

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

Drónfelvételek felhasználása vasúti objektumok geodéziai felmérésének kiváltására

SZAKDOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK
TÉRKÉPÉSZ ÉS GEOINFORMATIKA SPECIALIZÁCIÓ

Készítette:
Jedlicska Zoé

Témavezető:
Vörös Fanni
doktorandusz
ELTE Térképtudományi és Geoinformatikai Intézet

és:
Rozman Gábor
infokommunikációs szakértő
MÁV Magyar Államvasutak Zrt.



Budapest, 2022

Tartalomjegyzék

A szakdolgozatban megjelenő rövidítések.....	3
1. Bevezetés és célkitűzés.....	4
2. Elméleti alapok.....	6
2.1. Korábbi kutatások.....	7
2.2. A drónról.....	8
2.3. RTK GPS.....	10
3. A vizsgált területek.....	11
3.1. Vasúti terület.....	12
3.2. Kontrolterület.....	13
4. Módszertan.....	14
4.1. Áttekintő.....	14
4.2. Adatfeldolgozás.....	16
5. Eredmények.....	18
5.1. Hibatérképek.....	18
5.1.1. A 0 kontrolpontot felhasznált ortomozaik hibatérképe.....	21
5.1.2. A 4 kontrolpontot felhasznált ortomozaik hibatérképe.....	23
5.1.3. A 6 kontrolpontot felhasznált ortomozaik hibatérképe.....	23
5.1.4. A 7 kontrolpontot felhasznált ortomozaik hibatérképe.....	24
5.1.5. A 14 kontrolpontot felhasznált ortomozaik hibatérképe.....	25
5.1.5. A 20 kontrolpontot felhasznált ortomozaik hibatérképe.....	26
5.2. Pontdiagramok.....	27
5.3. Dobozdiagram.....	29
5.4. A váci adatbázis elkészítése.....	30
6. Diskusszió.....	31

7. Konklúzió.....	34
8. Összefoglalás.....	35
9. Köszönetnyilvánítás.....	37
10. Irodalomjegyzék.....	38

A szakdolgozatban megjelenő rövidítések

EPSG Geodetic Parameter Dataset: vetületi rendszer azonosítója

UAV: Unmanned Aerial Vehicle

RTK: Real-Time Kinematic

GPS: Global Positioning System

GCP: Ground Control Point

DEM: Digital Elevation Model

DSM: Digital Surface Model

DTM: Digital Terrain Model

(T) DOM: (True) Digital Orthophoto Map

1. Bevezetés és célkitűzés

Az UAV felvételek felhasználhatósága számos kutatási területen foglalkoztatja az embereket. Világszerte egyre több területen foglalkoznak gazdasági, pénzügyi, ipari, kutatási célú felhasználással és egyre több eredmény támasztja alá ezen módszer hatékonyságát.

Magyarországon az elmúlt 5-10 évben ugrásszerűen megnőtt a drón-felvételek felhasználási köre, ám még mindig több olyan ágazat van, amely jelentős kutatási potenciállal rendelkezik – nem csak a hazai, hanem akár világszinten is. A felhasználás számtalan lehetősége közt az egyik, még viszonylag kevésbé kiforrott a vasúti közlekedési szférában való felmérések elvégzése, ennek kutatásával és vizsgálatával foglalkozom.

A vasúti környezetben számtalan objektum található, melyek kihívás elé állítják a terepet felmérni készülő geodétát/szakembert. Ezek a terepi tárgyak, sínek, szekrények, váltók, lámpák, felsővezetékek a mérés kivitelezésére negatív befolyással lehetnek. Vasúton mérni balesetveszélyes, az objektumok nagy száma lassítja a mérést, illetve hidak vasszerkezete rontja a GPS pontosságát. A felszínborítottság is akadályt képezhet pl. leromlott állapotú épületek, növényzet által jelentősen benőtt területek.

Az országban jelenleg a Magyar Államvasutak Zrt. tulajdonában álló területek felmérését geodéták, földmérő szakemberek in situ (tehát közvetlenül a terepen) oldják meg RTK GPS műszerekkel. Ezek a terepi felmérések munkaerő-és időigényes folyamatok, emellett emberéletek kockáztatásával járnak. Legtöbbször forgalom által érintett területen zajlanak, ahol a menetrend szerinti, mindennapi közlekedésnek folynia kell. A drónnal történő légi méréseket ezen hátrányok nem érintik. A legfontosabb kritériumok a mérési eredmény pontossága, illetve a felbontás. Itt kell a légi felvételeknek és ezek felhasználhatóságának bizonyítaniuk, elérik-e a terepi mérés által nyújtott szintet, esetleg meg is haladják azt, vagy a pontosság csökkenni fog. Az eredménytől függően érdemes elgondolkodni a mérési technológia leváltásán, és a fentebb leírt szempontok között mérlegelni. Szakdolgozatom célja a drón eszközzel történő felmérés vizsgálata, a geodéziai felmérés esetleges leváltásának lehetőségét figyelembe véve, tudományos szempontok szerint.

Vizsgálandó területnek egy olyan vasútállomást választottam, amit az objektumok magas száma és sokfélesége, illetve az utasforgalom és elhelyezkedése kiemelt jelentőségűvé teszi: a váci vasútállomás. A mérést egy DJI Mavic 2 Pro típusú drónnal végeztük, 50 méteres repülési magasságon, átlagosan 4 m/s repülési sebességgel.

A drónokkal való területfelmérés kulcsa az ún. Ground Control Point-k (GCP) megfelelő felmérése a terepen és rögzítése az adatfeldolgozásban, különösképpen a nem RTK drónok esetében. Ezek a fix, X, Y, Z koordinátákkal ellátott pontok a térben elhelyezve viszonyítási pontként funkcionálnak a terület részeként. Ezekhez a fix pontokhoz viszonyítható a terület többi részének térbeli elhelyezkedése.

A GCP-k megfelelő rögzítésének köszönhető, hogy az ortofotókból álló ortomozaik készítésénél pontosnak tűnő terepi domborzat rajzolódik ki. Az eredmények ellenőrzésére hibatérképeket szükséges készíteni, amelyek alapján megállapítható, hogy a területen lehelyezett kontroll pontok ortofotókon látható elhelyezkedései mennyiben térnek el a valós koordinátáktól.

Az ortomozaik készítéséhez szükség van a kérdéses mennyiségű GCP-k felvételére, továbbá fontos szempont a pontok eloszlásának vizsgálata a megfelelő, hibahatár alatti pontosság érdekében. A pontosság mellett a másik szempont az energiatakarékosság, azaz mennyi az a legkisebb mennyiségű rögzített fix pont, amellyel még a megengedett hibahatár alatti eredményeket kaphat a felhasználó. Szakdolgozatom célja ellenőrizni a fentebb leírtak alapján, mennyi az ideális és optimális GCP mennyiség és eloszlás egy UAV-val történő felmérésnél, a megfelelő pontosság megtartásával.

A hibatérképek megalkotásához szükséges mérést egy Bajna (Magyarország) külterületén található bányató melletti területen végeztem el témavezetőim, Rozman Gábor (MÁV Zrt.) és Vörös Fanni (belső témavezető) segítségével. A területre 20 darab GCP-t helyeztünk el összesen, a minél több variáció létrehozása érdekében. Készítettem mind a 20 GCP rögzítésével ortomozaikat, illetve 10 pont, 7 pont, 6 pont, 4 pont, illetve 0 pont rögzítésével, különböző eloszlásokban, melyekből hiba térképeket készítettem. Összesen 6 ilyen replikáció készült, amelyeket összevettem.

2. Elméleti alapok

2.1. Korábbi kutatások

Korábban számos más tanulmányban elemeztek UAV képeket. A DOM (Digital Orthophoto Map) pontosságáról szóló tanulmányban Gao M. et al. (2017) az ősi földrengések felszíni szakadásait vizsgálta, és 6,5 cm, illetve 1,6 cm felbontású DEM-et és DOM-ot kapott. Továbbá Uysal M. et al. (2015) 6,2 cm teljes függőleges pontosságot ért el 60 m repülési magasságból. A gyártási munkafolyamatok és módszerek befolyásolhatják az ortofotók pontosságát. Westoby M.J. (2012) felvázolt egy szerkezetet a mozgásbeli (SfM) fotogrammetriából, amely egy forradalmian alacsony költségű, felhasználóbarát és hatékony eszköz. Azóta az általános gyártási munkafolyamatok SfM és többnézetű, ú.n. sztereopszis technikákat használnak a DSM, DOM, illetve különböző 3D geológiai modellek felépítésére.

Más kutatások is születtek az ideális GCP mennyiség és eloszlás vizsgálatáról, mint például Agüera Vega, F. et al. (2017) vagy Liu, Y. et al. (2018), de konkrét vasúti terület felhasználása céljából még nem készült ilyen témájú kutatás. Liu, Y. et al. (2018) különböző TDOM pontossági vizsgálatokat végzett vidéki tanyák, telkek azonosítása, illetve területrendezés és tervezés céljából. Agüera Vega, F. et al. (2017) építészmérnöki területen használta fel az UAV fotogrammetria adta lehetőségeket, és vizsgálta a GCP-k különböző eloszlását a minél nagyobb pontosság érdekében.

2.2. A drónról

A drónok az UAV, teljes nevén pilóta nélküli repülőgépek ill. távolról irányított légijárművek (Unmanned Aerial Vehicle) csoportjába tartozó járműnek számító szerkezetek. Fogalma nemzetközi szinten ismert, magába foglalja többnyire az összes távirányítással működő, pilóta nélkül működő fel-és leszállási eszközt. Sok, a civil életben is használt tárgyhoz hasonlóan, az UAV-ok is a katonai fegyverkezési ösztönzés által végrehajtott fejlesztések eredményei (Nemzeti Közzolgálati Egyetem, 2013).

Olyan területekre alkalmazzák, ahová embert nem szerencsés kiküldeni, emberélet kockáztatásával járna, vagy a felméréendő terület túl nagy ahhoz, hogy megfelelő idő alatt körül lehetne szemlélni, esetleg nincs elég ember a terep bejárásához. Mint sok minden más találmány, a drón

is a szükség és a technológiai fejlődés általi lehetőségeknek jöhetett létre, és később széles körben válhatott elterjedté.

Napjainkban a drónok már a legkülönbözőbb területeken is nagymértékben felhasználásra kerültek, a teljesség igénye nélkül néhány példa: különböző terepek felmérése mezőgazdaságban, hadiiparban, közlekedésben, felvételt készítés civil célokra stb.

Jelenleg Magyarországon számos engedélynek kell, hogy a pilóta megfeleljen, a repülés céljától függően. Az aktuális rendelkezésekről, és követelményekről UAV légi jármű reptetése esetében (az ú.n. Drónrendeletet) kell figyelembe venni¹. Jelenleg egy vasútállomás területére A2 jogosítvánnyal rendelkező pilóta megléte szükséges.

