

SZAKDOLGOZAT

**OE-AMK
2022**

**Sipos Johanna
T000542/FI12904/A-G**



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet

SZAKDOLGOZAT

Hulladékdepónia térfogatszámítása INSAR és UAV technológiával

OE-AMK

2022

Hallgató neve:

Hallgató törzskönyvi száma:

Sipos Johanna

T000542/FI12904/A-G



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Sipos Johanna

Szakedolgozat száma: SZD22011414108852

Törzskönyvi száma: T000542/FI12904/A-G

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: földmérő és földrendező mérnök

Specializáció: Geoinformatika specializáció

A dolgozat címe: Hulladékdepónia térfogatszámítása INSAR és UAV technológiával

A dolgozat címe angolul: Landfill Volume Calculation with INSAR and UAV Technology

A feladat részletezése: Ismertesse az INSAR és a fotogrammetriai alkalmazású UAV technológiát. Végezzen a kijelölt hulladékdepónián térfogatszámítást két különböző módszerrel: UAV technológia - DJI Phantom 4 pro drón használata, INSAR technológia-radarkép használata. Ezt követően értékelje ki az ezen technológiák felhasználásával kapott eredményeket majd hasonlítsa össze azokat. Munkáját foglalja össze egy részletes műszaki leírásban.

Intézményi konzulens neve: László Gergely Tibor

A kiadott téma elévülési határideje: 2024. 12. 15.

Beadási határidő: 2022. 12. 15.

A szakedolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Székesfehérvár, 2022. 10. 05. P.H.



Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom: 2022. 12. 15.

belső konzulens

külső konzulens



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat/diplomamunka saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozat/diplomamunkában található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Kelt: BUDAPEST, 2022. 12. 10.

Sipos Péter
.....
hallgató aláírás

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	4
2.	Távérzékelés	5
2.1	Távérzékelés jellemzői és elméleti folyamata.....	5
2.2	A távérzékelés típusai energiaforrások alapján.....	7
2.2.1	Passzív távérzékelés.....	7
2.2.2	Aktív távérzékelés.....	8
2.3	Spektrális sávok	8
2.4	Reflektancia.....	10
2.5	Műholdképek felbontása	11
2.5.1	Térbeli felbontás	11
2.5.2	Spektrális felbontás.....	11
2.5.3	Időbeli felbontás	11
2.6	Képsávok száma alapján	12
2.6.1	Monokromatikus.....	12
2.6.2	Multispektrális	12
2.6.3	Hiperspektrális	12
3.	Földmegfigyelési program bemutatása.....	13
3.1	Kopernikusz program.....	13
3.2	Sentinel műholdcsalád	14
4.	Mi az InSAR technológia?.....	16
4.1	Interferometria alapelvek	16
4.1.1	Bázisvonal.....	16
4.1.2	Az InSAR technológia működése.....	17
5.	UAV technológia a légi távérzékelésben.....	21

5.1	Az UAV fogalma	21
5.2	Drón működése és felhasználási területei	22
5.3	Drónnal való repülés tervezése	23
6.	A kutatási feladat bemutatása	24
6.1	A feladat ismertetése	24
6.2	Mérési időpontok	24
7.	Adatfeldolgozás InSAR technológiával.....	25
7.1	Előkészítés – SLC letöltése.....	25
7.2	SNAP program - adatfeldolgozás.....	27
7.2.1	Coregistration folyamata– fókuszban az <i>IW2</i> alsáv.....	27
7.2.2	Specify product subset	29
7.2.3	Goldstein fázisszűrő használata	30
7.2.4	Fáziskicsomagolás és georeferálás	31
7.3	Térfogatszámításhoz felhasznált kép kiválasztása	32
7.4	Térfogatszámítás és domborzatmodell.....	34
8.	Adatfeldolgozás UAV technológiával	37
8.1	Előkészítés.....	37
8.1.1	A terepi méréshez használt műszerek	38
8.2	A terepi mérés	39
8.2.1	A hulladéklerakó koronavonalának meghatározása	40
8.2.2	Illesztőpontok mérése GPS eszközzel	40
8.3	Légifényképek feldolgozása.....	41
8.3.1	PIX4D Mapper- a feldolgozásról röviden	42
8.3.2	A hulladékdepónia felszínmodellje	45
8.4	Hulladéklerakó térfogatának számítása.....	46
8.4.1	Depóniatér koronavonala alatti térfogata.....	46

8.4.2	Modellezett maximális depónia térfogat.....	47
8.4.3	Légifényképekből számított térfogat	47
9.	Konklúzió.....	50
10.	Összefoglaló.....	51
11.	Summary	53
12.	Irodalomjegyzék	55
13.	Ábrajegyzék.....	59
14.	Táblázatjegyzék	61
15.	Mellékletek	62

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben jelentős fejlődésen ment keresztül a műholdas távérzékelés, ezáltal napjainkban az élet egyre több területén használják az emberek megfigyelés, mérés céljából például a mezőgazdaságban, meteorológiában. Ebben a fejlődésben egy újabb lépcsőfok volt a Kopernikusz program keretén belül 2014-ben üzembe helyezett Sentinel-1A műhold, melynek műholdfelvételeihez ingyenesen bárki hozzáférhet.

Az InSAR technológia mellett az elmúlt 20 évben megjelent egy újabb úttörő találmány, a drón. A drón népszerűsége az elmúlt évtizedben folyamatosan növekedett, hiszen már nem csak szórakozáshoz vásárolják az emberek a drónokat, hanem megfigyelési, feltérképezési, mérési, akár már csomagszállítási célból is. Ez az UAV technológia megkönnyíti a szakemberek mindennapjait is, hiszen ezzel sokkal könnyebb például egy építmény térfogatát megállapítani, nem kell a mérést végző szakembernek veszélyes, magasan lévő helyre feljutnia.

