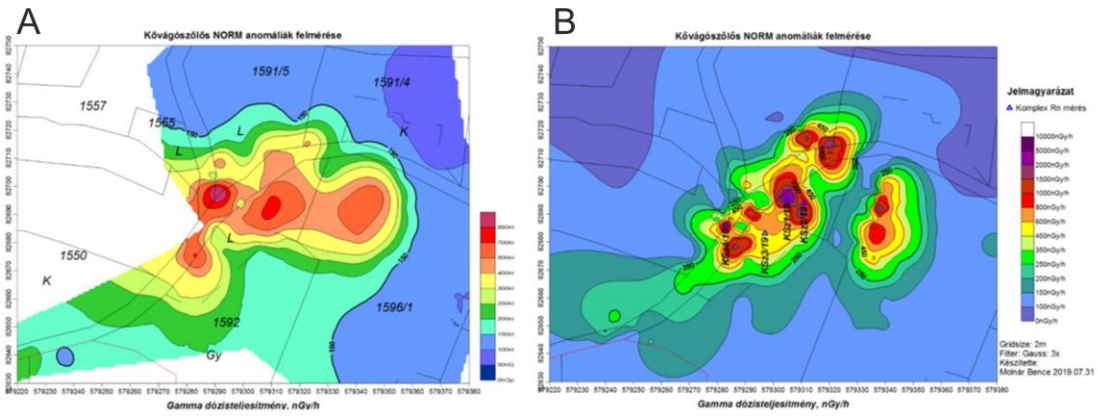
4.4. Korábbi mérések a teszterületeken

A „kocsimosó" területén 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 szennyeződéseket mértek (SZILÁGYI, 2017). Az általam vizsgált „kocsimosó" területét a Mecsekérc Zrt. is felmérte 2017-ben egy szcintillációs detektor segítségével, terepi bejárással. Ugyanezen 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 az *5. ábra* szemlélteti.



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

A Kossuth Lajos utcai anomáliát több hallgató is feltérképezte. A 2003-ban Nagy Gabriella által készített Gamma-dózisteljesítmény térképen már kirajzolódik a nagyobb intenzitás. Egy 2019-es TDK munka keretében is felmérésre került a helyszín Molnár Bence által. Itt a felmérés terepi bejárással történt, egy Na (TI) szcintillációs detektor segítségével. A két térképet a *6. ábra* mutatja be.



6. ábra: Nagy Gabriella térképe (A) és Molnár Bence térképe (B)

5. Módszertan

5.1. Használt eszközök és szenzorok

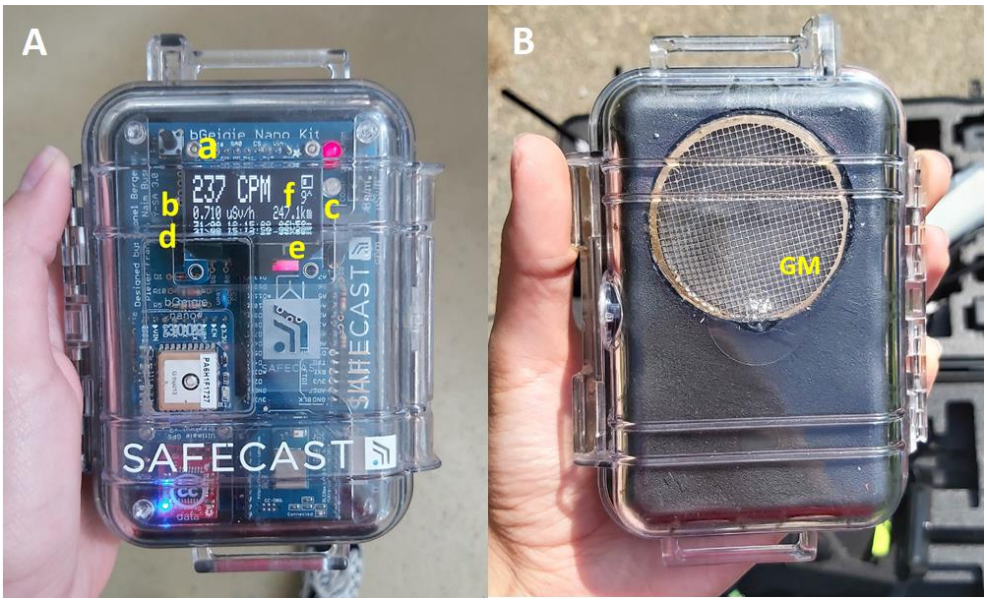
5.1.1. A drón/ UAS

A felméréshez használt készülék egy DJI Matrice 210 V2 RTK UAS forgószárnyas kvadrokopter volt (*7. 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 felméréshez használt drón kb. 4.91 kg, ezen felül pedig 1.23 kg hasznos terhet képes elbírni. Lebegési pontossága vertikális és horizontális irányban is +-0.1 méter. Repülési idejét több minden befolyásolja, de ideális időjárási körülmények között teher nélkül 33 perc, maximum terhelés mellett 24 perc a maximum repülési ideje.

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

5.1.2. A Safecast szenzor

A Safecast bGeigie Nano Kit (*8. 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.



8. ábra: Safecast bGeige Nano Kit felülről (A) és alulról (B)

A bGeigie Nano készülék képes alfa, béta és gamma-sugárzás detektálására, ezen sugárzások dózisteljesítményének és beütésszámának mérésére (WALSH, KELLEHER és CURRIVAN, 2019). A dózisteljesítmény mérésére egy LND 7317 „Palacsinta" Geiger Müller számlálót használ. Ez a GM cső (*8. 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 (µSv/h) ad vissza minden 5 másodpercben. A második mérési módja az „xGeige mód", amely dózisteljesítményt adja eredményül µSv/h mértékegységben, de ez nem „naplóz". A harmadik mód az „iGeige", 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, KELLEHER és CURRIVAN, 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 vámeljárás költsége, így jött ki végösszegként a 211 300.-Ft (GARAMHEGYI, 2019).

6. Felmérések

6.1. A „kocsimosó" felmérése

A tesztterület felmérésére 2021. augusztus 31-én került sor Kővágószőlősön, a Bányavagyon-hasznosító Nonprofit Közhasznú Kft. területén. A mérést az előbbiekben 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 (*2. ábra*), a helyszínen történő összehasonlítás érdekében. A szcintillációs detektor és a Geiger-Müller számlálóval ellátott Safecast szenzor között a legjelentősebb különbség, hogy eltérő módon mérik a sugárzást, ezért érzékenységük is eltér.

6.1.1. Repülési paraméterek

Az első repülés egy tervezett repülés volt „Mission Flight" módban, 25 méter magasságban, 1 m/s sebességgel. 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. A tervezett repülés lehetőséget ad egyenletes sebesség és magasság tartására, így a sugárzásmérés szempontjából ez a legmegfelelőbb módszer, ha egyenletes eloszlású adatokat szeretnénk kapni egy területről. 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 fordítottam, ezzel a drón nagyjából 24 perc alatt 12 sávot fotózott. A képek közötti átfedés x és y irányban is 70 és 70% volt.

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

A harmadik felmérés a különböző magasságú terepi objektumok miatt már manuális módban 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 *2. táblázat* tartalmazza.

	I. repülés	**II. repülés**	**III.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

2. táblázat: A három különböző magasságú repülés főbb repülési paraméterei a „kocsimosó” területén

6.2. A Kossuth Lajos utcai felmérés

A térképezésre 2022. október 20-án kerül sor. A használt eszközök (hasonlóan az előző helyszíni felméréshez) ugyanazok voltak. Az RTK bázisállomás felállítása és kalibráció után megkezdtem az útvonalak megtervezését. A magasságokat itt 48, 24 és 12 méternek választottam. Az első repülés 12 méter magasságban történt 1 m/s repülési sebességgel. Ennél alacsonyabb magasságon itt már nem tudtam repülni a terepi