A légi felvételezéshez szükséges drónt a Magyar Államvasutak Zrt. biztosította. Típusa DJI Mavic 2 Pro (1. ábra), kb. 30 perc repülési időt bíró akkumulátorral, teljesen feltöltött állapotától. A DJI márka a legjobb minőségű kategóriába sorolható drónokat forgalmazó cég, amelyeket elérhető áron lehet beszerezni. A Mavic 2 Pro egy viszonylag kisméretű, 907 grammot nyomó szerkezet, minden tartozékával együttvéve. Méretét tekintve 84x91x214 mm. A drón maximális sebessége 72 km/h. Tárhelyét tekintve MicroSD memóriakártyával, 8 GB belső memóriával ellátott².

¹ <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A2100038.KOR>

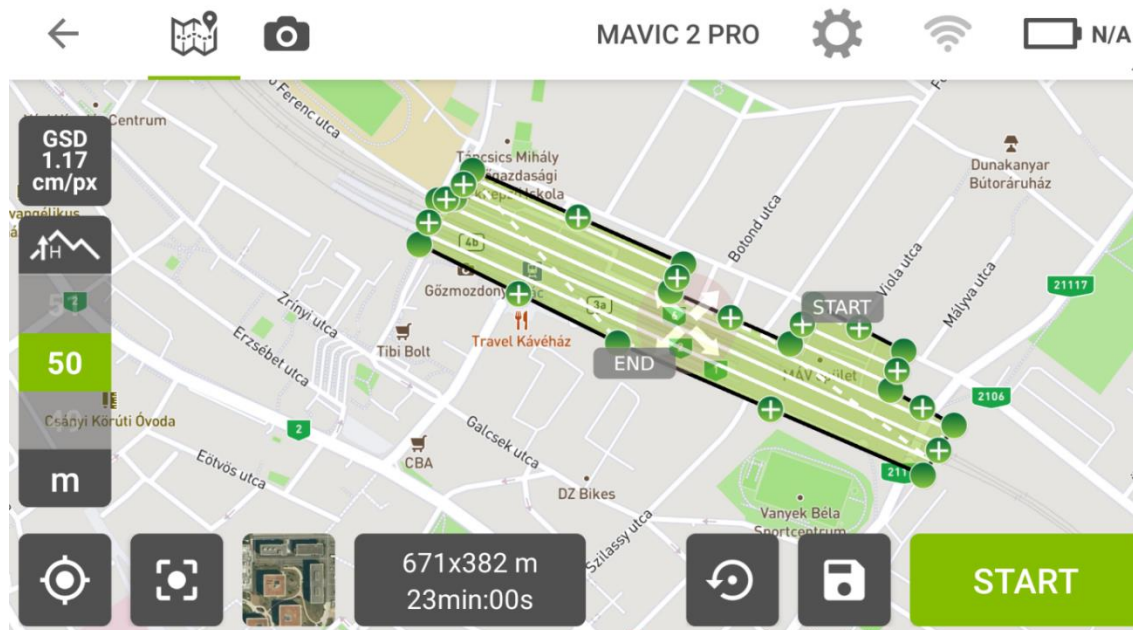
² <https://www.dji.com/hu/mavic-2?site=brandsite&from=nav>, 2018



1. ábra: DJI Mavic 2 Pro a terepi felmérésen

A repülés tervezés részeként szükséges bizonyos alapbeállítások elvégzése az UAV-on a repülés megkezdése előtt. Ezek az ú. n. Mission Planner-be táplálendő alapadatok a következők: a terület határoló vonala Pix 4Dcapture-ben kijelölve; az átfedés mértékének beállítása; repülési magasság értékének beállítása, amely relatív magasság, a startponttól számított; kamera jellemzőinek beállítása (pixelszám, érzékelő méret, fókusz); terepi felbontás, amely a kontrollterület felmérése esetében $1 \text{ pixel} = 12 \text{ mm}$. A felbontás mértéke függ a repülési magasság értékétől.

A légi fényképezéshez használható drónnal lehetőség nyílik a repülési terv kialakítására. Ezt a Pix4Dcapture repüléstervező programban szemléltetem az alábbi ábrákon (2. ábra).



2. ábra: Hosszirányú repülési terv a vasúti területen

A digitális adatfeldolgozás miatt szükség van a soron belüli átfedésekre. Az átfedés mértékét tehát az határozza meg, hány képen szükséges szerepelnie a fényképezett terület egy adott pontjának a megfelelő adatfeldolgozás érdekében. Szakdolgozatomban az ortomozoikok megfelelő pontosságához és helyzethűségéhez fontos, hogy minimum 5-8 képen rajta legyen minden egyes pont. Ehhez az átfedés mértéke 75%-ra lett beállítva. A beállított átfedés mértékétől függ a repülési idő. A magas fokú átfedés miatt korlátozott nagyságú területet volt alkalom lerepülni.

Az adott repülési magasság beállítása és annak megtartása szintén kihagyhatatlan lépés. A repülési magasság értékéhez 40 méter lett beállítva a kontrolterületen, ami a felbontást is befolyásolja, így a képen egy pixel egy $1,44 \text{ cm}^2$ -es területnek számít.

A kameraállás szöge 90 fokra volt beállítva, azaz merőleges a földfelszínre. A drón repülési sebessége 4 m/s-ra lett szabva.

Amit a használt UAV eszközről érdemes tudni, hogy hobbiszintű, azaz autonóm GPS-el rendelkezik, amely használatával max. 10 méteres pontosság garantált. Ezzel szemben a geodéziai terepi méréshez használt RTK GPS az 1-2 centiméteres pontosság elérésére képes, amellyel

nagyon pontos értékeket ad, legyen az bármilyen terepi objektum felmérése, vagy akár az ortomozaikok helyzetének pontosabb megállapításához szükséges kontrollpontok felvétele a terepen. A drónhoz tartozó GPS-el tehát önmagában nem lehet elérni a centiméteres pontosságot, amelyre egy vasúti terület felmérésénél szükség van.

2.3. RTK GPS

Az RTK (Real-Time Kinematic) egy olyan technika, melyet az önálló GNSS vevők pontosságának növelésére használnak. A telefonokban is használt általános GNSS vevő 2-4 méteres pontossággal tudja a helyzetét meghatározni, de az RTK GNSS centiméteres pontosságot biztosít. GNSS RTK vevők úgy mérnek távolságot, hogy összehasonlítanak több, épp befogható műhold által generált kódot, azzal a kóddal, amely a vevőn belül generálódik. Elméleti szinten minimum 4 műhold egy idejű rálátása szükséges, gyakorlatban 7-9 a minimum fix érték eléréséhez. Az idő különbségének a két kód között és a fény sebességének szorzata megadja a távolságot. Az RTK-ban két vevőt használnak, bázisállomást és rovert. A bázisállomás GNSS vevőként egy olyan helyre van telepítve, melynek pozíciója pontosan meg van határozva, egyéb független precíziós mérési módszerekkel. Azonban a helyzetét GNSS használatával is kalkulálja és kiszámolja a hibát ebben a mérésben, összevetve a pontos helyzetével. Ezek a hibák valós időben kerülnek elküldésre a rovernek. A rover ezeket a korrekciós adatokat felhasználva javítja a GNSS alapú kalkulált helyzetét és ez alapján képes centiméteres pontosságot elérni. Az RTK-t főleg olyan területeken használják, ahol fontos a minél nagyobb pontosság elérése, mint például kataszteri felméréseknél, építkezéseken és drónok irányításához. A GNSS RTK vevőkkel való felmérések időt, energiát és költséget takarítanak meg, így lehetséges több munkát nagyobb pontossággal elvégezni.



3. ábra: Egy GCP pont lemérése a vasúti terepen RTK-val (balra) és az RTK GPS kalibrálása a kontrolterületen (jobbra).

3. A vizsgált területek

A vasúti terület felmérése előtt egy ettől a tematikától független területet célszerű választani a kontrolpontok mennyiségének és eloszlásának vizsgálata céljából. Ehhez egy olyan terület lett kijelölve, ahol a felmérés és lerepülés körülményei ideálisak, nincsenek zavaró tényezők a terepen, illetve kiugró magasságértékek. A GCP-k ezen kontrolpont-vizsgálat eredményeitől függően lettek elhelyezve a (későbbi) vasúti területen.



4. ábra: Áttekintő térkép a két választott területről, a vasúti (jobb) és a kontrolterület (bal)

3.1. Vasúti terület

A vasúti területnek választott helyszín a váci vasútállomás, amely a Szob-Budapest vasútvonal egyik legforgalmasabb állomása (70-es számú). Vác Budapesttől 30 kilométerre található település. Negyvenezer lakossal rendelkezik, és szerves részét képezi a főváros agglomerációjának. Az állomás átlagon felüli vasúti forgalommal rendelkezik országos viszonylatban, mind személy, mind teherszállítás terén. Fontos vasúti terület és állomás, számos objektum típussal, egy viszonylag összetett terep, ezért esett erre a választás.

A felméréndő terület nagyságának kb. $60\,930\text{ m}^2$ ($\sim 0,06\text{ km}^2$) volt. 2021. augusztus 30-án, délelőtt 11.30 környékén kezdtük el a repülést. Légi felvételezéshez megfelelő volt az idő: nagyrészt napos, tiszta, szél nem volt a terepen tartózkodás alatt. Start pontnak a terület legmagasabb pontja lett választva, ahova biztonságosan és engedéllyel fel lehetett menni. Ez a terület tematikájától függetlenül minden esetben így zajlik a repüléstervezésnél. A repülés során összesen 523 képkészült.



5. ábra: A váci vasútállomás lerepült területe sárgával, piros jelölőkkel a lehelyezett GCP pontok jelölve.

3.2. A kontrolterület

A vasúti mérés előtt egy olyan terület lett kiválasztva a GCP-k mennyiségének és eloszlásának meghatározása céljából, melynél a vasúti terület másfélszer nagyobb. Ez a terület közvetlen a magyarországi bajnai bányató partjánál, a Pap-földek szántóföldjén, 43 953 m²–es területen található. A bajnai bányatóról tudni érdemes, hogy rekultivált barnaszén külfejtéssel keletkezett. Bajna Komárom-Esztergom megyében található, Budapesttől nagyjából 35 kilométerre nyugatra, a Gerecse délkeleti lábánál.

2021. augusztus 29-én történt a mérés. Kisebb szél, borult idő jellemezte az időjárást, nem ideális repülési idővel. A repülést a délelőtti órákban végeztük el, közvetlen a GPS kalibrálása, hibahatár értékek beállítása és a fix kontrollpontok lehelyezése, majd felmérése után.

Az egész terepen töltött munka körülbelül 2-3 órát vett igénybe. Az ott töltött időt növelték az időjárás viszontagságaival való megküzdés, illetve hogy a megfelelően alapos vizsgálat érdekében szükséges volt 20 darab GCP pont kijelölése a területen, illetve azok lehelyezése, lemérése az RTK-val. Ezek után a lépések után kezdődhet meg a tényleges lerepülése a területnek.