Szakdolgozatomban a következő kutatási kérdésre keresem a választ: egy hulladéklerakó térfogatszámításakor az InSAR technológia használatával kaphatunk-e olyan pontos értékeket, mint az UAV technológia alkalmazásakor?

Ennek megválaszolásához kutatásomban InSAR műholdfelvételekből készítek felszín, - és domborzatmodelleket, melyek segítségével kiszámíthatom a hulladékdepónia térfogatát. Emellett elvégzem a kiválasztott hulladéklerakó drónnal történő helyszíni felmérését is, majd az elkészült felvételek feldolgozásával felszínmodellt hozok létre. Az UAV technológiával történő térfogatszámításhoz a hulladéklerakó referencia felszín magassági adatait hasonlítom össze a felmérés által kapott felszínmodell magassági értékeivel.

Ha a kutatás végén az InSAR és az UAV technológiával történő térfogatmérés eredménye megegyezik, akkor elmondható lesz az, hogy egy ilyen mérési feladat elvégzésekor az ingyenesen hozzáférhető adatokból, ingyenes program segítségével is ugyanazt az eredményt kapjuk, amit a – költséges és nem minden ember számára elérhető – drón technológiával.

2. TÁVÉRZÉKELES

A távérzékelés (angolul: *remote sensing*) fogalma alatt összefoglalóan azokat az adatszerzési és adatfeldolgozási eljárásokat értjük, amelyek során területekről, tárgyakról, jelenségekről egymástól eltérő módszerekkel és eszközökkel egy adott távolságból, közvetve, érintés nélkül információkat, adatokat gyűjtünk és rögzítünk. Ez a fogalom magába foglalja a távérzékelésből származó adatok feldolgozási folyamatát is, amikor az összegyűjtött adatokat definiáljuk, mérjük, ezáltal információkat nyerve az adatokból. A távérzékelés során nyert adatokat az elektromágneses energia közvetítésével kapjuk meg az elektromágneses spektrum eltérő hullámhossztartományjaiban, amelyeket spektrális tartományoknak is szoktak nevezni.

Magát a távérzékelés kifejezést akkor kezdtük el először használni, amikor a műholdakon az első földfelszín fényképező berendezések munkába álltak, de a légifényképezés, mint információszerzési technika már több száz éve ismert. Érdekesség, hogy léggömb segítségével 1839-ben készítették az első légi fényképet Franciaország területén. [1, 2]

2.1 Távérzékelés jellemzői és elméleti folyamata

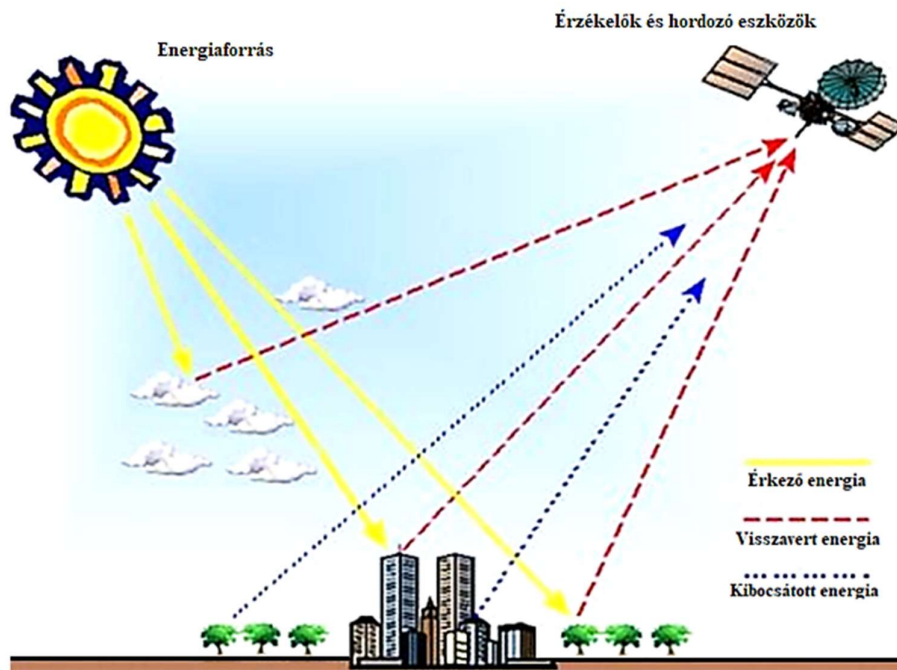
A távérzékelés működésének megértéséhez elengedhetetlen ismernünk az elektromágneses sugárzás fogalmát. A távérzékelésben használatos berendezések az elektromágneses sugárzást érzékelik és mérik, ami nem más, mint az anyagi testek, vagyis a tereptárgyak és a földfelszín energia-leadása. Több tényező is befolyásolja az energiaáram mértékét: a visszaverődés, az elnyelődés és a hőmérséklet (minden létező anyag, melynek -273 °C , azaz 0 °K felett van a hőmérséklete, folyamatosan elektromágneses energiát bocsát ki magából).