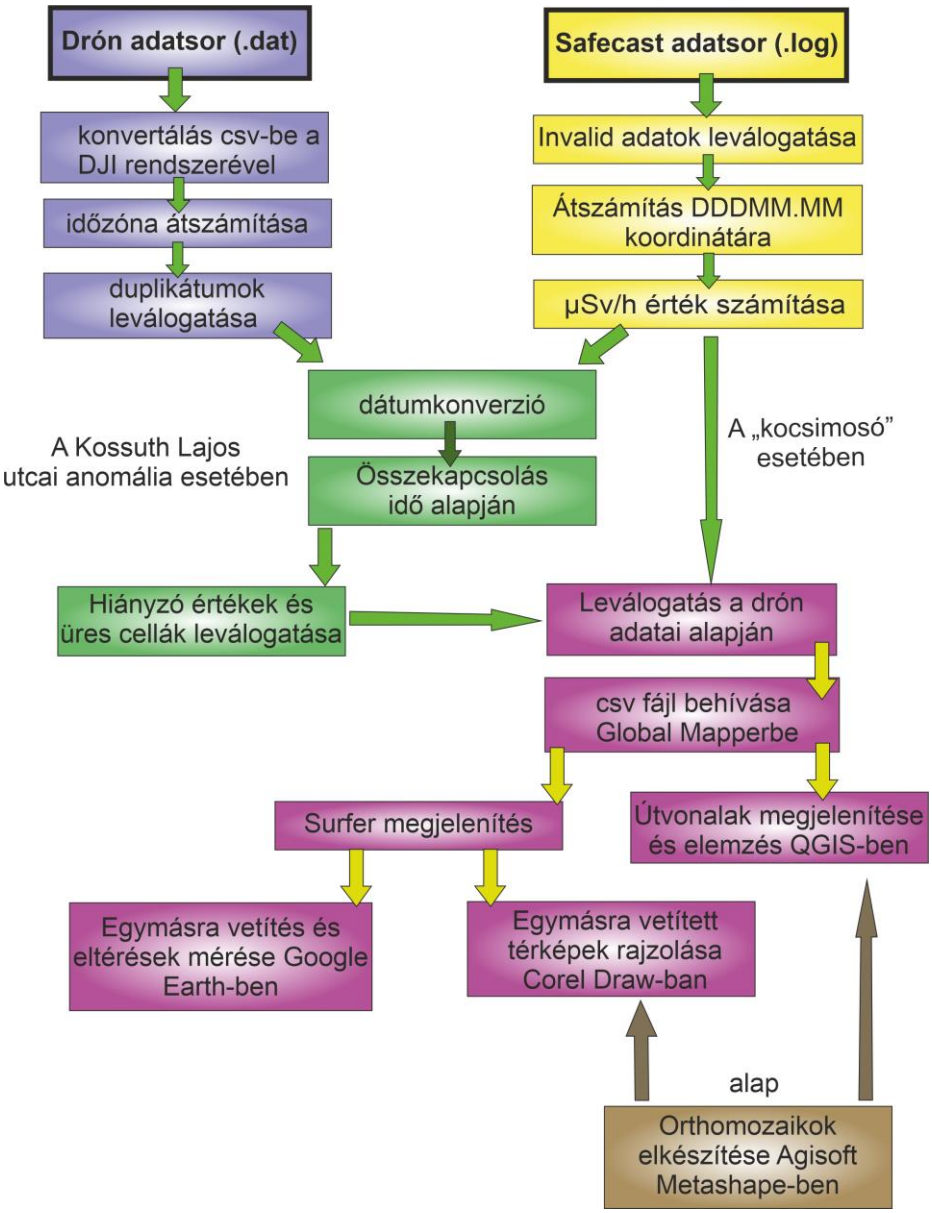
akadályok miatt. A második repülés 24 méter, majd a harmadik repülés a 48 méter magasságú volt. A repülések adatait az *3. táblázat* tartalmazza. A területről szintén orthomozaikot készítettem 48, 24 és 12 méter magasságból is.

	I. repülés	**II. repülés**	**III.repülés**
repülési magasság	12 méter	24 méter	48 méter
repülési sebesség	1 m/s	1 m/s	1 m/s
repülési idő	~ 16 perc	~ 10 perc	~ 9 perc
kontrollpontok száma	206 db	128 db	111 db

3. táblázat: A három különböző magasságú repülés főbb repülési paraméterei a Kossuth Lajos utcában

7. Az adatfeldolgozás lépései

A drón és a Safecast műszer is különböző formátumban tárolja a rögzített pontjait. A drón esetében dat, a Safecast esetében egy log kiterjesztésű fájl áll rendelkezésünkre. Nyers formátumában egyik tábla sem használható, ezek konvertálása szükséges. Az általam használt térinformatikai szoftver a Global Mapper és a QGIS 3.20.2 Odense verziója. Ahhoz, hogy ebben a szoftverben megjeleníthető és elemezhetőek legyenek az adatsorok, több előkészítő művelet is szükséges. Az átláthatóság érdekében egy áttekintő ábrát mutatok be (*9. ábra*), amelynek részleteit a következő fejezetekben részletesen taglalom.



9. ábra: Áttekintő ábra az adatsorok feldolgozásának lépéseiről, ahol a kék szín csak a drón adatain elvégzett, a sárga csak a Safecast adatsoron elvégzett, a zöld a csak a Kossuth Lajos utcai anomália esetében elvégzett, a magenta pedig a két adatsoron együtt elvégzett műveleteket jelenti. A barna a külön, az ábrázolás alapjául szolgáló műveletet jelöli.

7.1. 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 (DDDMM.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.

7.2. 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. 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):

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

7.3. A leválogatás

A Safecast az általa rögzített útvonalat egyetlen egy fájlban tárolja, így a nem a teszterületen 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 teszterületre 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 teszterületre 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 méréskor folyamatosan rögzíti a felszín feletti magasságot (AGL) és időbélyeggel ellátva tárolja azt. A Safecast magassági adatainak bizonytalansága miatt időbeli leválogatást alkalmaztam.

7.4. A Safecast által mért adatok RTK GPS-re pontosítása

Az anomáliák pontosabb elhelyezkedésének meghatározásához fontos a sugárzási adatokat a drón GPS adataira pontosítani. A Safecast és drón által mért koordináták jelentősen eltérnek, ezért a két táblát idő alapján kapcsoltam össze. Mivel a két adattáblában az időzóna is eltér, így először ezt alakítottam át, majd a leválogatás következett. A drón tizedmásodperces adatait leszűrtem. Minden perc kerek tizedmásodpercét hagytam csak meg, a duplikátumok pedig törlésre kerültek. Egy formátummódosítás után már kapcsolható is a két adattábla egymáshoz másodpercek alapján. Jelen esetben a pontosítást excel függvényekkel végeztem, de a folyamat könnyen implementálható python kóddal is. A hiányzó és üres cellákat is leszűrtem, majd törlésre kerültek.

7.5. Az orthomozaik elkészítése

Orthofotókat a „kocsimosó” esetében 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 importálása 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.

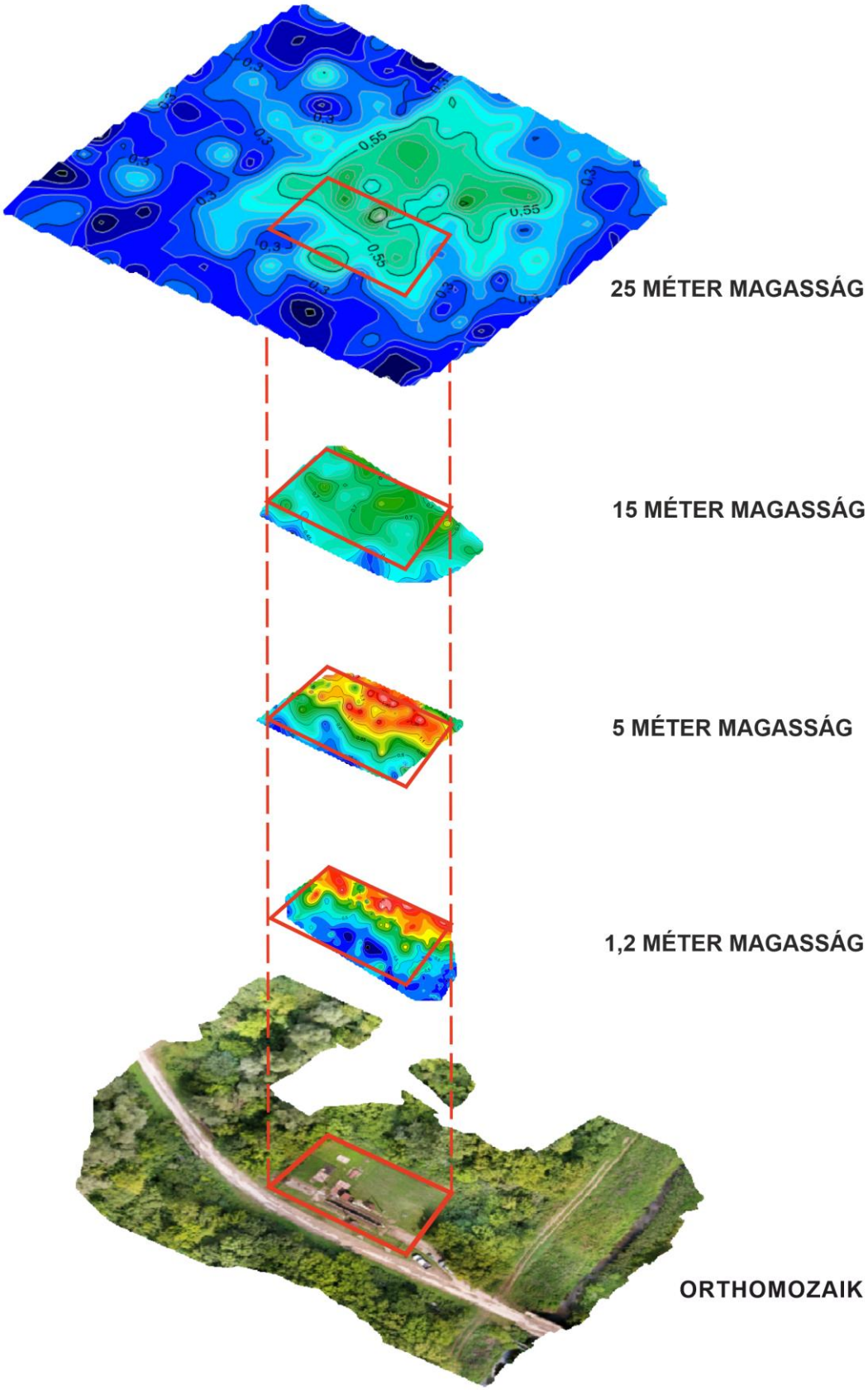
7.6. Az izovonalas térképek előállítása

Az izovonalas térképek előállítását a Surfer 13 nevű programban végeztem. Importálás után a fájlokból 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.