A bajnai területen a 20 darab kontrolpont lehelyezése és felmérése a terepen a következőképp zajlott: a lehelyezendő fix pontot egy A3-as papírra nyomtatott 2x2-es fekete-fehér négyzetrács jelöli a terepen. A lapokat a tervezett lokációra helyeztük, és a földhöz rögzítettük. Ezeket a pontokat a repülés előtt az RTK GPS-el felmértük, a négyzetrács középpontjára szúrva az RTK állványát. A GCP-kat egymástól körülbelül azonos távolságra helyeztük le (6. ábra).

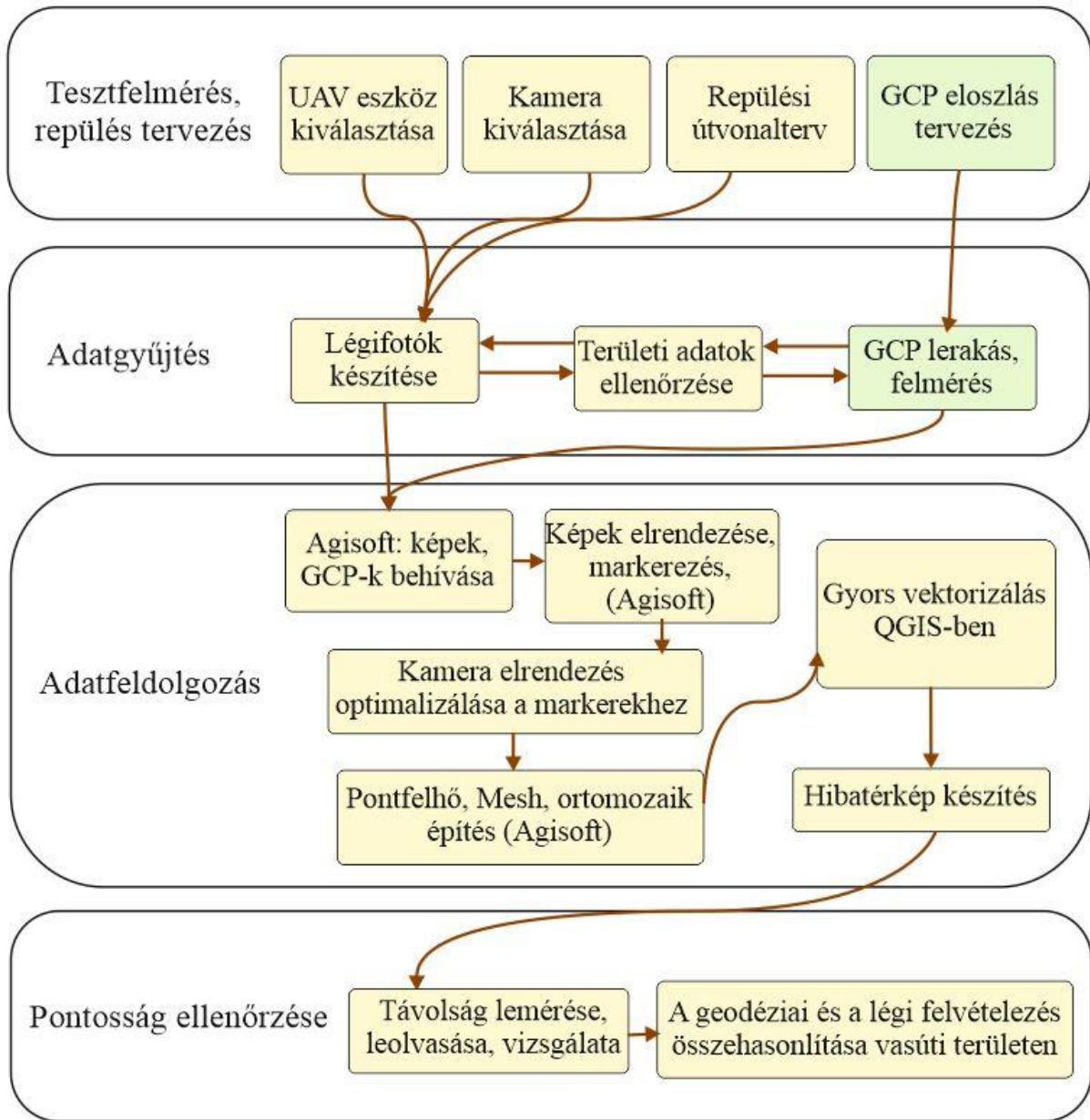


6. ábra: A váci vasútállomás lerepült területe pirossal, helyzetjelölővel a lehelyezett GCP pontok jelölve.

4. Módszertan

4.1. Áttekintő

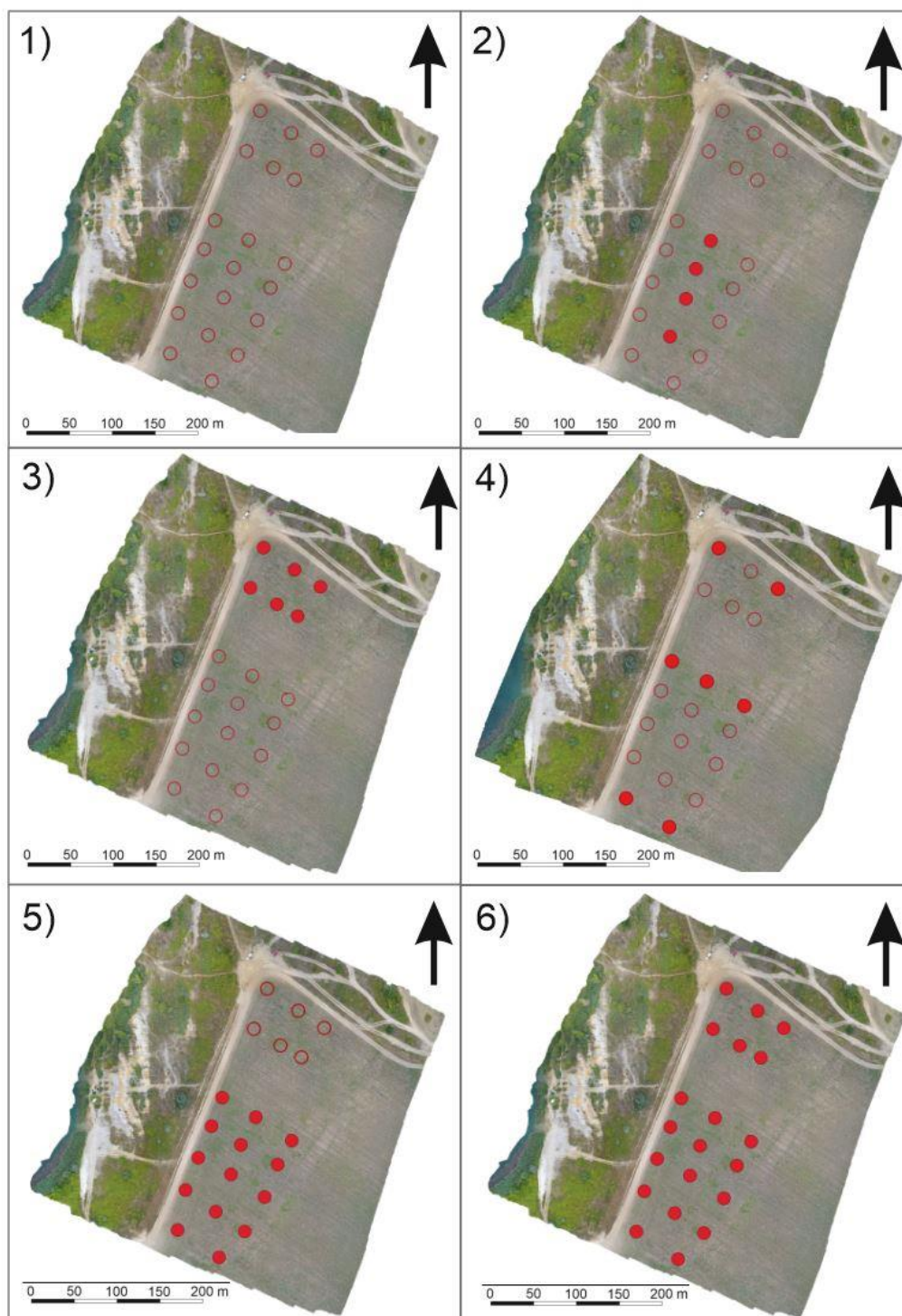
A kutatás folyamatáról egy áttekintő ábrát (7. ábra) készítettem Liu, Y. et al. (2018), illetve Agüera Vega, F. et al. (2017) módszertani áttekintő ábrái alapján. Ezen kutatások lépései nagyvonalakban az én munkámhoz hasonlíthatók.



7. ábra: A saját vizsgálatom munkafolyamata áttekintő ábrán [Liu, Y. et al. (2018)], illetve [Agüera Vega, F. et al. (2017)] módszertani ábrájuk alapján

4.2. Adatfeldolgozás

Szakdolgozatomban a GCP vizsgálathoz a kijelölt területről készített légifelvételekből az Agisoft Metashape képfeldolgozó szoftverben (amely tökéletesen alkalmas drónfelvételek feldolgozására) ortofotókat készítettem. Az ortofotók olyan távérzékelt képek, amelyek centrális vetítéssel készülnek. Ezután 3D-s pontfelhő generálást végeztem majd DEM-modell, illetve ortomozaik építést futtattunk le. Összesen 6 darab ortomozaik-variáció készült ugyan arról a területről (8. ábra). A végeredményből állapítható meg a légi felvételezés, illetve az adatfeldolgozás pontossága és megbízhatósága.



8. ábra: Összefoglaló ábra az elkészített ortomozaikokról, a felhasznált, illetve nem felhasznált kontroll pontjainak megjelenítésével. A teli piros kör az adatfeldolgozás során felhasznált GCP-eket, a kitöltetlen piros karika a nem felhasznált pontokat jelölik.

A képfeldolgozó szoftverben a behívott képekből egy 0, 4, 6, 7, 14, és 20 darab fix pontot felvett ortomozaik-variáció készült. A markerek felvételéhez az ortofotók és a tervezett ortomozaikhoz szükséges pontok lettek behívva szöveges formátumban. A vetületi beállításokra érdemes figyelni, hogy a behívott koordináták egyező vetületi rendszerben értelmezhetők és megjeleníthetők legyenek a szoftver számára.