A sugárzás elektromágneses hullám formájában terjed a térben. Az állandó terjedési sebessége az elektromágneses sugárzásnak $c = 299\,790\text{ km/s}$ (vákuumban értendő), amelyet nem befolyásol az elektromágneses hullám hosszúsága. Ennek képlete a következő:

$$c = f \cdot \lambda,$$

tehát az elektromágneses sugárzás, vagyis a fény terjedési sebessége (c) egyenlő a frekvencia (f) és a hullámhossz (λ) szorzatával. Az elektromágneses sugárzásnak két típusa ismert: a természetes (pl.: égbolt, Nap) és a mesterséges (pl.: izzólámpa) sugárzás. [5]

Az egyik legfőbb jellemzője a távérzékelés folyamatának, hogy ez az eljárás egyáltalán nem befolyásolja a vizsgált jelenség, tárgy állapotát. Ennek a módszernek a segítségével olyan területeket, tárgyakat láthatunk, amely az emberi szemnek láthatatlan, mivel az eljárás során alkalmazott eszközök azokon a hullámhosszokon is végzik a környezet megfigyelését, amely az elektromágneses spektrum látható tartományán túl helyezkednek el. Az eljárás során kvalitatív és kvantitatív információkat is nyerhetünk. A távérzékelési eljárás másik fontos előnye, hogy a kapott adatok reprodukálhatók, illetve egymással összevethetők. Összehasonlítás során más időpontban, más lokalizációjú felvételeket is vizsgálhatunk a tárolt információk alapján, melynek segítségével változásvizsgálatokat (pl.: törésvonal elmozdulása) végezhetünk, illetve figyelemmel tudunk kísérni egyes folyamatokat. A megszokott felmérési módszerekhez képest a távérzékelési technikákkal gyorsan tudunk sok információt begyűjteni a nagyobb kiterjedésű területekről. [1, 2]



1. ábra: A távérzékelés folyamatának szemléltetése [1]

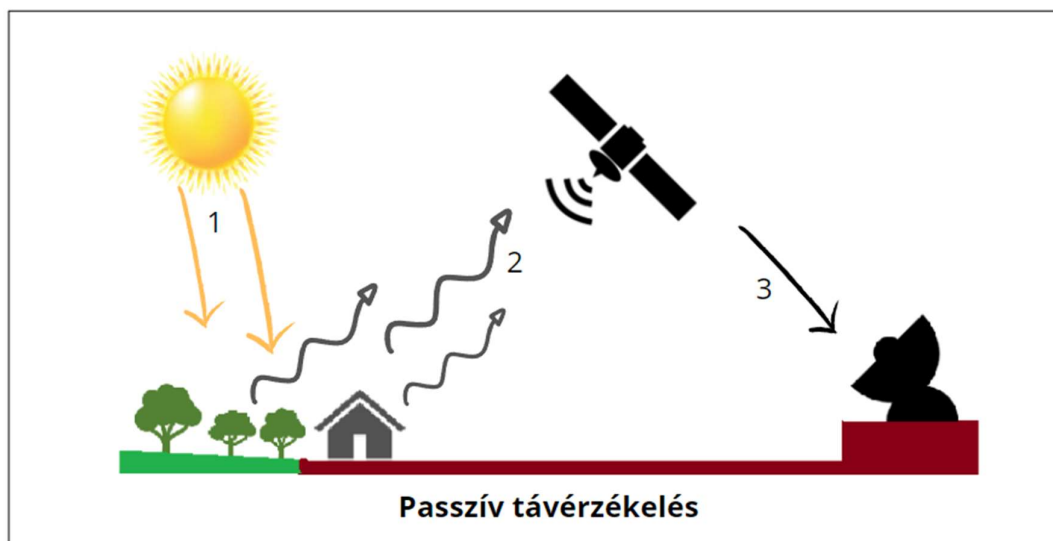
Az 1. ábrán a távérzékelés leegyszerűsített, elméleti folyamata látható. Ebben a módszerben résztvevő eszközök és berendezkedések a tereptárgyakról és a földfelszínről visszaverődő elektromágneses energiát (elektromágneses sugárzást) képesek érzékelőkkel mérni. Az energiából kinyert, rögzített adatok komplexek, mivel azok magukba foglalják a földfelszíni elnyelődést után a visszaverődésből megmaradó energiát, az atmoszférán már kétszer átmenő és módosult mesterséges (pl.: tereptárgy) és természetes (pl.: Nap) energiaforrásból származó energiahullámokat, valamint a tereptárgy és földfelszín saját maga által kibocsátott energiáját is. Az, hogy ezen energiák mely hullámhossztartománya van rögzítve, az a távérzékelési eszköz fajtájától függ. [1, 2, 3]

2.2 A távérzékelés típusai energiaforrások alapján

Két típust különböztetünk meg az adatgyűjtés módjának figyelembevételkor a távérzékelésben, az aktív és a passzív távérzékelést.

2.2.1 Passzív távérzékelés

Passzív távérzékelésről akkor beszélhetünk, ha a műholdra felszerelt szenzorok olyan elektromágneses jeleket fognak fel, amelyek természetes forrásból származnak pl.: a földfelszínre vagy vízfelszínre érkező, majd visszaverődő napsugarak fénye, élőlények, tereptárgyak által kibocsátott hősugarak (lásd: 2. ábra).