8. Eredmények

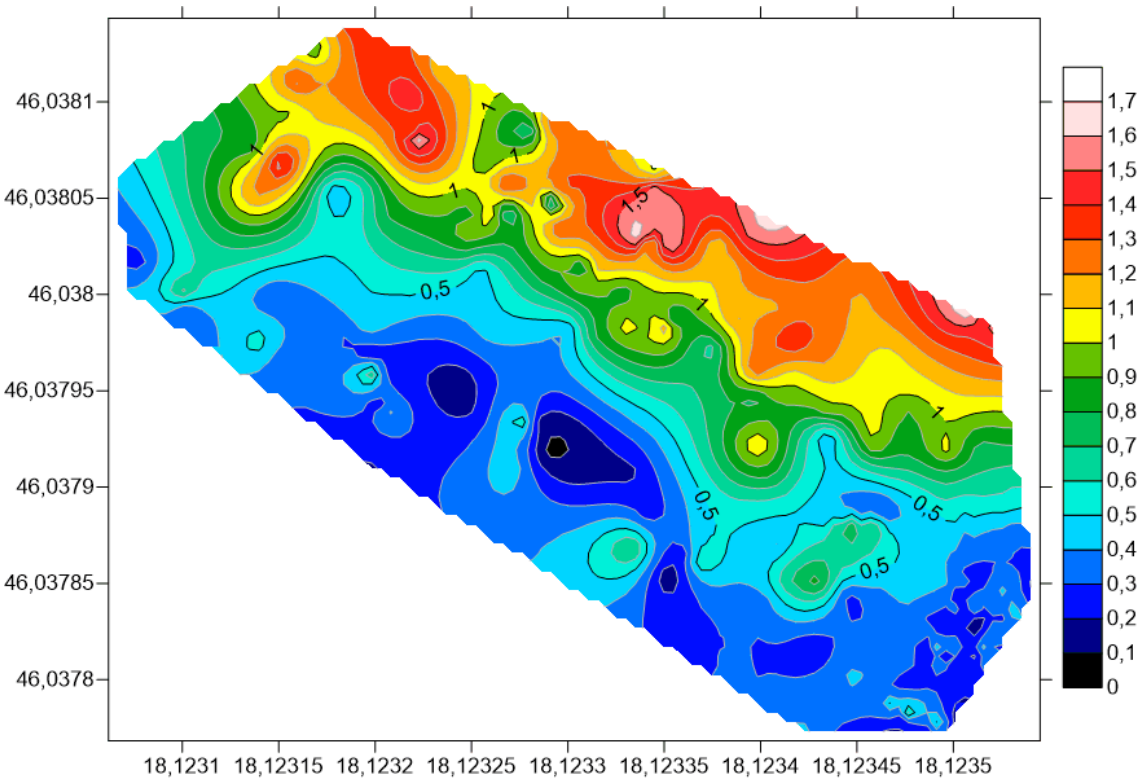
8.1. A „kocsimosó” különböző magasságú izovonalas térképei

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 (*10. ábra*). A kocsimosó területét piros kerettel jelöltem, majd a területet felvetítettem az eltérő magasságú rétegekre. Ugyanezt elvégeztem a Kossuth Lajos utcai anomáliára is (*15. ábra*).

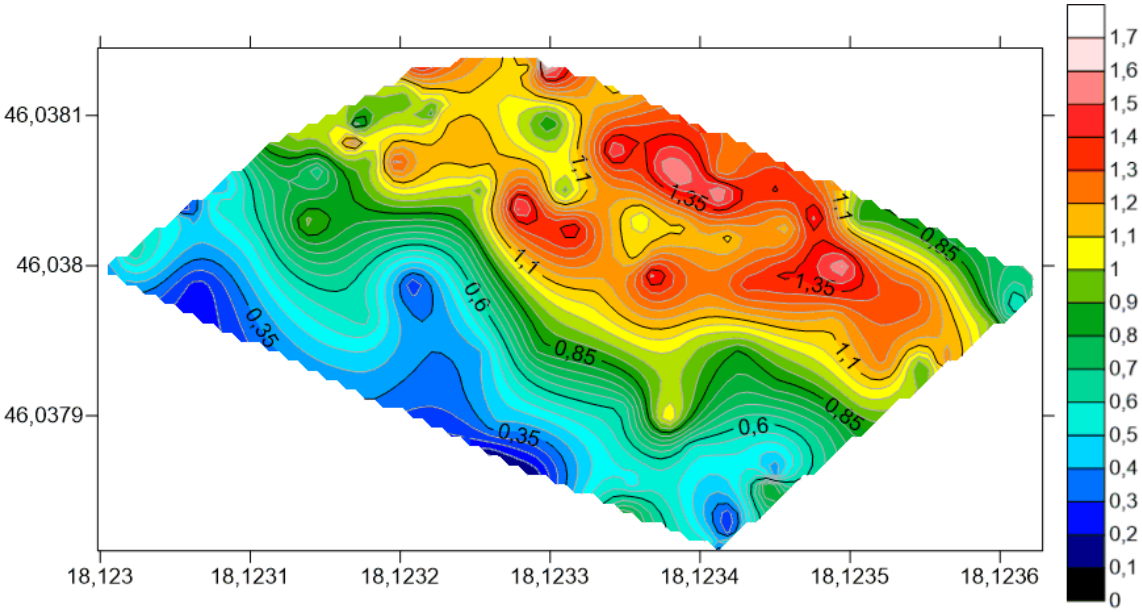


10. ábra: A „kocsimosó” területe (piros keret), és a mért sugárzásértékek felvetítve eltérő magasságú rétegekre

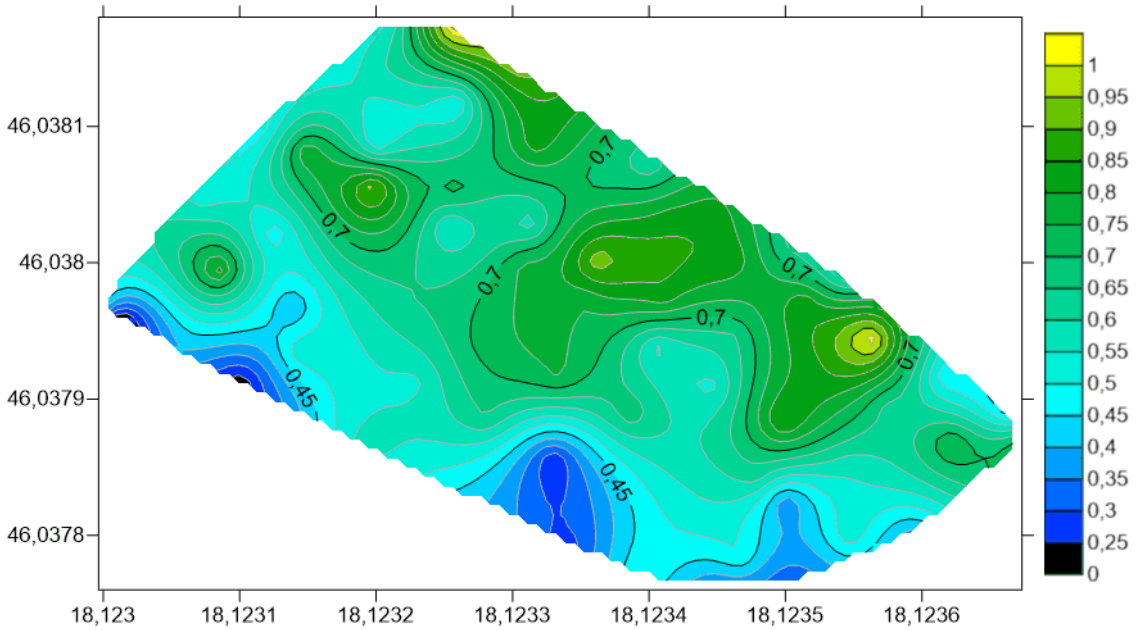
Az eltérő magasságokban készült mérésekből előállított izovonalas térképek a következőkben láthatók. Elsőként az 1,2 méter felszín feletti magasságban készült földi mérés és színskálája (*11. ábra*) majd az 5 (*12. ábra*), 15 (*13. ábra*), 25 (*14. ábra*) méteres mérésé.



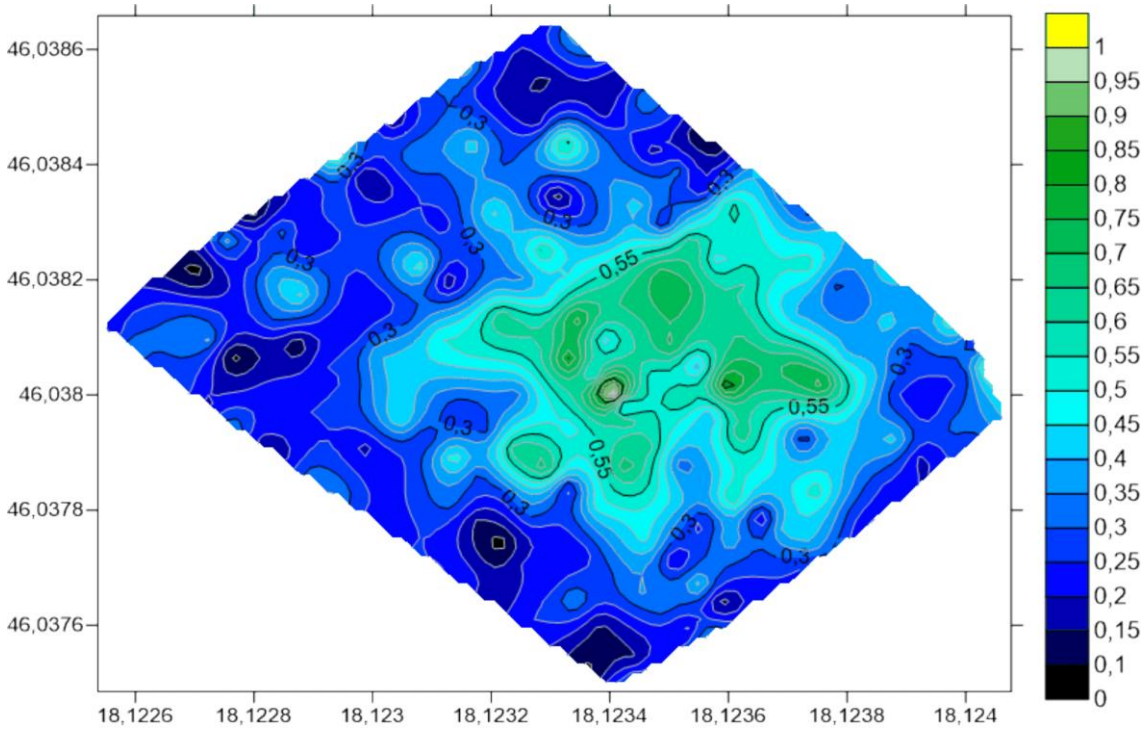
11. ábra: 1,2 méter magasságban készült mérés izovonalas térképe [µSv/h]