5. Eredmények

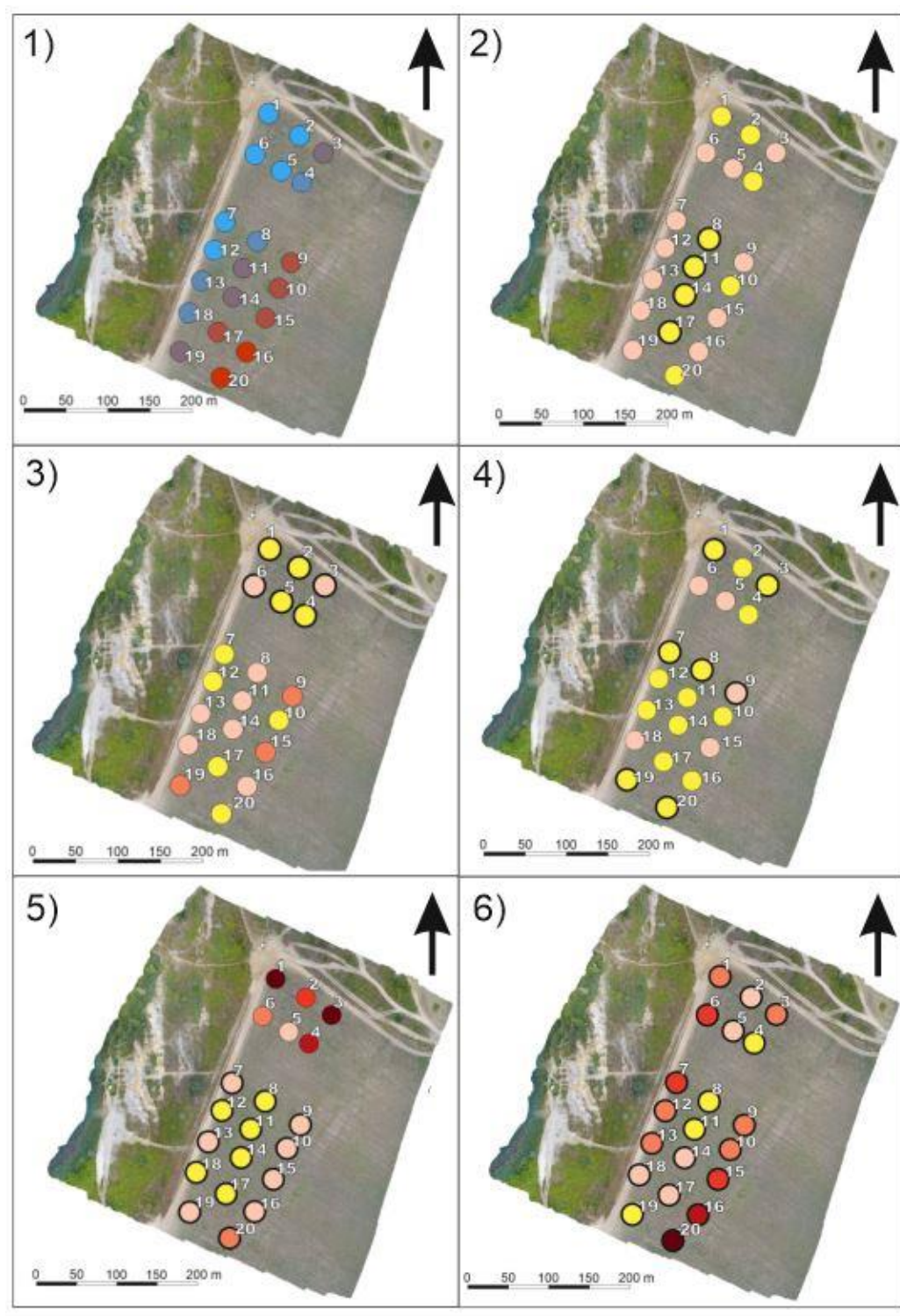
5.1. Hibatérképek

Az ortomozaikokból hibatérképek készültek a vizsgálat célja érdekében. Ezeket a hibatérképeket Quantum GIS térképészeti szoftversegítségével jelenítettük meg, majd a további szerkesztéshez rajzoló program alkalmazására volt szükség. A QGIS egy felhasználóbarát, nyílt forráskódú térinformatikai rendszer (GIS). A hibatérképeken az összes pont felvételre került egy Shapefile réteggént. A hibatérkép elkészítéséhez a QGIS-be a szükséges ortomozaikat .tif formátumban, és az RTK által felmért fix pontokat .txt formátumban kellett behívni. Ezután a képen látható összes GCP-t - amit a terepen lerakott fekete-fehér négyzetrács jelöl – fel kell venni, a pontot pontosan középre téve. Itt is szükséges a szükséges rétegek behívásakor azok vetületi beállításaira ügyelni, egyezniük kell, hogy helyes és érvényes legyen a GCP-felvétel. Az adatfeldolgozás során a 23 700 EPSG-számmal rendelkező Egységes Országos Vetületet alkalmaztam.

Az QGIS-ben az adatfeldolgozó által felvett és az azonos ID-val rendelkező, RTK GPS-el a terepen felvett, fix pontok közti **távolságot** jelölik a különböző színek. Ezek a távolságok az ortomozaik GCP-inek hibaértékei.



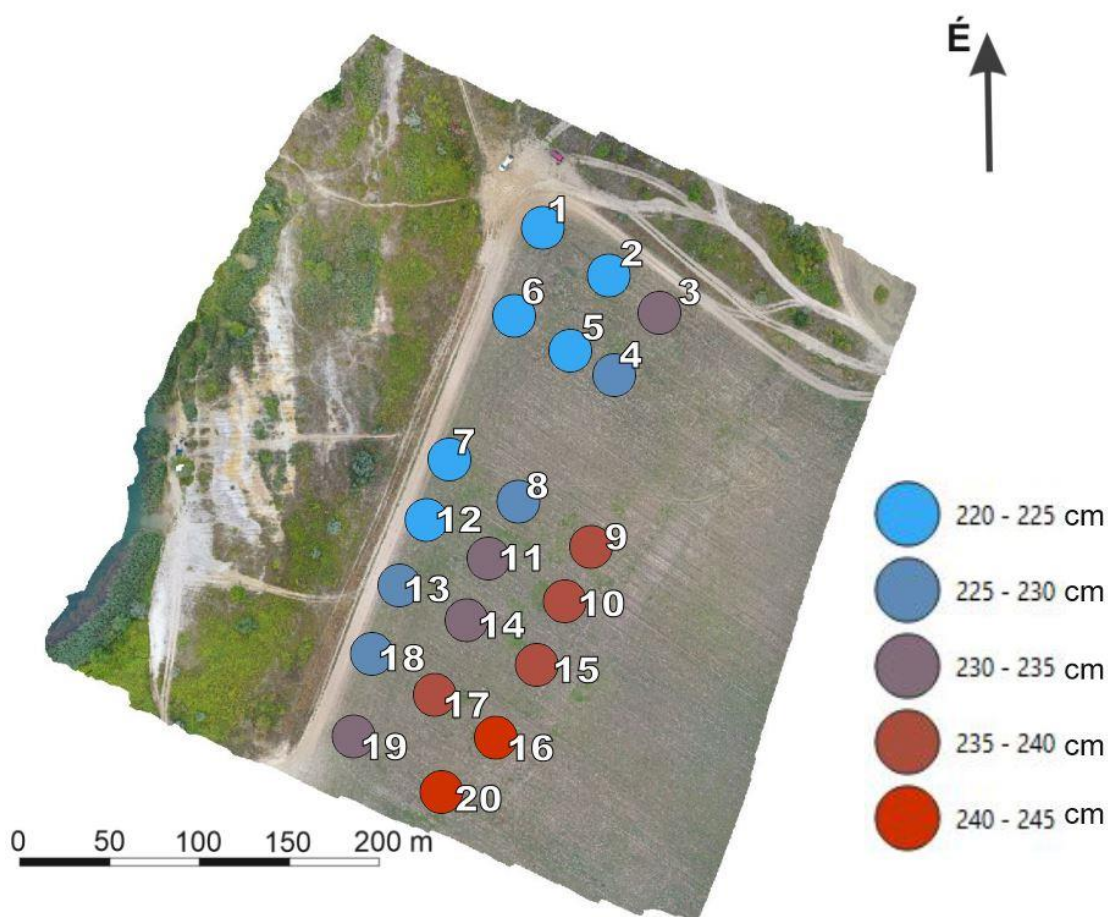
9. ábra: A hibatérképek színekategóriái. A 0 kontrolpontot felhasznált mozaik hibatérképéhez használt színskála (balra), illetve a másik 5 darab hibatérkép közös kategóriája (jobbra) centiméterben megadva. A térképen látható hibaértékek az egyenlő intervallumok módszerével lettek kategorizálva (equal intervals method) (B.D. Dent - Cartography Thematic Map Design). A 10. ábrán látható az elkészült 6 hibatérkép, a fent bemutatott színskálákkal jelölve a hibák mértékét.



10. ábra: A különböző számú kontrolpontot (0, 4, 6, 7, 14, 20) felhasznált ortomozaik-variáció

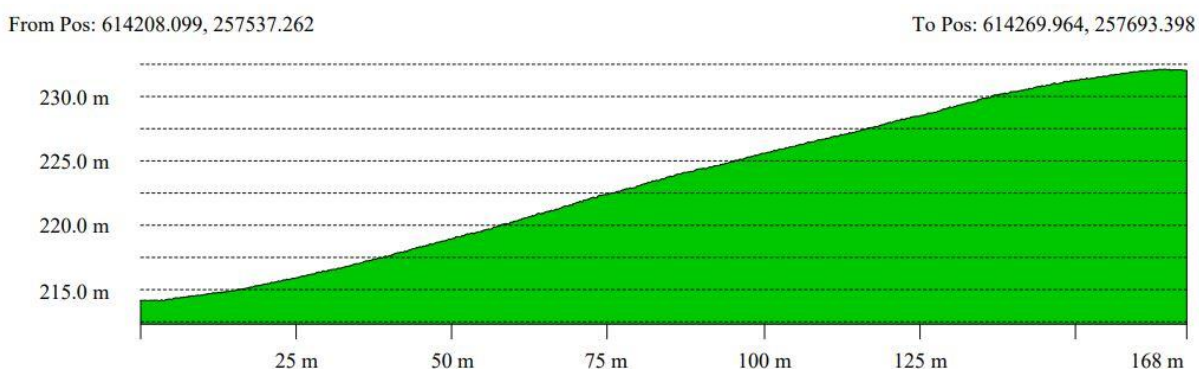
5.1.1. A 0 kontrolpontot felhasznált ortomozaik hibatérképe

A 0 kontrolpontot felhasznált ortomozaik torzulásmentes (relatív értelemben), mivel nem volt felhasznált pont, melyhez képest a szoftver torzítani tudta volna a képekbe táplált koordinátákat. Ilyen szempontból vizsgálva, a terület pontjai egymáshoz képest itt adja a valósághoz legközelebb álló eredményt. A távolságok tekintetében az értékek viszont nagyban eltérnek a geodéziai felmérés GCP-inek koordinátáitól. A hibaértékek 220-245 centiméteres értékek közé esnek. Ez a méteres pontatlanságok azonban jó eredménynek számítanak ahhoz képest, hogy itt nem volt felhasználva az ortomozaik építésénél kontrolpont, és tisztán a hobbi szintű GPS pontosságára támaszkodtunk.