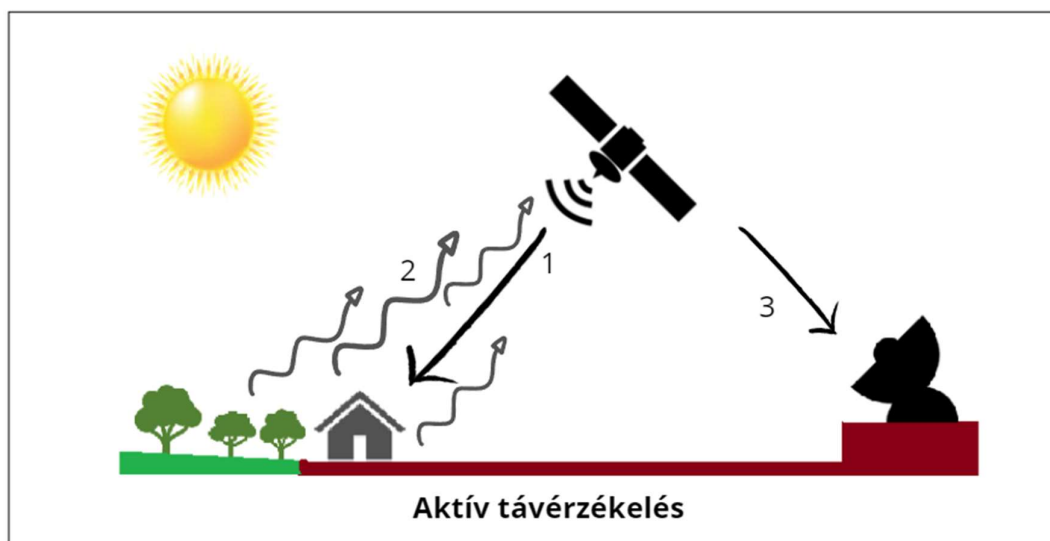


2. ábra: A passzív távérzékelés bemutatása [saját szerkesztés]

A passzív távérzékelés tehát nem igényel nagymértékű energia előállítását, mivel nincsen saját sugárforrása. Érdekesség, hogy fényszennyezés mérésekor is ezt az eljárást használják, ám ekkor a fényforrás mesterséges. [1, 4]

2.2.2 Aktív távérzékelés

A passzív távérzékeléssel ellentétben, az aktív távérzékeléskor a műholdon lévő jeladó bocsát ki sugárzást, ezáltal mesterséges forrás segíti a berendezés működését. A műholdra felszerelt adóberendezés a saját maga által kibocsátott jelek földfelszínről visszaverődött értékét rögzíti (lásd: 3. ábra). Ilyen elven működik például a radar is. Ennél a típusnál éjszaka, a természetes fény hiányában is készülnek kiértékelhető felvételek, működését a napszakok nem befolyásolják. Az aktív távérzékelés előnye még, hogy az időjárási viszonyok sem akadályozzák a zavartalan működését, továbbá a tényleges felszínt még akkor is pontosan meg lehet velük határozni, amikor a Föld felszínét erdő borítja, valamint pár cm-rel lejjebb a talajszinthez képest is tud adatokat szolgáltatni a hullámhossztartományából adódóan. A passzív távérzékeléssel ellentétben, itt nagy az energiafelhasználás az üzemelés ideje alatt. [1, 4]

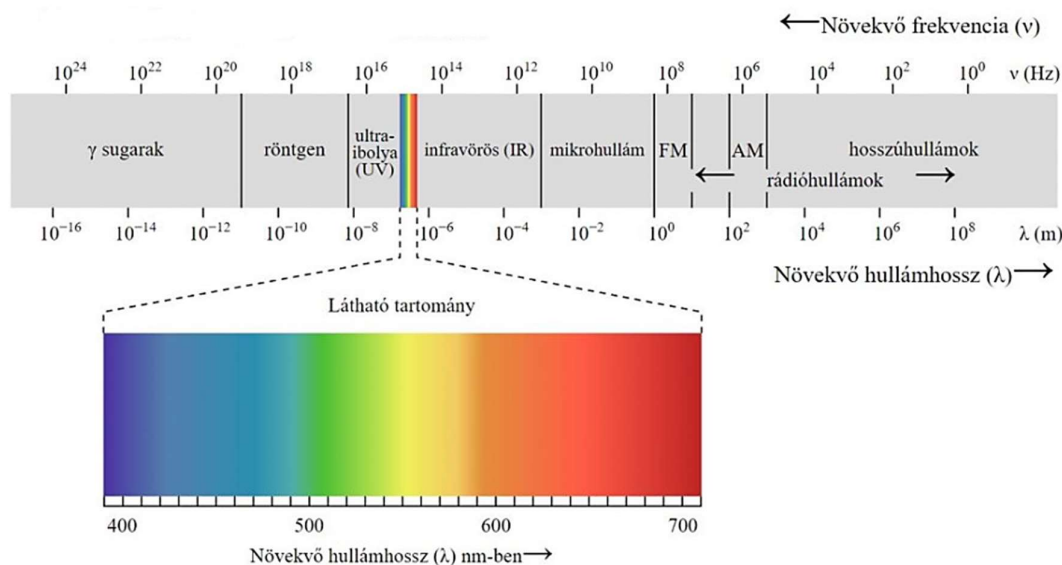


3. ábra: Az aktív távérzékelés bemutatása [saját szerkesztés]

2.3 Spektrális sávok

Az elektromágneses színekép (spektrum) az elektromágneses sugárzásnak a frekvencia és a hullámhossz szerinti megoszlása. Az elektromágneses hullámhossztartomány

spektrális sávokra került felosztásra, de a Föld légkörének az elektromágneses sugárzásra tett hatása miatt ezek közül nem mindegyiket képes a műholdra szerelt szenzor érzékelni. A távérzékelésben a műholdak számára nem érzékelhetők azok a spektrális tartományok, amelyekben a sugárzás energiája teljesen, vagy részlegesen elnyelődik.