12. ábra: 5 méter magasságban készült mérés izovonalas térképe [µSv/h]



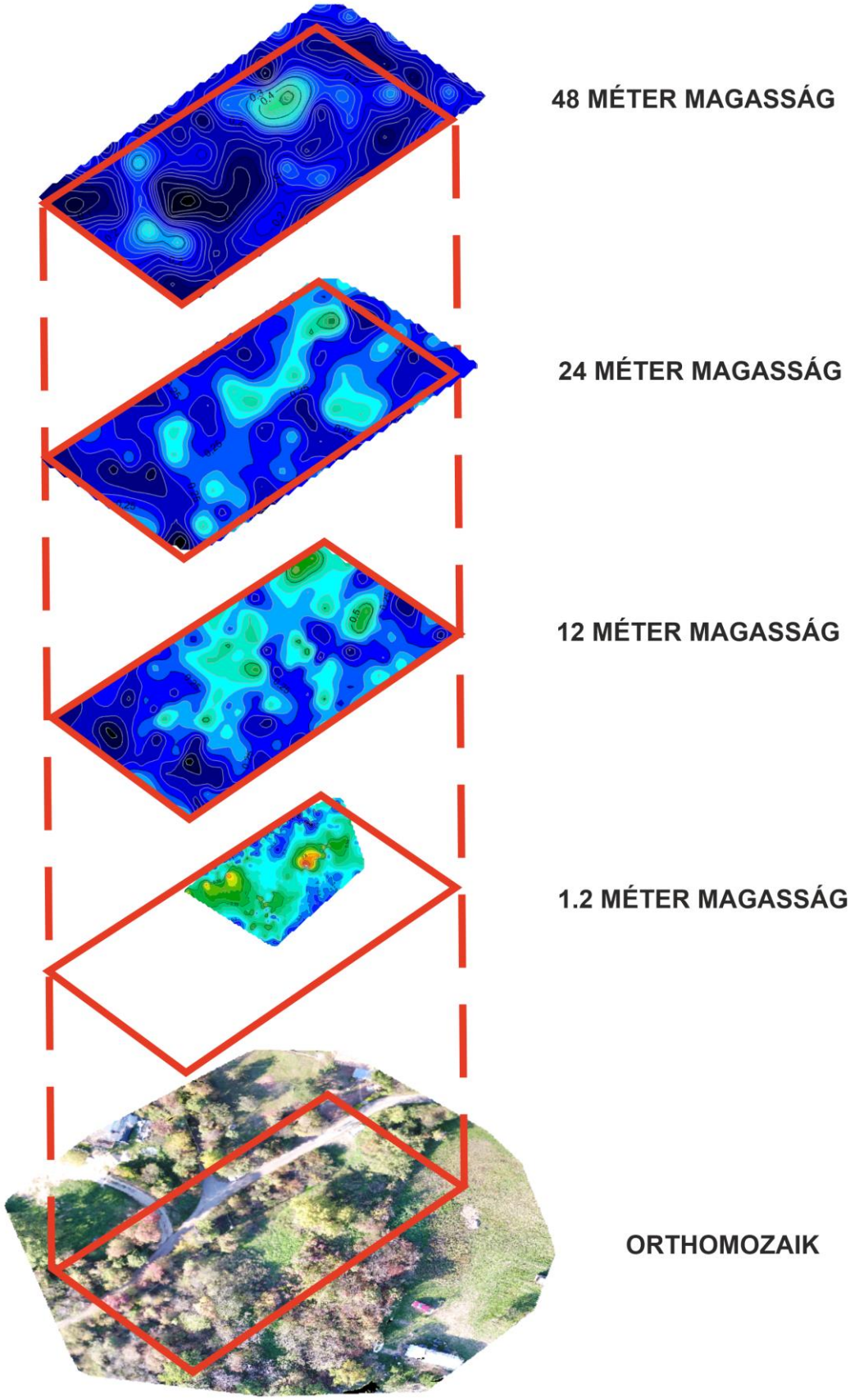
13. ábra: 15 méter magasságból történt mérés izovonalas térképe [µSv/h]



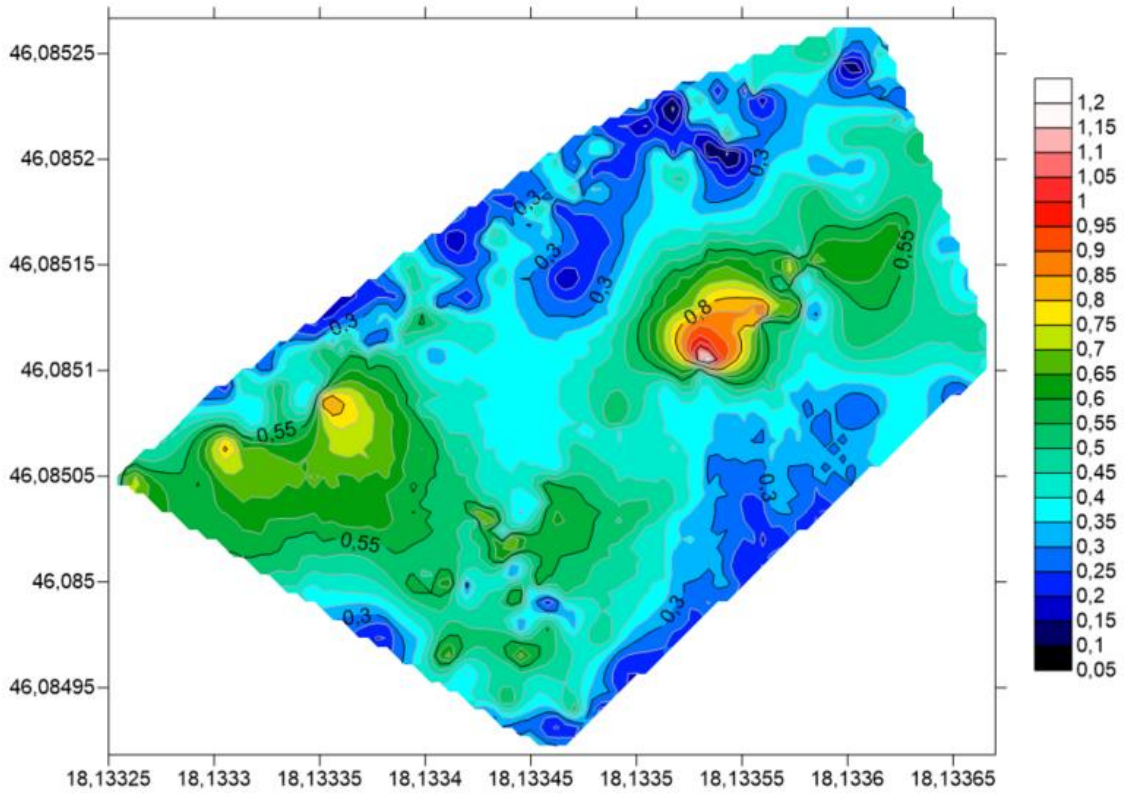
14. ábra: 25 méter magasságból végzett mérés izovonalas térképe [µSv/h]

8.2. A Kossuth Lajos utcai anomália különböző magasságú izovonalas térképei

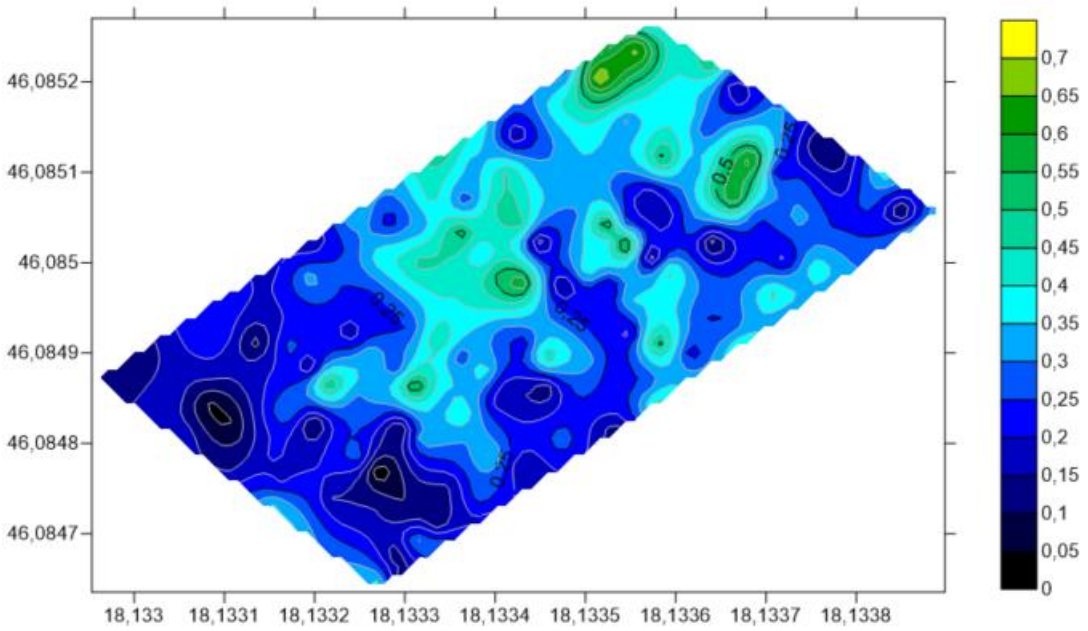
A Kossuth Lajos utcai anomália esetében szintén megtörtént egy terepi bejárás, ennek eredményeit *16. ábra* szemlélteti. Majd a 12 (*17. ábra*), 24 (*18. ábra*) és 48 méteres magasság (*19. ábra*).