11. ábra: A 0 kontrolpontot felhasznált ortomozaik hibatérképe

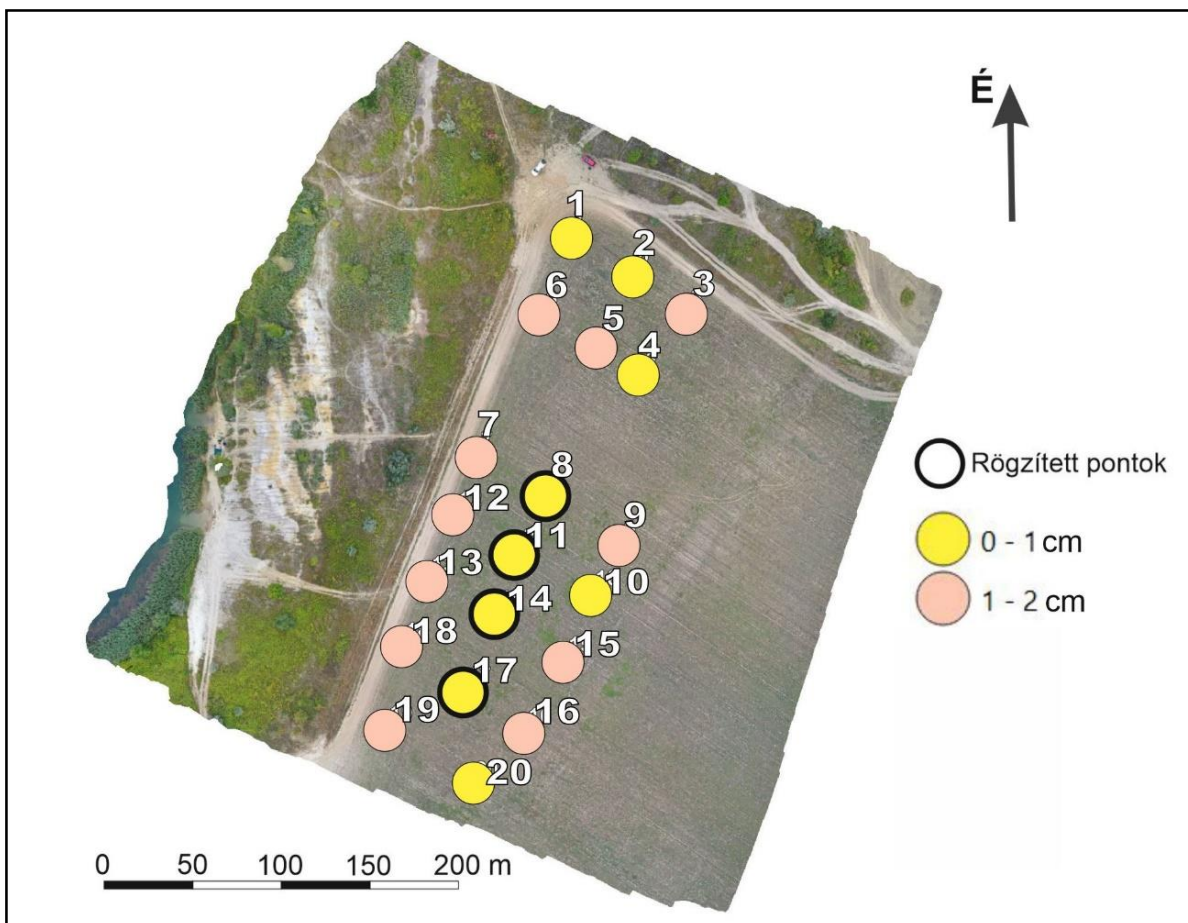
A hibaértékek közt egy trend figyelhető meg, a kapott eredmények pedig a repülési magassággal és a felbontással állnak összefüggésben. Amely GCP-k felett a drón közelebb repült a felszínhez, ott kisebb, ahol a drón és a felszín közt nagyobb volt a magasságkülönbség, ott a nagyobb hibaértékek láthatóak. Mivel az DJI Mavic 2 Pro alapbeállításai közt a 40 méteres repülési magasság volt beállítva, ezért a terület domborzata rajzolódik ki az értékek által. Ennek következtében a hibatérképen látható, hogy a terep enyhén lejt dél-délnyugati irányba. A képfeldolgozás során a szoftver domborzatmodellt is készít, amely alapján ezen állítás bizonyítást nyer (12. ábra).



12. ábra: A bajnai terület magasság metszete ÉÉK-DDNY irányban

5.1.2. A 4 kontrolpontot felhasznált ortomozaik hibatérképe

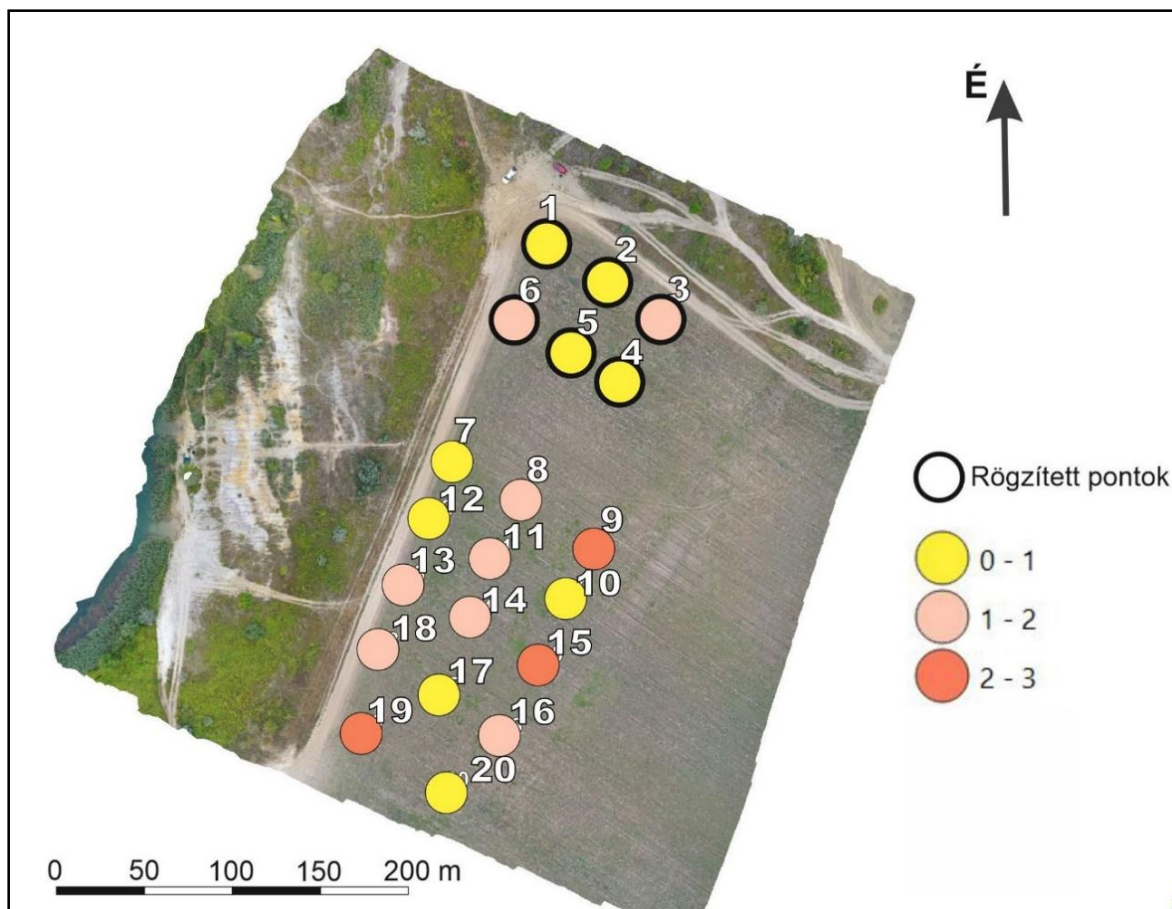
A második variáció a markerezés során 4 pontot felhasznált ortomozaik. A térképen az üres fekete kör az általunk rögzített pontokat jelölik. Az eredmények 1-2 centiméteres pontosságról adnak bizonyosságot.



13. ábra: A 4 kontrolpontot felhasznált ortomozaik-variáció eredményei hibatérképen ábrázolva

5.1.3. A 6 kontrolpontot felhasznált ortomozaik hibatérképe

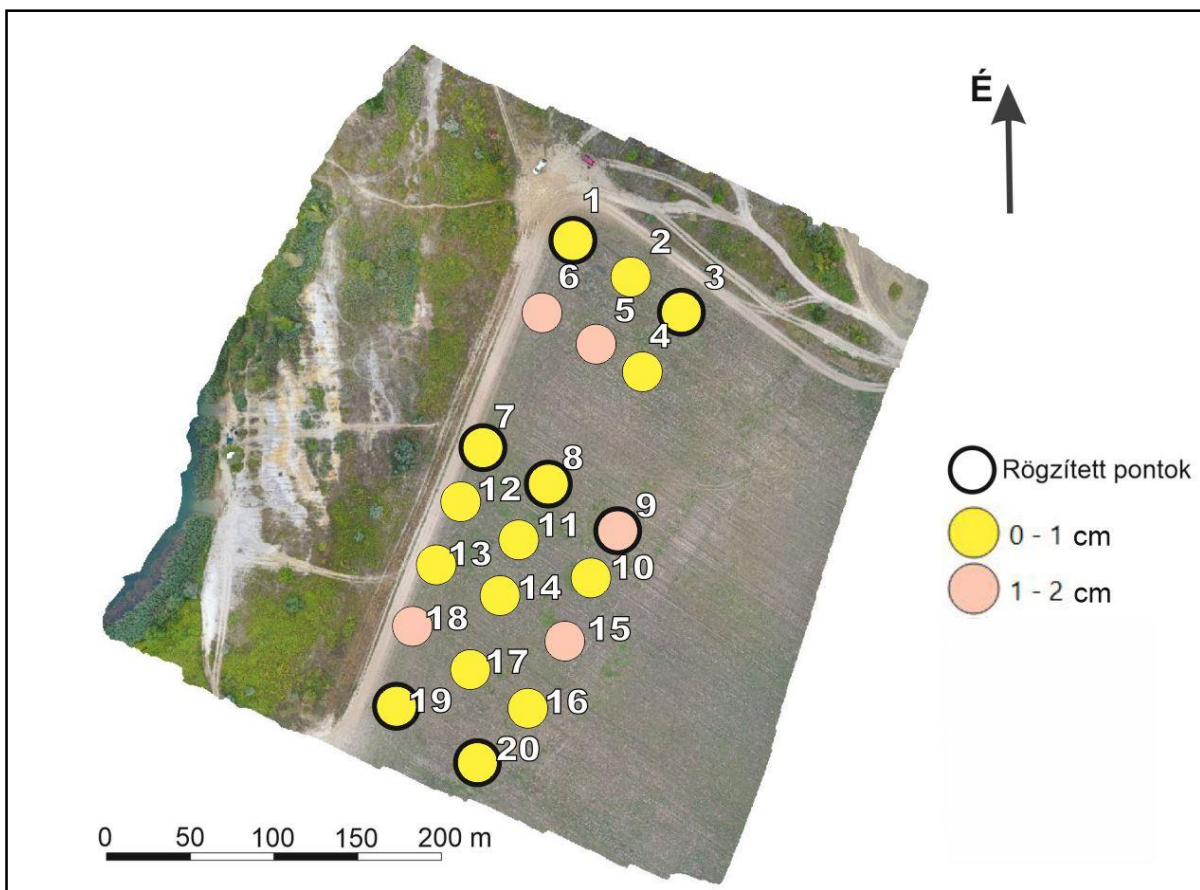
A 6 fix pontot felhasznált ortomozaik értékei közt előfordultak 2 centiméter feletti hibák, de ezek is pontos értékeknek számítanak.