4. ábra: Az elektromágneses hullámhossztartományok [6]

Az űrtávérzékelésben használt legjelentősebb hullámhossztartományok az alábbiak:

- látható tartomány (340 – 760 nm),
- infravörös tartomány (760 – 15 000 nm),
 - felosztása: közeli (760 – 1 500 nm), középső (1 500 – 5 500 nm), távoli (hő) (5 500 – 15 000 nm) infravörös tartomány,
- mikrohullámú tartomány (1 mm – 1 m-ig).

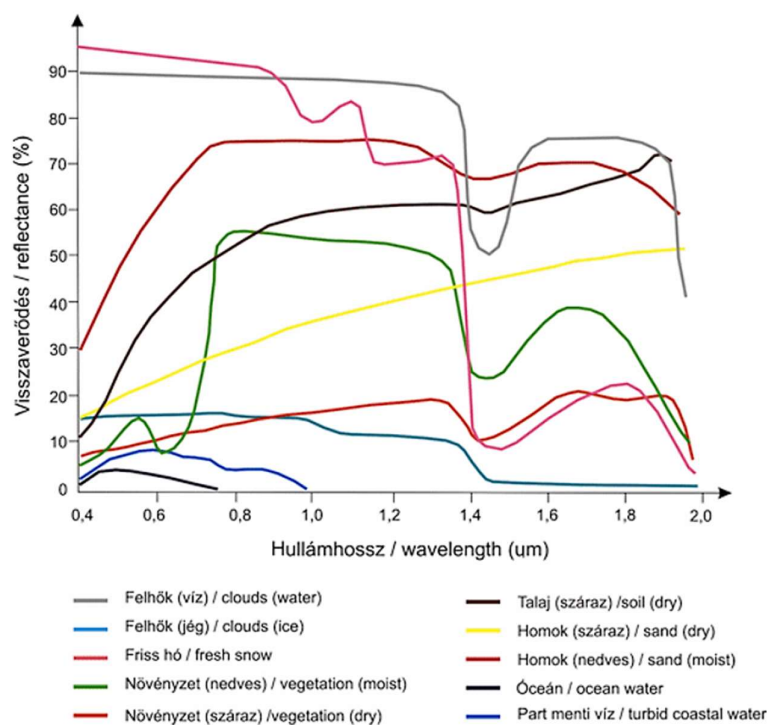
A műholdakon lévő szenzorok az emberi szem számára láthatatlan sugárzásokat is képesek érzékelni (lásd: 4. ábra). Számunkra észrevehetetlen, de a szenzorok észlelik a rövid spektrumú ultraibolyán túli tartományban (UV) az elektromágneses sugárzást, amely a légkör monitorozása kapcsán fontos. A közeli (NIR) és középső (MIR) infravörös tartomány a vízfelületek, víztartalom, illetve fotoszintetikus aktivitás megállapítása miatt, a távoli infravörös tartomány pedig a hőtérképek előállítására miatt jelentős. Az előbb említett űrtávérzékelésben használt hullámhossztartományokat, összefoglalóan optikai

tartományak is hívjuk, melyben optikai szenzorok dolgoznak leginkább. Feladatuk megfigyelni a földfelszín változásait.

A mikrohullámú tartomány a másik jelentős hullámhossztartomány, amelyre elsősorban a radarműholdak szenzorai vannak érzékenyítve, nekik a légkör megfigyelés a feladatuk, képesek a felhőkön is átlátni, hiszen centiméteres spektrumba esik a hullámhosszuk. A minél pontosabb elemzés elvégzéséhez érdemes az optikai- és a radar felvételeket együttesen felhasználnunk. [4, 6, 8]

2.4 Reflektancia

Az elektromágneses sugárzás elnyelődhet, szétszóródhat és visszaverődhet az atmoszféra alkotórészein, ekkor tudjuk észlelni az előző alfejezetben említett hullámhossztartományokban. Az elektromágneses sugarak visszaverődésének (reflektancia) mértékét befolyásolja a tereptárgyak és a földfelszín típusa (közetek, növényzet, talaj), illetve a növények és talajok víztartalma is (lásd: 5. ábra).



5. ábra: Felszínborítások reflektancia értéke különböző hullámhossztartományokban [4]

Ahogy az ábrán is látható, a különböző felszínborítások az eltérő hullámhossztartományokban más visszaverődési értékkel rendelkeznek, ennek

köszönhetően tudjuk a műhold által készített felvételeken beazonosítani a felszínborítás típusát. [4, 6 8]

2.5 Műholdképek felbontása

A műholdfelvételek készítésekor a műholdakra szerelt és a felvételt elállító szenzorok határozzák meg a képek spektrális és térbeli felbontását. Ebben a fejezetben az említett felbontási típusok mellett, az időbeli felbontást mutatom be.