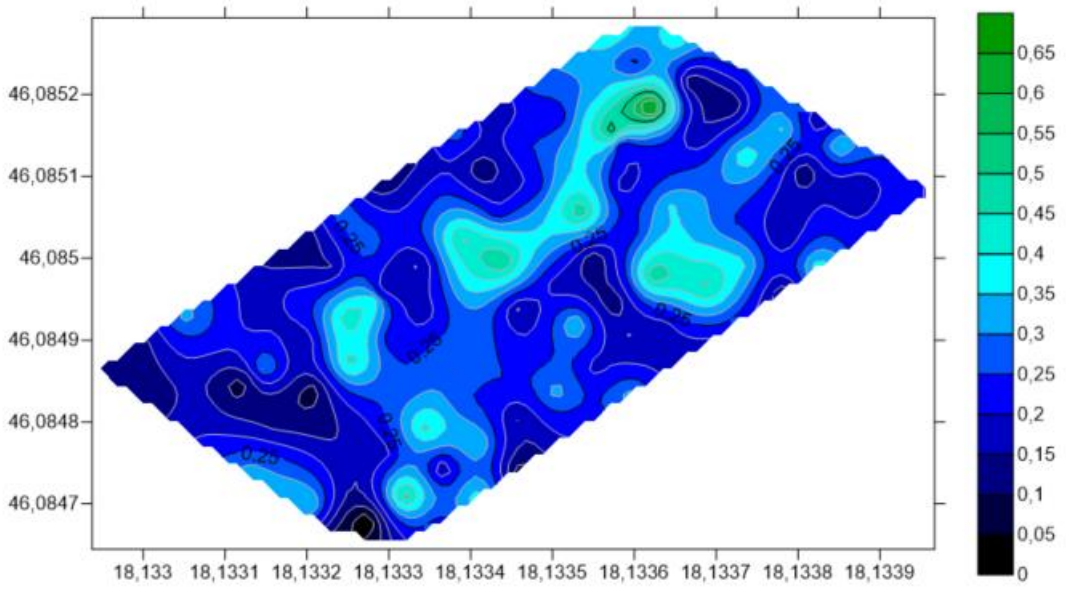
15. ábra: A Kossuth Lajos utcai felmért terület (piros keret) felvetítve eltérő magasságú rétegekre



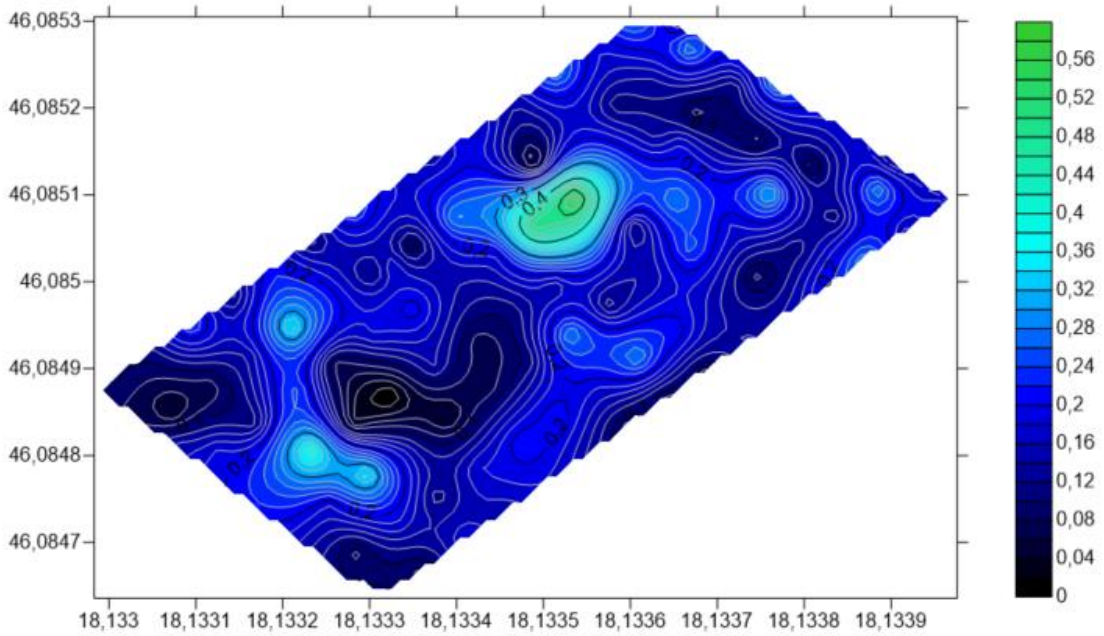
16. ábra: A Kossuth Lajos utcai anomália 1.2 méter magasságból (terepi bejárás) [µSv/h]



17. ábra: A Kossuth Lajos utcai anomália 12 méter magasságból [µSv/h]



18. ábra: A Kossuth Lajos utcai anomália 24 méter magasságból [µSv/h]

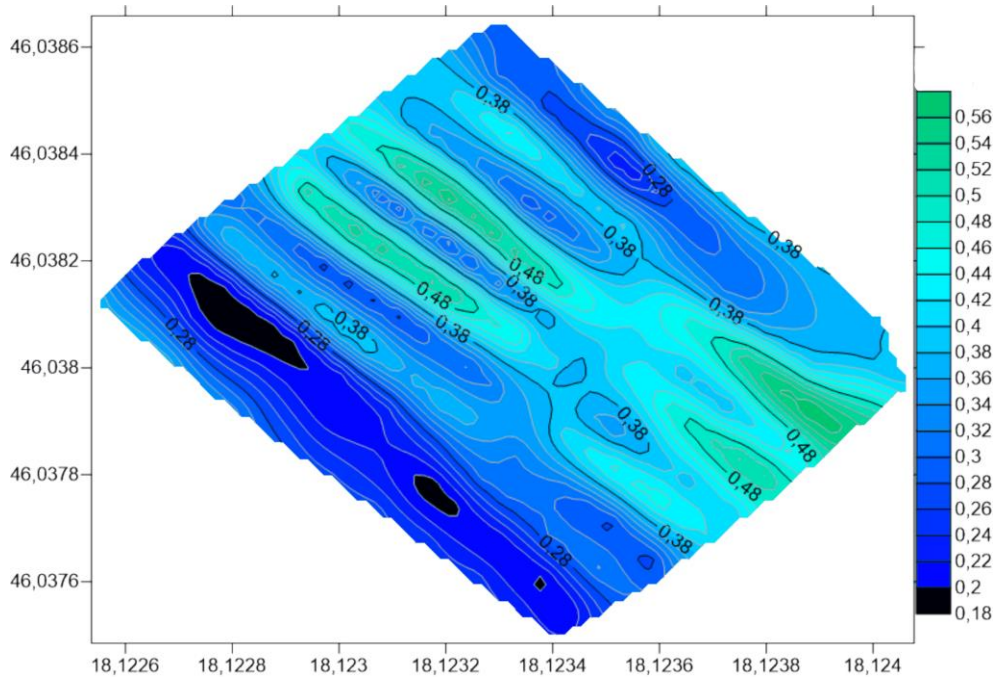


19. ábra: A Kossuth Lajos utcai anomália 48 méter magasságból [µSv/h]

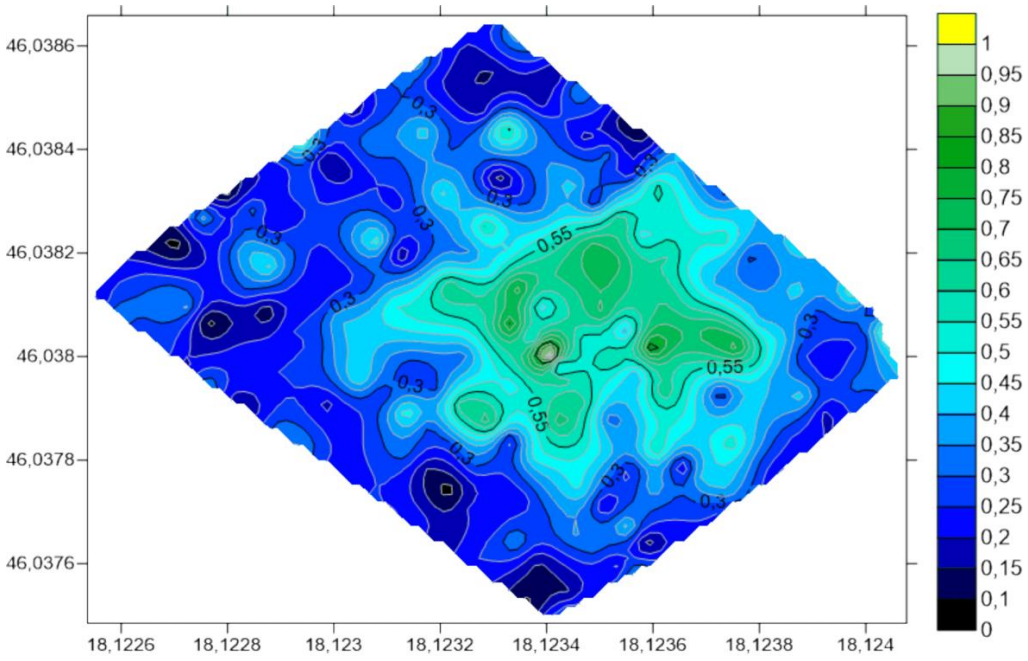
8.3. Az egyperces és öt másodperces sugárzási értékekből előállított izovonalas térképek összehasonlítása

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 szemléltetve. A *20. ábra* a CPM értékekből származtatott izovonalas térkép, a *21. ábra* az öt másodperces sugárzási adatokból származtatott térkép.