14. ábra: A 6 kontrolpontot felhasznált ortomozaik-variáció eredményei hibatérképen ábrázolva

5.1.4. A 7 kontrolpontot felhasznált ortomozaik hibatérképe

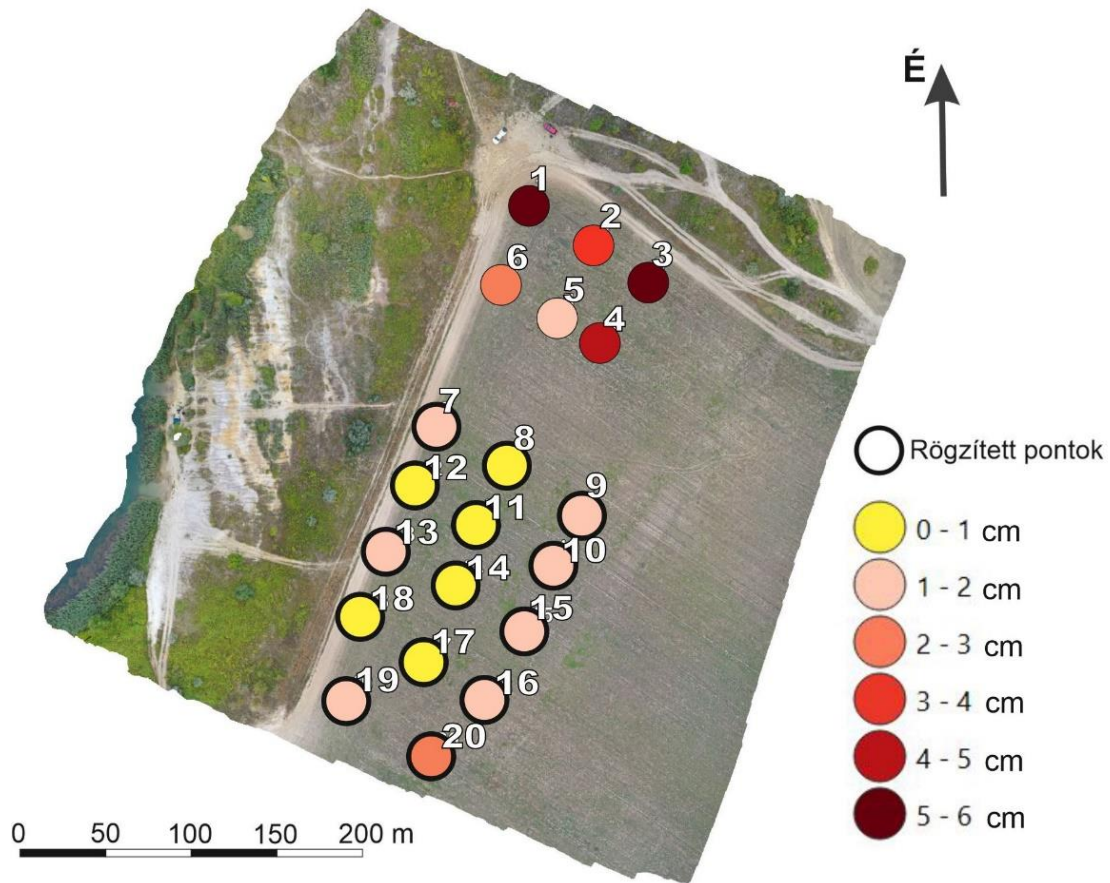
A 7 darab GCP-t felhasznált ortomozaik hibaértékei lettek a legkisebbek. Eloszlás szempontjából a 7 felhasznált kontrolpont a terület 4 sarkán és középen találhatóak.



15. ábra: A 7 kontrolpontot felhasznált ortomozaik-variáció eredményei hibatérképen ábrázolva

5.1.5. A 14 kontrolpontot felhasznált ortomozaik hibatérképe

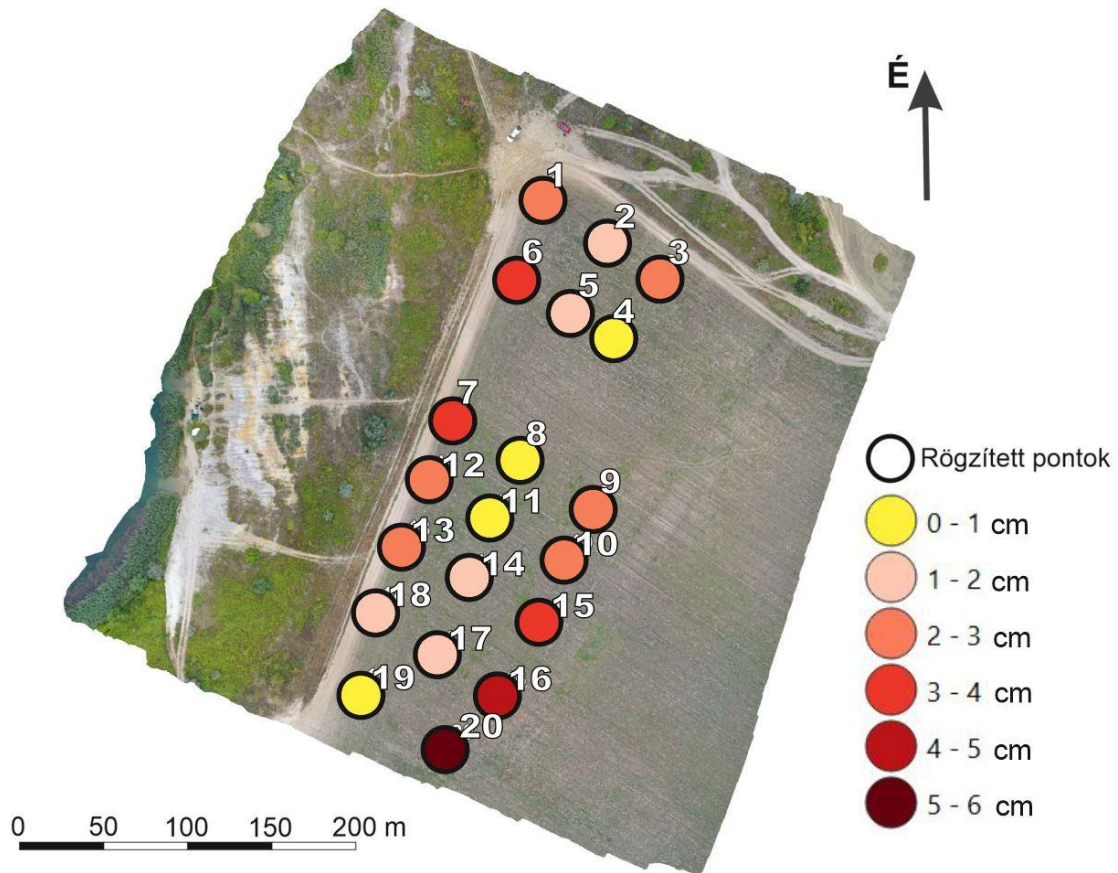
Ezen a hibatérképen a 6 pontos hibatérképpel ellenkező pontok kerültek felhasználásra. A nem felhasznált pontokon 5-6 centiméteres távolságértékek is szemügyre vehetők.



16. ábra: A 14 kontrolpontot felhasznált ortomozaik-variáció eredményei hibatérképen ábrázolva

5.1.6. A 20 kontrolpontot felhasznált ortomozaik hibatérképe

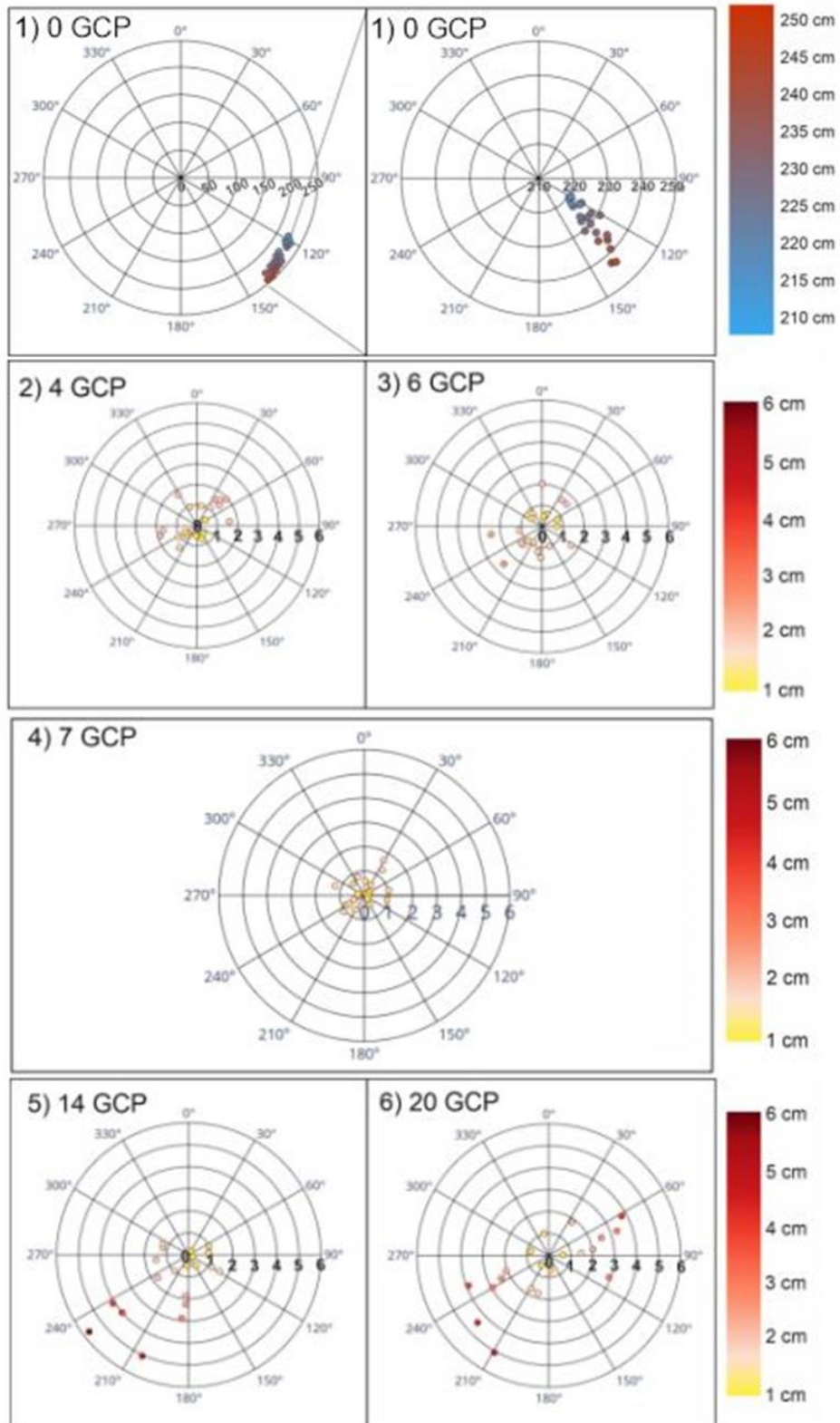
Az összes fix pontot felhasznált ortomozaik hibatérképén is észlelhetők az 5-6 centiméteres hibák, a rögzítések ellenére is.