2.5.1 Térbeli felbontás

A térbeli felbontás a legkisebb megjelenített területnek a nagyságát jelenti, ami az elemi földi pixel (négyzet alakú képpont) mérete. A műholdon lévő szenzoroknak annál több adatot kell feldolgozniuk, minél kisebb a pixelméret (lásd: 1. sz. melléklet). A kisebbre állított képelem nagysága egy jobb felbontású, részletesebb felvételt tud eredményezni. Ennek mérete általában *méter*méter*-ben van megadva, vagyis ekkora területet fed le egy pixel a Föld felszínén. [4, 6, 7]

2.5.2 Spektrális felbontás

A spektrális felbontás megadja, hogy mekkora a műholdas felvevők által észlelt elektromágneses hullámhossztartomány: hány sávot (hullámhossztartomány) képesek érzékelni és azoknak mekkora a szélessége. Kisebb sáv szélesség esetén megnő a spektrális felbontás nagysága és egyszerre több spektrális sáv használata lehetséges. Minél keskenyebb a hullámhossztartomány, annál jobb az adott csatorna spektrális felbontása. Ezért ahhoz, hogy az adott munkához a legmegfelelőbb felvételt tudjuk kiválasztani ajánlott a megfigyelt pl.: földfelszín spektrális paramétereit összehasonlítani a szenzorok sávjaival. [4, 6, 7]

2.5.3 Időbeli felbontás

Az időbeli felbontás azt az idő értéket adja meg, amely ugyanannak a földrajzi helynek a műhold által készített két felvétele között eltelik, vagyis ez a műhold visszatérésének gyakorisága. Azok a műholdak, amelyek nem aznap, hanem pl.: 16 nap után térnek vissza az adott földrajzi hely felé, a felvételeiken a mozgásvizsgálat eredménye sokkal szembe tűnőbb lesz. Így működik például a Landsat műhold is. A meteorológiai jelenségek

megfigyelésére azonban inkább azok a műholdak használatosak, amelyeknek a visszatérési ideje minél rövidebb, hiszen ezek a jelenségek hamar lejátszódnak. [4, 6, 7]

2.6 Képsávok száma alapján

Az alkalmazott képsávok, vagyis hullámhossztartományok szélessége és száma szerint 3 csoport ismert, ezeknek a rövid bemutatása következik.

2.6.1 Monokromatikus

Monokromatikus, más néven pánkromatikus jelzõt azokra a felvételekre használunk, amelyek egy spektrális sávban készülnek, színük szürkeárnyalatos (monokróm ábrázolás). Az így készült felvételek térbeli felbontása megfelelő, de a felszín többi jellemzőiről nem nyújt tájékoztatást. Egy pixelnek csak egy értéke lehet ebben az esetben. [4, 6]

2.6.2 Multispektrális

A multispektrális, azaz több csatornás felvételeket rögzítő adatgyűjtő rendszerek az optikai tartományban tevékenykednek. Egy időpontban, a spektrum több sávjában készítenek felvételt az adott földfelszínről. Itt egy pixelhez több intenzitási érték tartozik. A monokromatikus képekkel ellentétben, a multispektrális felvételek bőséges információt nyújtanak az adott terület felszínborításának tulajdonságairól (pl.: növényzet víztartalma, mennyisége stb.) [4, 5, 6, 7]

2.6.3 Hiperspektrális

A hiperspektrális felvételeket azok a szenzorok készítik, amelyek egyszerre több mint 20, keskeny hullámhossztartományban képesek mintavételezni a vizsgált területet. Ebben az esetben egy pixelhez akár száz érték is tartozhat. Ezek a felvételek kis térbeli felbontásúak. Ilyen elven működnek a hőszensorok is, melyek a távoli infravörös hullámhossztartományban dolgoznak. Ezeknek a szenzoroknak a segítségével nagyon pontos adatokat kaphatunk a kőzetek ásványi, míg a földfelszín jelenségeinek kémiai és fizikai jellemzőiről. [4, 5, 6, 7]

3. FÖLDMEGFIGYELÉSI PROGRAM BEMUTATÁSA

3.1 Kopernikusz program

A Kopernikusz program bemutatásához vissza kell nyúlnunk egészen 1998-ig, ahhoz a bizonyos „bavenói nyilatkozat” -hoz, melyet olyan intézmények írtak alá, akik vállalták az európai űrtechnológia továbbfejlesztését.

Ebből fejlődött ki 2010-ben – változatlan célkitűzéssel - a GMES (angolul: Global Monitoring for Environment and Security), azaz Globális környezetvédelmi és biztonsági megfigyelés, melyet az Európai Unió irányított.

2014-ben az Európai Unió Tanácsa és az Európai Parlament a GMES helyére létrehozta a Kopernikusz programot, ami a mai napig hozzájárul az európai térben működő GEOSS-hoz, vagyis a Globális földmegfigyelő rendszerek egységéhez. A Kopernikusz program egy olyan Föld-megfigyelési program, ami műholdas és helyszíni megfigyelésen alapuló információs szolgáltatásokat nyújt az embereknek, működését az Európai Bizottság szabályozza. A programon belül az Európai Űrügynökség (ESA), az Európai Környezetvédelmi Ügynökség és a tagállamok is folyamatosan részt vesznek a további fejlesztésekben.

A Sentinel műholdcsalád, helyi állomások és támogató programok (már korábban üzembe helyezett nyilvános és kereskedelmi műholdak) segítik céljainak elérésében a Kopernikusz programot. 2014-ben lőtték fel - a program keretein belül - az első műholdat, a Sentinel-1A-t, de azóta már további 7 műhold is Föld körüli pályára került (a műholdak rövid bemutatása a 3.2. fejezetben olvasható.) Az első Sentinel műhold fellövésével elindult az a projekt, miszerint további 20 műholdat szeretnének 2030-ra üzembe helyezni. A Kopernikusz szolgáltatásai a felhasználóknak rengeteg ingyenesen hozzáférhető adatot nyújt többek között szárazföldi-, tengerikörnyezet, légköri-monitoring, természeti katasztrófa megelőzés, éghajlatváltozás kapcsán. A Kopernikusz hozzáadott értékkel rendelkező információkat bocsát a felhasználók rendelkezésére. A műholdak által készített felvételekből térképek készülnek, ahol azonosítják az anomáliákat majd statisztikákat állítanak elő. Továbbá lehetőség van általa a régi és friss adatok összevetésére, azokból a következtetések levonására. [13, 14, 17]

3.2 Sentinel műholdcsalád

A Sentinel műholdak azok, amelyeket a Kopernikusz program keretében az ESA (Európai Űrügynökség) hozott létre és helyezett üzembe. Ebben a fejezetben az idetartozó műholdakat mutatom be.