20. ábra: A CPM értékből kalkulált dózisteljesítmény izovonalas térképe [µSv/h]



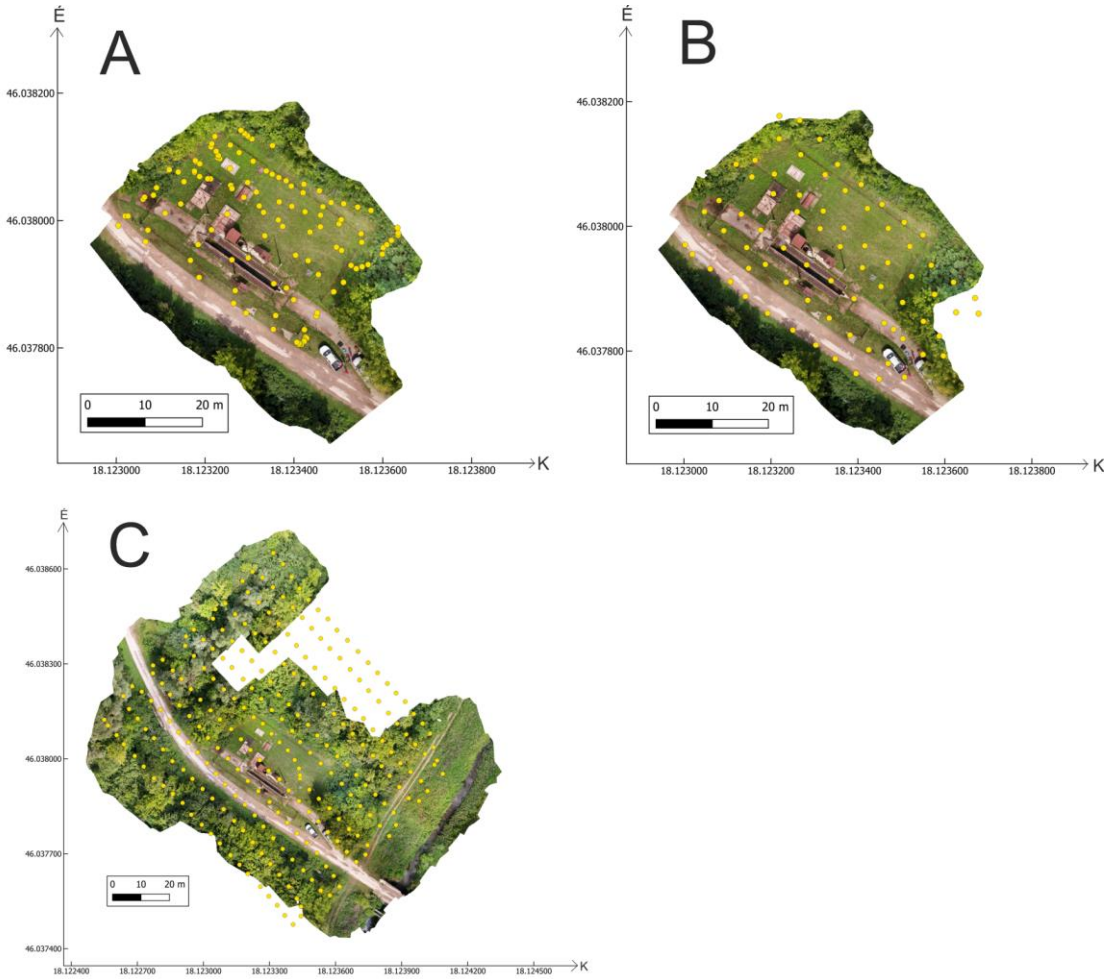
21. ábra: Az öt másodperces értékből kalkulált dózisteljesítmény izovonalas térképe [µSv/h]

A fent bemutatott két ábrán szembetűnő 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

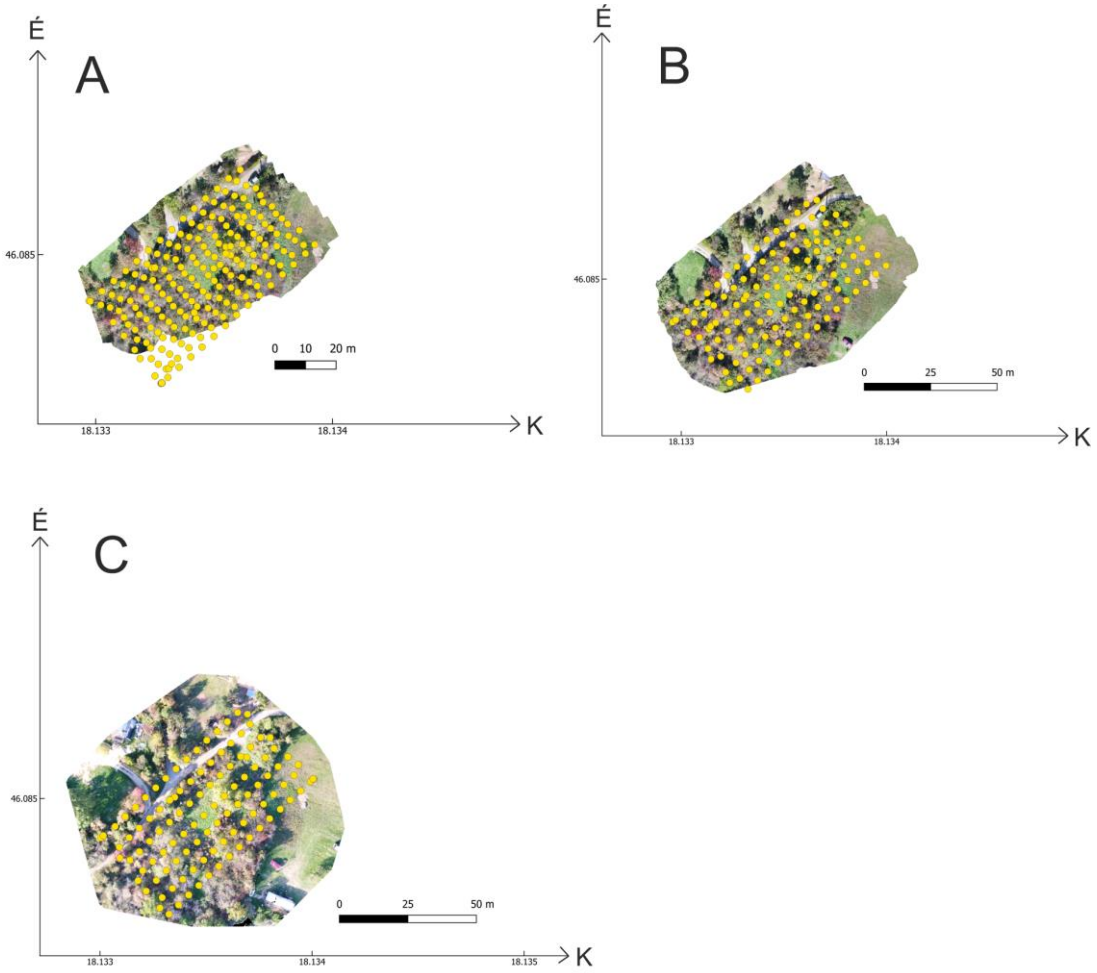
útvonalának tulajdonítható. A drón sávokban térképez egy előre megszabott útvonalon, a terület pereménél pedig mindig adott nyomtávval visszafordul. Ha a dózisteljesítményt a percenkénti beütésekből (CPM) számolom, akkor a mért érték a legutóbbi 12 mérési pont átlaga lesz. 1 m/s haladási sebesség mellett 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.

8.4. Autonóm GPS-szel mért és RTK GPS-re illesztett sugárzási adatok összehasonlítása

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 segítendő, 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 orthomozaikokra vetítettem, ezeket szemléltetik a következő ábrák (*22. ábra* és *23. ábra*). A „kocsimosó” esetében a 15 méter magasságból készült orthomozaik képére rávetítettem az 5 (*22. ábra*/A) és a 15 méter magasságban Safecast által megtett útvonal (*22. ábra*/B) pontjait. A 25 méter magasságból készült orthomozaikra a 25 méter magasságban bejárt útvonal kontrollpontjait vetítettem (*22. ábra*/C). A Kossuth Lajos utca esetében is előállítottam az orthomozaikokra vetített nyomvonalat, de itt már a drón adataira illesztett mérési pontok látszanak (*23. ábra*). Az útvonalakat mindegyik térképen a sárga pontsor jelzi.