17. ábra: A 20 kontrolpontot felhasznált ortomozaik-variáció eredményei hibatérképen ábrázolva

5.2. Pontdiagrammok

A 18. ábrán a hibaértékek távolságai mellett a hibák azimut értékeit ábrázolom pontdiagrammon megjelenítve. Az azimut értékeket a QGIS-ben mértem le. Az érték azt mutatja meg, hogy az RTK-val felvett pontokhoz képest milyen irányba térnek el az ortomozaikokról leolvasott pontok.



18. ábra: A hibaértékek azimut értékei pontdiagramokon ábrázolva

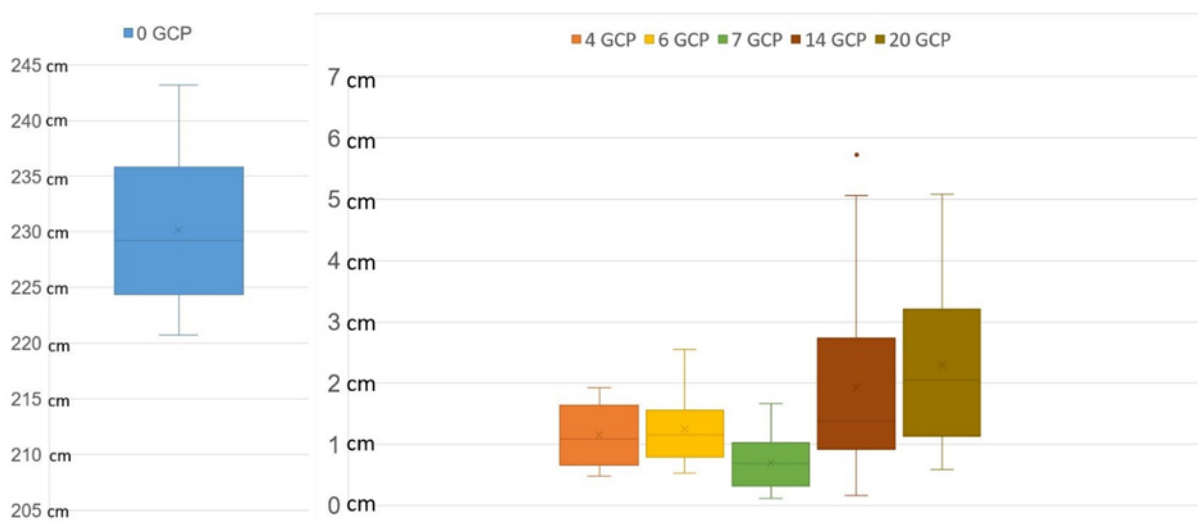
Ezeknél a diagramoknál is a külön színezést választottam a 0 pontot felhasznált ortomozaik értékei esetében, illetve két külön diagramon ábrázoltam ugyanazon hibaértékeket. A bal oldali 0 GCP-s diagramon a 0 értéktől, azaz az RTK pontosságtól a 2,5 méteres intervallumon belül helyezkednek el. Ez az ábra szemlélteti legjobban az értékek valós és egymáshoz képesti elhelyezkedését. Megfelelően szemlélteti a torzulásmentességet, mert kirajzolódik a kontrolpontok valós elhelyezése egymáshoz képest, körülbelül azonos mértékű és irányú eltolódással. Az azimutértékek is minden pont esetében a 115-145° értékek közé esnek.

A jobboldali 0 pontot felhasznált diagramon – belenagyítva a baloldali ábrázolásba – a hibaértékek a 2,1-2,5 méteres intervallumon belül lettek ábrázolva. Ez a diagram szemlélteti leginkább az értékek egymáshoz képesti szóródását.

A további (4, 6, 7, 14, 20) pontdiagramok esetében 0-tól 6 centiméter sugarú pontdiagramon ábrázoltam a hibaértékeket. Az azimut értékekben trend nem olvasható ki. Ennek oka az ortomozaik felbontásában is keresendő, amely eleve 1,2 cm-es pontatlanságot eredményezhet a GCP felvétel során.

5.3. Dobozdiagram

Az elkészült ortomozaikok hibaértékeit dobozdiagramon összesítve jelenítettem meg, ami a 19. ábrán látható.

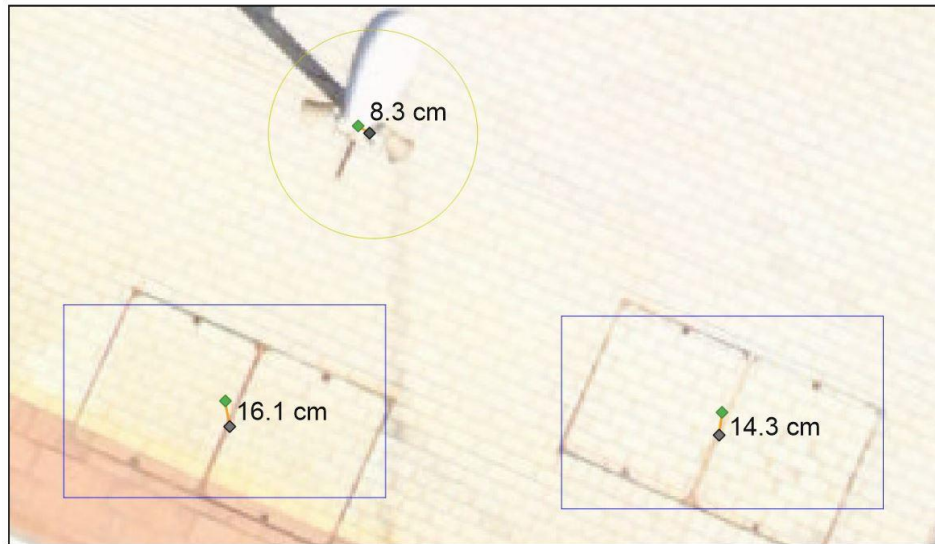


19. ábra: Hibaértékek, dobozdiagramokban összegezve

A dobozdiagramok szemléltetik az egyes ortomozaikok távolságértékeinek szóródását, illetve átlagát. A 0 pontot felhasznált mozaik hibaértékei külön vannak szemléltetve, a már fentebb említett dimenzióbéli eltérések miatt. Látható, hogy a 14 és a 20 darabot felhasznált értékek lettek a legnagyobbak, és a szórás is ezeknél az ortomozaikoknál a leginkább szemügyre vehető, annak ellenére, hogy itt a legtöbb a rögzítés. Ennek oka több tényezőtől tevődik össze. Egyrészt, minél több pont van felhasználva az ortomozaik készítéshez, annál nagyobb esély van hibák létrejöttére az adatfeldolgozás során. A kontrolpontok felvételénél is keletkezhetnek hibák, az elkészült ortomozaikokon látható fixpontok nem megfelelő leolvasása következtében. A leolvasásból adódó probléma magából a korábban említett felbontás értékéből következhet. Illetve, nem utolsó sorban, a procedura legelején, a légi felvételezést megelőző kontrolpont lemérésnél az RTK GPS hibájából adódhatnak.

5.4. A váci adatbázis elkészítése

Szakdolgozatomban a vasúti objektumok felvételét végeztem (vektorizálás) a feldolgozott ortomozaik alapján, azért, hogy saját adatbázist készítek. Ezeket az eredményeket összehasonlítottam a geodéziai felmérésből származó vasúti adatbázis objektumaival. A váci adatbázis elkészítéséhez már a váci vasútállomás területének lerepülése megtörtént, majd az ortofotókból a képfeldolgozás során ortomozaik készült. A vasúti terület lerepüléséhez már az a bizonyos mennyiségű kontrolpont lett lehelyezve a terepen, amely a legjobb eredményt adta a kontrolpont mennyiség vizsgálata során a bajnai területről. Az elkészített ortomozaik alapján pont, vonal illetve felületi objektumokat vettem fel QGIS-ben, minden egyes objektumtípust külön .shp fájlként mentve. Az általam a QGIS-ben berajzolt objektumokat egy, a külső konzulensem által kapott, egyszerűsített adatbázis objektumaival hasonlítottam össze. Az egyszerűsített adatbázis tartalma RTK GPS-el, geodéziai felméréssel lettek felmérve, ami a fix 1-2 centiméteres pontosságot garantálja. Ezen kívül megtalálhatóak ugyanazon pont, vonal és felületi objektumok, amelyeket én is felvettem .shp réteggként. Végül lemértem az azonos objektumok közti távolságot, milyen pontosságot ad a légi felvételezés által létrehozott ortomozaik (20.ábra).



20. ábra: Az eredeti vasúti adatbázisból megjelenített és az általam vektorizált pontszerű objektumok, azok távolságértékeivel

A hibák 8-17 centiméteres értékeket adnak az általam felvett objektumok esetében. Ezek az értékek még mindig az elfogadható kategóriába esnek. Bár nagyobbak, mint a bajnai hibaértékek, de az a terület „ideálisnak” bizonyult. A vasúti területen több zavaró tényező fordulhat elő, amelyek befolyásolhatják az eredményt.

6. Diskusszió

Kutatásom célkitűzéseként az egyik legfontosabb lépés az eddig is alkalmazott hagyományos geodéziai felmérést az UAV, mint korszerű eszközzel, és az általuk nyújtott lehetőségek összehasonlítása különböző szempontok szerint. Ezek a szempontok egymással szoros összefüggésben lépnek érvénybe. A feltevésben, miszerint miért érdemes légi felvételezésre cserélni a terepen történő, hagyományos geodéziai felmérést, nem vehetők figyelmen kívül a következő, táblázatban szemléltetett szempontok.