- Sentinel-1 műholdak

A Sentinel-1A-t 2014-ben, míg a Sentinel-1B-t 2016-ban helyezték üzembe. A műholdak 693 km magasságban, azonos pályán keringenek a Föld körül és időjárástól függetlenül, a nap 24 órájában radarfelvételeket szolgáltatnak a felhasználók számára, ami a műholdra szerelt szintetikus apertúrájú radarnak köszönhető. Egy megfigyelt terület felett a Sentinel-1 műholdnak a visszatérési ideje 12 nap, de azáltal, hogy egymással szemben haladnak a Föld körül, így csak 6 nap van a fel- és leszálló pályáról történő mintavételezések között.

A Sentinel-1 műholdak szolgáltatásai többek között a jéghegyek, tengeri jég, szárazföld monitorozása, továbbá az olajszennyezés, földdeformáció, erdőirtás mértékének megfigyelése, valamint segíti a természetvédelmi katasztrófák megelőzését is.

Mindez így működött egészen 2021 decemberéig, amikor is a Sentinel-1B műhold C-SAR antennatápegységében keletkezett egy javíthatatlan hiba. A Sentinel-1B küldetése véget ért, szerepét a Sentinel-1C műhold fogja átvenni előreláthatólag 2023 tavaszán. [13, 16, 20, 21]

- Sentinel-2 műholdak

A Sentinel-2A 2015-ben, míg a Sentinel-2B-t 2017-ben lötték fel. Ők összesen 13 spektrális sávban, a látható fény és a közeli infravörös hullámhossztartományban képesek felvételeket készíteni. Egy műhold visszatérési ideje 10 nap. Segítségükkel nagy felbontású felvételeket kaphatunk a felszínen végbemenő változásokról például vegetációról, belvízi utakról, víz- és talajborításokról. [13, 22]

- Sentinel-3 műholdak

A Sentinel-3A 2016-ban, míg a Sentinel-3B-t 2018-ban helyezték pályájukra. Az ESA mellett az EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) felelős a műholdak megfelelő működéséért.

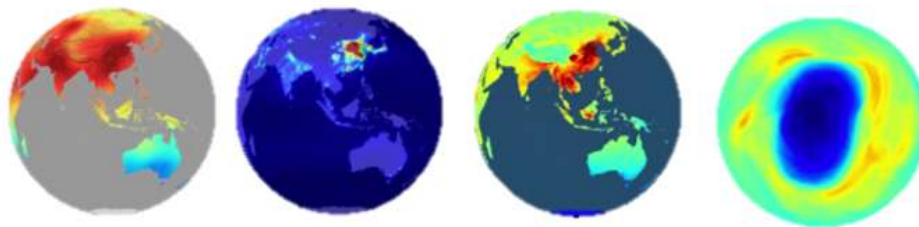
A Sentinel-3 küldetésének elsődleges célja a tengerek és óceánok vízszintjének megfigyelése, valamint a hőmérséklet meghatározása a szárazföld, óceánok és tengerek felszínének. [13, 22]

- Sentinel-4 műholdak

Ez a műhold még nem üzemel, de fellövését követően feladata a jelentősebb légköri nyomgázok (szén-dioxid, metán stb.) és aeroszolok megfigyelése lesz a levegő minőségének megállapításához. A klímaváltozás folyamataiban is hasznos lesz a működése. Várhatóan 2023-ban kerül fellövésre. [13, 22]

- Sentinel-5 és Sentinel-5P műhold

A Sentinel-5P műholdat 2017-ben helyezték üzembe, míg a Sentinel-5 műhold üzembe helyezése várat magára. A Sentinel-5P nevében szereplő „P” betű, angolul a „Precursor”-t jelöli, vagyis előfutára a közeljövőben fellövésre kerülő Sentinel-5 műholdnak. Küldetése az atmoszféra összetételének, levegő szennyezés mértékének vizsgálata. A 6. ábrán balról jobbra haladva a következők megjelenítése látható a Föld legkörében: metán, nitrogén-dioxid, szén-monoxid és ózon. Ahogy az utolsó felvételen is látszódik, ennek a műholdnak a segítségével tudjuk az ózonlyuk méretének változását is megfigyelni. [13, 22, 24]



6. ábra: Sentinel-5P műhold begyűjtött adatainak terméke [24]

- Sentinel-6 műhold

A Sentinel-6 műholdat 2020-ban lőtték fel, ez a legújabb tagja a Sentinel családnak. Küldetésének célja nagy pontossággal adatot szolgáltatni a tenger-, és óceánfelszínnek magasságáról, hullámmagasságról és szélerősségről, melyet elsősorban az éghajlatkutatók használnak fel. Várhatóan 2025-ben fogják a párját, a Sentinel-6B-t üzembe helyezni. [13, 22, 23]

4. MI AZ INSAR TECHNOLÓGIA?

Az InSAR rövidítés jelentése szintetikus apertúrájú műholdradar-interferometria, angolul Interferometric Synthetic Aperture Radar.