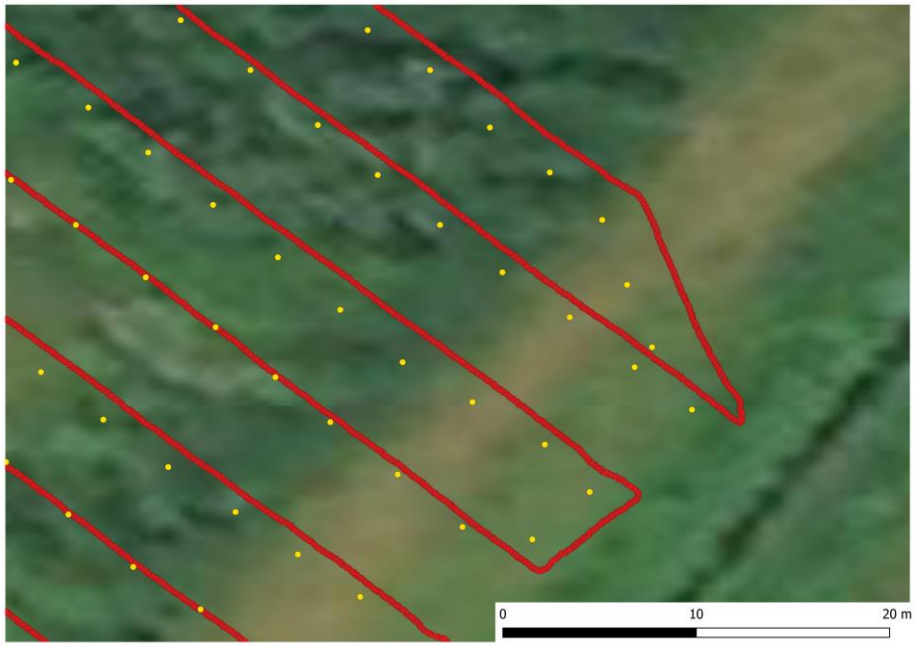
22. ábra: Az 5 méteres (A), 15 méteres (B) és 25 méteres (C) repülés Safecast útvonalai a „kocsimosó” területén



23. ábra: A 12 méteres (A), 24 méteres (B) és 48 méteres (C) repülés drónra illesztett útvonalai a Kossuth Lajos utcában

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 (*24. ábra*). Ennek kinagyított verzióját mutatja a *25. ábra*.

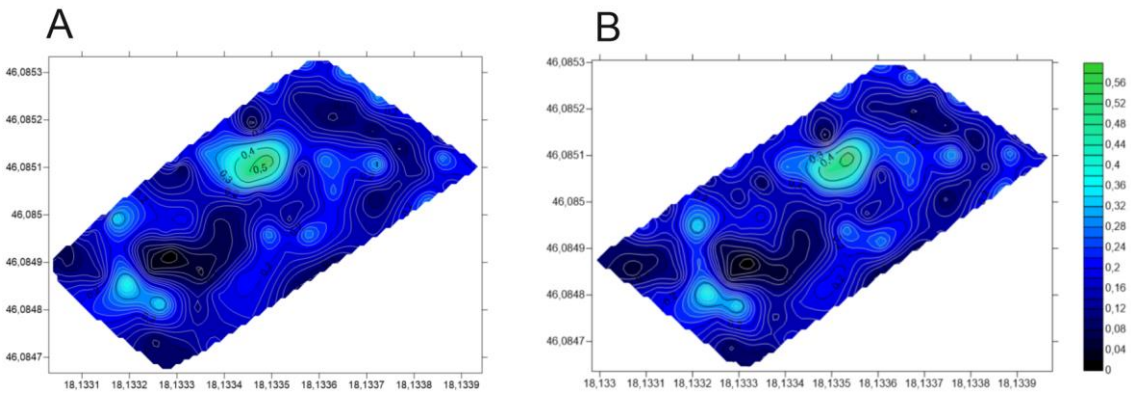
24. ábra: Az UAS (vörös) és a Safecast szenzor (sárga) útvonala összehasonlítva 25 méteres magasságban a „kocsimosó” felett



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

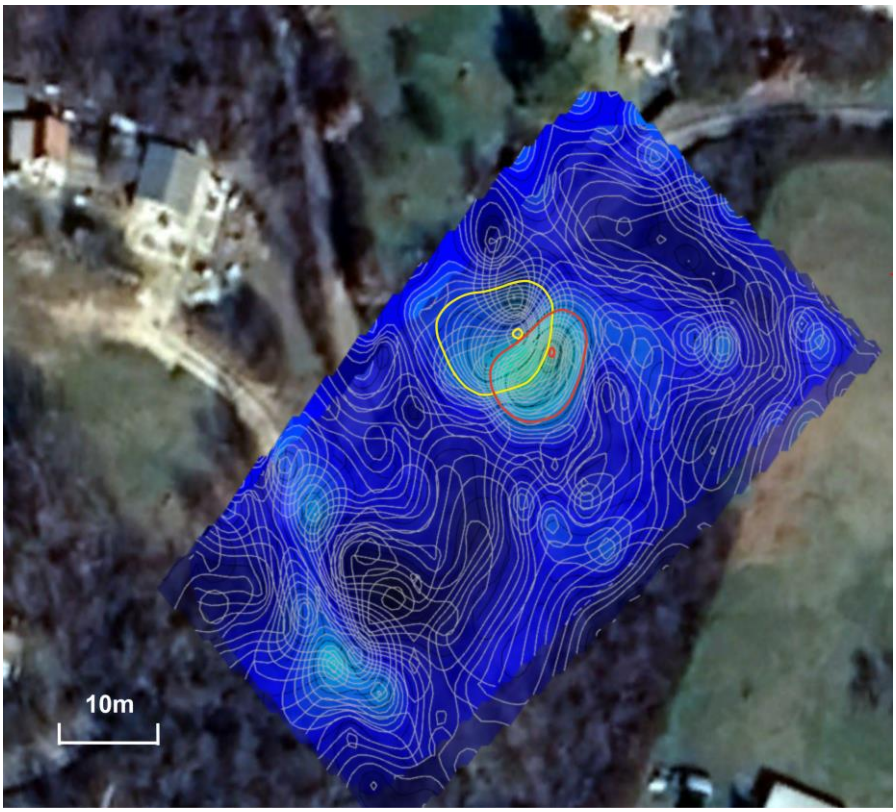
Az adatsorból kiderül, hogy a Safecast szenzor és az UAS pozíciója között változó az eltérés. Ha a Safecast pozícióméréséét használjuk, hamis képet kaphatunk az anomáliák helyzetéről, attól függően, milyen pontos eredményekre van szükségünk. A kocsimosó esetében csak a Safecast GPS adataival dolgoztam, ez látható is akár már az izovonalas térképek alakjáról (szabálytalan alakzatok). A Kossuth Lajos utcai anomália esetében már az RTK GPS adatait használva generáltam az izovonalas térképeket. A *26. ábra* („A” rész) mutatja be példaként a 48 méteres repülés gamma-dózisteljesítmény

térképét, ha csak a Safecast GPS adatait használom, illetve a „B” rész, ha az RTK GPS-re pontosított sugárzási adatokat.



26. ábra: Gamma-dózisteljesítmény 48 méteres magasságból a Safecast GPS alapján (A) és a drón GPS adatai alapján (B) [µSv/h]

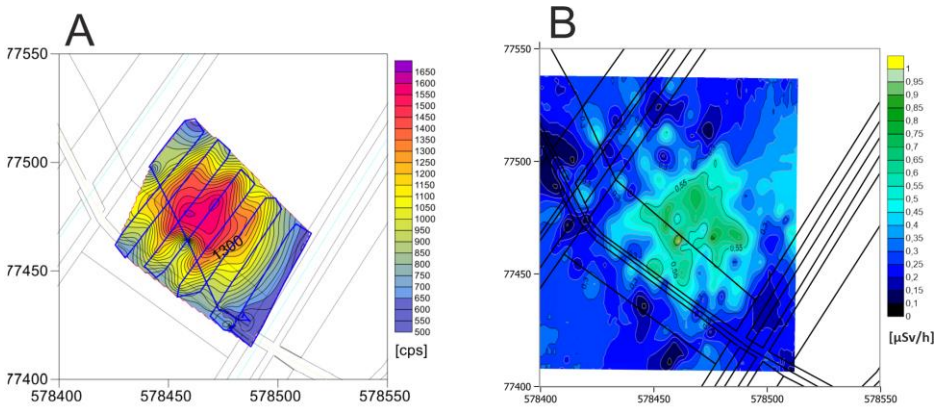
A fenti két izovonalas térképet egymásra helyezve (*27. ábra*) látható, hogy az anomáliák pozíciója eltér. A két térkép maximumát kiemelve (sárga vonal: Safecast GPS, piros vonal: RTK GPS) leolvasható, hogy a két pont helyzete között 3,5 - 4 méter eltérés tapasztalható.



27. ábra: A két különböző GPS adatból levezetett izovonalas térképek összehasonlítása, maximum lokációjának eltérése. Sárga: Safecast GPS, piros: RTK GPS

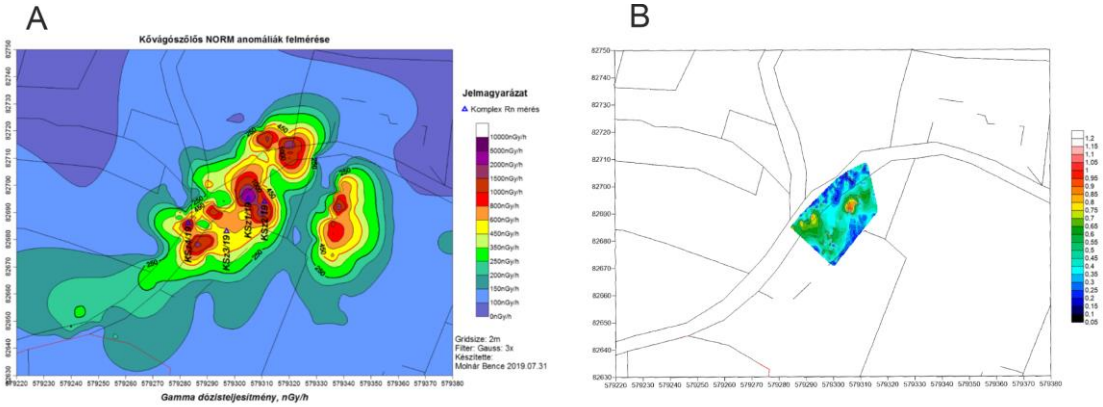
8.5. Összehasonlítás korábbi mérésekkel

Összehasonlításképpen a saját 25 méter magasságból végzett mérésem eredményét összevetettem egy korábbi pécsi szakdolgozó 25 méter magasságú eredményével (*28. 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 µSv/h dózisteljesítménnyé. A µSv mértékegység jelentősége, hogy következtethető belőle sugárzás emberi szervezetre gyakorolt hatása.