Összehasonlítási szempontok	<u>Geodéziai terepi felmérés</u>	<u>Légi felvételezés UAV eszközzel</u>

Időigény (csak a terepi felmérésre vonatkozó)	Egy nagyobb, forgalmasabb vasút állomás és környezetének felmérése minimum 3, vagy 4 napba telik	Maximum fél-1 nap, egy nagyobb és összetettebb vasúti terep esetén is.
Költségigény	A méréshez megfelelő GNSS műszer + emberek óradíja szorozva a munkaidővel.	RTK GNSS mérőműszer + egy megfelelő pontosságú UAV eszköz elegendő töltöttségi időt bíró akkumulátorral, kamerával. Ezek egyszeri, nagyobb volumenű költségek. Plusz 2 ember óradíja szorozva a munkaidővel.
Munkaerőigény	Minimum 3 ember jelenléte és munkája szükséges, de nagyobb területeken biztonság és gyorsaság szempontból ennél több javasolt. Minimum 1 ember figyelőrként tevékenykedik, 1 személy vasúti objektumokat mér le, 1 fő pedig külön az adatbeviteli feladatokat végzi. A felosztás módosulhat egy csapaton belül más beosztásra, de a fentebb leírt szituáció az alapeset.	Kettő ember elegendő. Egy személy működteti a drónt, „reptet”, akinek jogosítvánnyal kell rendelkeznie. A másik személy ellenőriz, figyeli a procedúrát. Repülés előtt, az RTK GPS-el való kontrolpont felmérésnél az egyik személy kezeli a GPS-t, másik személy tartja az RTK botját.
Kivitelezésszempont	A pályára lépéshez engedélyek kellenek vasutas szinten, egyszerűsített forgalmi vizsga megléte szükséges, melyet nehéz megszerezni. Nyilvántartás fejrovas könyvben, kik hol, mit, milyen munkát végeztek.	Itt a fix pontok lerakása és azok helyzetének RTK-val történő felvétele után egy magaslati pontot kell keresni a terepen, ahonnan biztonságosan el lehet indítani a mérést. A drón repülési paramétereinek és a kamera beállítása után a repülésre kell odafigyelni.

	Ezek még mind a tényleges mérésen kívüli teendők.	
Feldolgozás, utómunka	A feldolgozó szoftver automatikusan hozza létre az adatbázist	Az ortofotókból ortomozaik-készítés egy hatékony képfeldolgozó szoftver segítségével. Objektumok felvétele az ortomozaikon. A képfeldolgozó szoftverben lefuttatott Optimize Camera Alignment, Build Mesh, Build Orthomosaic lépésekhez erős gépre van szükség, mert ettől függ ezen procedúrák lefutásának ideje.
Biztonság	A dolgozó szakemberek a vasúti terület egészét, napokon keresztül járják be, legtöbbször a forgalom zavarása nélkül, a kockázat igen jelentős, a síneken is kell mérni.	Az dolgozó szakemberek nem a vasúti síneken tevékenykednek, hanem egy biztonságos, stabil kezdőpontról indul a mérés. Nem kell a vasúti területen mászkálni, ezzel a biztonság jelentősen nő a terepi felméréshez képest.
Időjárásnak való kitettség	Emberi tényezőtől és az RTK GNSS-től függ, erős szél, eső nem ideális, de megoldható, ha nagyon szükséges.	Drónnal való repülés nem ideális időjárási feltételek közt kockázatos, nem javasolt.
Összegzés	Időjárásnak való kitettség és az adatfeldolgozás, utómunka szerinti érvek a terepen történő felmérés javára szólnak.	Az időigényesség , a hosszútávú költségigényesség , a kivitelezés egyszerűsége, a munkaerő-igény , valamint a biztonsági szempontok szerinti érvek a légi felvételezés mellett szólnak.

1.táblázat : A légi felvételezés, illetve a hagyományos geodéziai felmérést hasonlítom össze különböző egymástól függő szempontok szerint.

A költségigény a terepen tulajdonképp az emberigény és a munkaerőigény szempontok szorzata onnantól számítva, mikor a szükséges mérőeszközök rendelkezésre állnak. Azonban a költségigényesség a feldolgozás, utómunka eredményére is kihat. Az időjárás, illetve a biztonság szempontjai is befolyásolhatják a költségeket, illetve maga a „nem megfelelően kiválasztott időjárás”, napszak a biztonság szempontjára is hatással lehet. A kivitelezés szoros összefüggésben áll az idővel, és a költséghatékonyságot is befolyásolhatja. A táblázat összegzése alapján a légi felvételezést, mint terület felmérési módszert érdemesebb alkalmazni.

7. Konklúzió

A bajnai terület körülbelül 44 000 km²-es, nagyjából téglalap alakú terület, ahol nem találunk fizikai akadályt, így nagyjából azonos távolságra lett elhelyezve a 20 kontrolpont.

Az elkészült ortomozaik-variációk hibaértékei mellett azimutértékeket is felmértem, azaz, hogy a hiba milyen irányú az x és y koordináták síkjában. A pontdiagramokon megjelenített azimutértékekből a 4, 6, 7, 14, ill. 20 kontrolpontos értékek esetében nem lehetett semmilyen trendet leolvasni, tehát a távolságok irányából nem következett semmilyen összefüggés. A 0 kontrolpontot felhasznált ortomozaik esetében azonban egy adott intervallumba estek az értékek, mind a 20 GCP nagyjából egy irányba, és nagyjából azonos távolságra került a fix RTK ponthoz képest. A torzulásmentesség miatt alakult így az eredmény, az ortomozaik pontjai egymáshoz képest ennél az ortomozaiknál mutatnak legkisebb eltérést.

A dobozdiagram esetében megfigyelhető, hogy a legjobb eredmény a 7 kontrolpontot felhasznált ortomozaik esetében jött létre. Eloszlás tekintetében: a sarokpontokon, illetve a terület középső részén található pontok markerezése az ideális. Az eloszlás és mennyiség tekintetében ez a legmegfelelőbb választás a minél nagyobb pontosság elérése érdekében, így a vasúti terület felméréséhez erre a GCP mennyiségre esett a választás. A vasúti terepen az elhelyezést befolyásolta a vasúti tereptárgyak (vezetékek, sínek, peronok, tetőfedél) elhelyezkedése, de a cél az egymáshoz képesti, nagyjából azonos távolságra való törekvés

A váci adatbázis elkészítésekor az általam bejelölt és az RTK-val mért koordináták közti különbség 8-17 centiméteres pontosságot adott. Ez hibahatár érték alatti eredménynek számít, viszonylag nagy pontosságot ad. Az eredmény oka több tényezőből tevődhet össze: az összetett terepi szerkezet, kiugró magasságértékek, a repülési sebesség nagysága, a felbontás. A kontrol területen míg ideális körülmények között a közel ugyanolyan pontosságot lehet elérni, mint geodéziai felméréssel, addig ez az eredmény a vasúti terepen egy nagyon jó eredménynek számít, ahol a körülmények nem kedvezőek.

Összehasonlítva a légi felvételezés szempontjait a geodéziai felméréssel, és a hibaértékeke figyelembe vételével, a drónos területfelmérés hosszútávon egy egyszerűbb, gyorsabb és költség-hatékonyabb mérési módszer. Érdemes a légi felvételezésre váltani vasúti területen.

8. Összefoglalás

Egy megfelelő és ideális körülményekkel rendelkező teszterületet választottam az ideális földi vezérlőpont mennyiségének és eloszlásának vizsgálatára. Összegzésképpen tehát olyan mennyiségű GCP-t kell elhelyezni, amely már kellő pontosságot ad, de még nem ad nagyobb hibát a sok használt fix pont miatt. Ebben az esetben a kontrolpontok ideális mennyisége – 7 darab.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy az ideális GCP a 4 sarokban, ill. a terület közepén elhelyezkedő 7 pont volt. Mivel a hosszú távú cél az UAV repülés frekvenciáltabb körzetben való megvalósítása, ezért erre az előzetes felmérésre a biztonságos és gyors repülés érdekében volt szükség. Ennek alapján a 7 GCP a vasúti területre is használható.

A drónhasználat számos területen egy innovatív megoldást biztosító módszer bármilyen tematikájú terület felmérésre, különösen a nehezebb terepi viszonyok tekintetében. A légifelvételezés hatékonysága és pontossága szakdolgozatomban bizonyítást nyert vasúti területen. Hosszú távon érdemes a hagyományos geodéziai felmérés UAV eszközre való leváltását fontolóra venni.

9. Köszönetnyilvánítás

Kiemelt köszönet illeti külső témavezetőmet, Rozman Gábort, aki lehetőséget biztosított a MÁV Zrt. által a terepen történő munkafolyamatok bevonódásába, megfigyelésébe, illetve az ortomozaiképzés betanításában, és a további adatfeldolgozási folyamatok elvégzéséhez nyújtott segítségéért.

Dolgozatom nem jöhetett volna létre témavezetőm, Vörös Fanni türelme és áldozatos munkája nélkül.

10. Irodalomjegyzék

<https://www.dji.com/hu/mavic-2?site=brandsite&from=nav>. Utolsó elérés: 2022. május 7.

<https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A2100038.KOR>. Utolsó elérés: 2022. május 7.

Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2017): Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 98, 221–227. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.002>

Dent, B.D., Torguson, J.S., Hodler, T.W. - Cartography Thematic Map Design (Sixth edition) Kiadási év: 2008, ISBN 978-0-07-294382-5, Kiadó: Higher Education, McGraw-Hill, www.mhhe.com, 69. oldal

Gao, M.; Xu, X.; Klinger, Y.; Woerd, J.V.D.; Tapponnier, P. High-resolution mapping based on an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to capture paleoseismic offsets along the Altyn-Tagh fault, China. Sci. Rep. 2017, 7, 8281.

Nemzeti Közzolgálati Egyetem (2013): Pilóta nélküli repülés profiknak és Amatőröknek. Szerkesztő: Dr. Palik Mátyás, Lektorok: Prof. Dr. Kovács L. Prof. Dr. Óvári Gy., Olvasószerkesztő: Nagy Imréné, Műszaki szerkesztő és ábrarajzoló: Dr. Szilvássy L., A kiadvány szerzői: Dr. Békési B., Dr. Bottyán Zs., Dr. Dunai P., Halászné dr. Tóth A., Prof. Dr. Makkay I., Dr. Palik M., Dr. Restás Á., Dr. Wühl T. ISBN 978-615-5057-64-9, Kiadó: Nemzeti Közzolgálati Egyetem, Budapest, 25.oldal.

Liu, Y., Zheng, X., Ai, G., Zhang, Y., & Zuo, Y. (2018): Generating a high-precision true digital orthophoto map based on UAV images. Canadian Historical Review, 7(9). <https://doi.org/10.3390/ijgi7090333>

Uysal, M.; Toprak, A.S.; Polat, N. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. Measurement 2015, 73, 539–543.

Westoby, M.J.; Brasington, J.; Glasser, N.F.; Hambrey, M.J.; Reynolds, J.M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 2012, 179, 300–314.

Nyilatkozat

Alulírott, Jedlicska Zoé 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.

Jedlicska Zoé
a hallgató aláírása