28. ábra: Hallgató által készített légi mérés CPS mértékegységben (A) és saját 25 méter magasságból készített légi mérés µSv/h értékben(B)

A Kossuth Lajos utcai felmérés esetében drónos felmérés még nem készült, de két izovonalas térkép ez esetben is összevethető: Molnár Bence térképe, mely nGy/h mértékegységben adja meg az adatokat, és az enyém, amely µSv/h-ban. A két térképet egymás mellett a *29. ábra* szemlélteti.



29. ábra: Molnár Bence által készített földi gamma-dózisteljesítmény mérés nGy/h mértékegységben (A) és az általam készített földi gamma-dózisteljesítmény térkép µSv/h mértékegységben (B)

8.6. 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 életveszélybe 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 viszontagságaitól és az akkumulátor kapacitásától.

9. Diszkusszió

A „kocsimosó” esetében a négy különböző magasságban készített mérést összehasonlítva látható, hogy a gamma-dózis értéke a magasság növekedésével méterenként átlagosan 0,05 µSv/h-val csökken. A földi, terepi bejárás intenzitásértékeihez viszonyítva az is megállapítható, hogy az anomália a földi mérések alapján kirajzolódó szerkezete a földtől távolodva egyre inkább összeolvad.

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 µSv/h, a legaktívabb pont a 25 méter esetében már csak 1 µSv/h. A korábbi mérésekkel összehasonlítva elmondható, hogy a sugárzási anomália mindegyik esetben hasonló módon kirajzolódik.

A Kossuth Lajos utcai anomália esetében az összehasonlításához a talaj felett 1,2 méter magasságban végzett mérésemet használom fel. Bár az általam bejárt terület jóval kisebb, mint Molnár Bence felmérési területe, így is kirajzolódnak a csúcsok kisebb intenzitással.

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 sávos szerkezetet mutat.

Ha összevetjük a Safecast autonóm GPS egysége és az RTK GPS által mért pozíciómméréseket, a két műszer x, y koordinátái között kb. 3,5- 4 méter eltérést tapasztalunk.

10. Konklúzió

A fent leírtak értelmében megállapítható, hogy:

1. Egy költséghatékony szenzor is képes sugárzási anomáliák detektálásra.
2. A terresztrikus forrásból származó sugárzás detektálhatósága a magasság növekedésével méterenként átlagosan 0,05 µSv/h-val csökken.
3. Ha a mérő eszköz a sugárzási anomáliák detektálása során nagy (lsd. következő pont) sebességgel mozog (a dolgozat esetében az UAS), akkor nem elegendő az egyperces impulzusértékkel (CPM) számolni.
4. A mért paraméter térbeli változási gyorsasága határozza meg a drón optimális sebességét és a beütések integrálási idejét. Esetünkben az anomália 10 méteres nagyságrendű, repülési sebessége 1 m/s, ezért 10 másodpercnél hosszabb integrálási idők már nem tárják fel az anomália részletes szerkezetét.
5. A felszínen 1,7 µSv/h dózisú anomália kirajzolódik még akkor is, ha az adatokat 25 méteren 1 m/s sebességű drónnal vesszük fel.
6. A Safecast szenzor autonóm GPS egysége és a centiméter pontosságú GPS x, y irányú eltérés kb. 3,5- 4 méter.

11.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 két helyszínen három különböző magasságokban hajtok végre repülést a dolgozatban részletesen bemutatott UAS eszközzel; 5, 15 és 25 méter magasságban, majd 48, 24, 12 méter magasságban. Az összehasonlíthatóság érdekében egy földi bejárást is végeztem a területeken, 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 változó, de átlagosan 3,5 - 4 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 µSv/h- val csökken a magasság növekedésével párhuzamosan. A 15 és 25 méter magasságban végzett repülés, majd a 48, 24 és 12 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. A második terület felméréséből származó sugárzási adatokat a drón centiméter pontosságú adataira illesztettem, és megállapítottam, hogy az anomáliák pozíciójában 3,5 – 4 méter eltérés tapasztalható.

12. Irodalomjegyzék

ALEX, E. (2017) *Drónok kézikönyve. Alkalmazás - karbantartás - működtetés - építés*. Cser Kiadó.

BÁNVÖLGYI, F. és KUKAI, A. (2014) *Volt egyszer egy uránbánya*.

bGeigie Nano | Safecast (2018). Elérhető: https://blog.safecast.org/bgeigie-nano/. Hozzáférés: 2022.05.13.

BREITNER, D., TÖRÖK, S. ÉS MÁRTON, I. (2012) 'Globális urántartalékok földtani és mennyiségi értékelése', *Nukleon*, V, p. 103.

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

EISENBUD, M. és PASCHOA, A.S. (1989) 'Environmental Radioactivity*', *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 280(2–3), pp. 470–482. doi:10.1016/0168-9002(89)90953-4.

EVANS, R.D. és GOODMAN, C. (1941) 'Radioactivity of Rocks', *Bulletin of the geological society of America*, 52(4), pp. 459–490. doi:10.1130/GSAB-52-459.

FUJINO, T. *et al.* (2008) *Uranium, The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements*. Springer, Dordrecht. doi:10.1007/1-4020-3598-5_5.

GARAMHEGYI, G. (2019) 'Safecast-projekt megvalósítása az isaszegi Gábor Dénes Gimnázium és Szakgimnáziumban', *Fizikai Szemle*, 69(1).

GYALOG L. és SÍKHEGYI F. (2005) 'Magyarország földtani térképe' M=1:100 000, *Magyar Állami Földtani Intézet*, Budapest.

HEIER, K.S. és S ADAMS, J.A. (1965) 'Concentration of radioactive elements in deep crustal material', *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 29(1), pp. 53–61. doi:10.1016/0016-7037(65)90078-5.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2003) 'Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data', *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 4, pp. 1549-1555.

KISS, Á. és TASNÁDI, P. (2012) *Környezetfizika*.

LND (no date) *7317 Low voltage pancake mica window*. Elérhető: https://lndinc.com/products/geiger-mueller-tubes/7317/. Hozzáférés: 2023.01.10.

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. *et al.* (2016) 'Távirányítású drónok kutatási célú vizuális adatainak alkalmazása az oktatásban', *XXII. 'Multimédia az Oktatásban' nemzetközi konferencia*,

22. 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)’, *Műszaki Katonai Közlöny*, XXVIII(1), pp. 140–158.

MEREDITH, W.J. és 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. és LOVAS, I. (2021) ‘Drone-based gamma radiation dose distribution survey with a discrete measurement point procedure’, *Sensors*, 21(14). doi:10.3390/s21144930.

MOLNÁR, B. (2020) *A természetes sugárzás anomáliáinak vizsgálata Kővágószőlősön*. PTE TTK.

NAGY, G. (2003) *Gamma dózisteljesítmény térkép, Kővágószőlős*.

PALIK, M. (2007) *Pilóta nélküli légijármű rendszerek légi felderítésre történő alkalmazásának lehetőségei a légierő haderőnem repülőcsapatai katonai műveleteiben*. Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Hadtudományi Doktori Iskola.

PALIK, M. *et al.* (2013) *Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek*. Edited by M. Palik. Budapest: NKE.

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. és VASS, P. (2011) *Geofizika alapjai 3*. Miskolci Egyetem Földtudományi Kar.

PIETER (2013) *The bGeigie Nano Kit*. Elérhető: https://safecast.org/2013/03/the-bgeigie-nano-kit/. Hozzáférés: 2023.01.10.

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. és 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].

SANADA, Y. és TORII, T. (2015) ‘Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant using an unmanned helicopter’, *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, pp. 294–299. doi:10.1016/j.jenvrad.2014.06.027.

TELBISZ, T., SZÉKELY, B. és TIMÁR, G. (2013) *Digitális terepmodellek, adat, látvány, elemzés*. ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézet Természetföldrajzi Tanszék.

TÓTH, I. (2021) *Drónokkal történő terepi felvételezés a precíziós mezőgazdaság elősegítésének céljából*. Eötvös Loránd University.

WALSH, J., KELLEHER, K. és CURRIVAN, L. (2019) *Assessment of Safecast bGeige Nano Monitor, Radiation Environment and Medicine*. doi:10.51083/radiatenvironmed.8.1_1.

WATTS, A.C., AMBROSIA, V.G. és 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. doi:10.1093/oxfordjournals.rpd.a082101.

ZELENÁK, J. *et al.* (2009) ‘A légi sugárfelderítés képességei alkalmazhatósá- gának vizsgálata elveszett, vagy ellopott sugárfor- rások felkutatása, illetve szennyezett terepszakaszok felderítése során’, *Hadmérnök*, IV(1), pp. 46–62.

13.Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti Dr. Kovács Béla és Dr. Horváth Ákos témavezetőimet, akik idejüket nem sajnálva segítették e 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.

14.Nyilatkozat