A tudományos és gyakorlati életben a távérzékelés szerepe egyfolytában növekszik, az élet több területén (precíziós mezőgazdaság, meteorológia, tengeri hajózás, természeti katasztrófa stb.) veszik igénybe a műholdfelvételeket és az abból eredő adatokat.

Az InSAR technológiának Magyarországon történő bevezetését a Kozmikus Geodéziai Observatórium (KGO) szakemberei kezdeményezték 2000-ben, amikor a KGO a Földmérési és Távérzékelési Intézet (FÖMI) része volt. Magát a kezdeményezést az ESA, (Európai Űrügynökség) programján belül lehetett tenni. A technológiának a fejlesztése folyamatos, használata egyre szélesebb körben figyelhető meg. [7, 9,10]

4.1 Interferometria alapelvek

A „radar” betűszó a Radio Detection And Ranging kifejezésből képződött, ennek jelentése rádióérzékelés és távmérés. A műholdas SAR technológiáról akkor beszélhetünk, ha a műholdon szintetizált apertúrájú képalkotó radar (SAR) funkcionál adatgyűjtő rendszerként.

A 2.2 fejezetben bemutatásra került a passzív és az aktív távérzékelés, és annak működési elve. A műholdradarral folytatott távérzékelés az aktív távérzékelés kategóriába esik, ugyanis a műholdra szerelt antenna sugároz elektromágneses jelet magából és a műhold felvevője a tereptárgyak / földfelszín által késleltetetten visszavert energiát érzékeli, rögzíti. [9,10]

4.1.1 Bázisvonal

Az InSAR működése két módszert követhet: az időbeli bázisvonalat, amelyben a felvételek készülte között eltelt idő a jelentős tényező, valamint a térbeli bázisvonalat, ahol a műholdak és a földfelszín távolsága a hangsúlyos.

Az időbeli bázisvonal esetén a vizsgált területet mindig ugyanonnan a helyről, de eltérő időpontokban mintavételezik. Ennek a felvételkedészítés módnak a célja a felszín térbeli változásainak a feltérképezése a két felvételi időpont között. Űreszköze és repülőre szerelt radarral is elvégezhető a felvételkedészítés.

Két műholddal, eltérő műholdpályákról, de azonos időpontban felvételezzük a térbeli bázisvonal esetén a megfigyelt földfelszínt. Mivel a felvételek ugyanabban a pillanatban készülnek, így ebben az esetben az időbeli bázisvonal nulla. A felszín topográfiai jellemzőit a függőleges vetületből kapjuk meg, mely a szenzor által kibocsátott elektromágneses sugár visszaérkezés különbségének mérési eredménye.

A vizsgált felszín deformációjának mértékét és topográfiai jellemzőinek változását a kevert bázisvonalak használata esetén tudjuk kivitelezni. Ez úgy jön létre, hogy a fel- és leszálló pályákon mozgó műholdak azonos időközönként térnek vissza az adott terület felé felvételkészítés céljából. [16, 18]

4.1.2 Az InSAR technológia működése

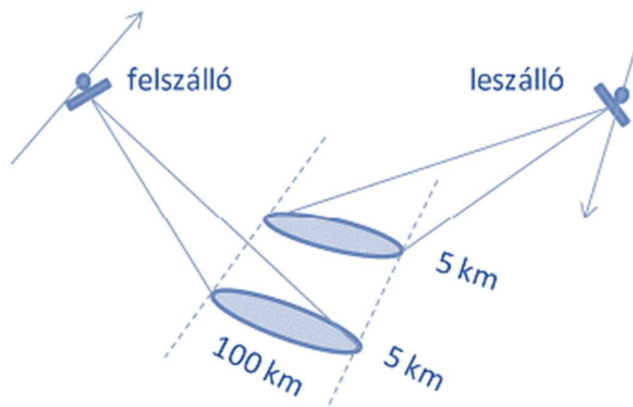
Az InSAR technológiát a távérzékelésen túl a geofizikában és az ürgeodéziában is használják, ez a SAR felvételeinek fázisadatait figyeli meg. Ezt az információ az elektromágneses spektrum 10^9 - 10^{11} Hz sávjában kibocsátott radarhullámok segítségével állítható elő. 1-től 100 méterig terjedő térbeli felbontásra képes a SAR szenzor, de ez a szenzor típusától és a felvételezési módtól is függ. Az apertúra (radarantenna nagysága) szintézisnek köszönhető az ekkora mértékű térbeli felbontás.

A radarfelvételek fázistartalmát használjuk fel az interferometrikus feldolgozás során ahhoz, hogy műholddal készített két vagy több felvétel összetartozó pontjainak relatív fáziskülönbségét tudjuk megadni. Az így kapott ún. interferogramból lehet igen nagy pontossággal (akár pár cm-től 0,1 mm-ig) kiszámítani a műhold és a földfelszín közötti felszín deformáció (ún. LoS – Line of Sight) mozgásának sebességét és nagyságát. Ehhez a típusú feldolgozáshoz olykor elegendő a természetes és mesterségesen környezet elemeire alapozni, nem szükséges minden esetben pontjeleket alkotni, ezáltal lehetőség van bizonyos spektrális sávokon egészen 1992-ig visszamenőleg megismerni az adott földfelszín mozgásának előzményeit, annak alakulását. [9, 8, 11, 12, 17]

A SAR technológiát a következőkben a Sentinel-1A SAR műhold paramétereinek segítségével mutatom be, mivel ennek tulajdonságai és működése hasonló az Európai Űrügynökségnek már nem üzemelő műholdjaival pl.: ENVISAT.

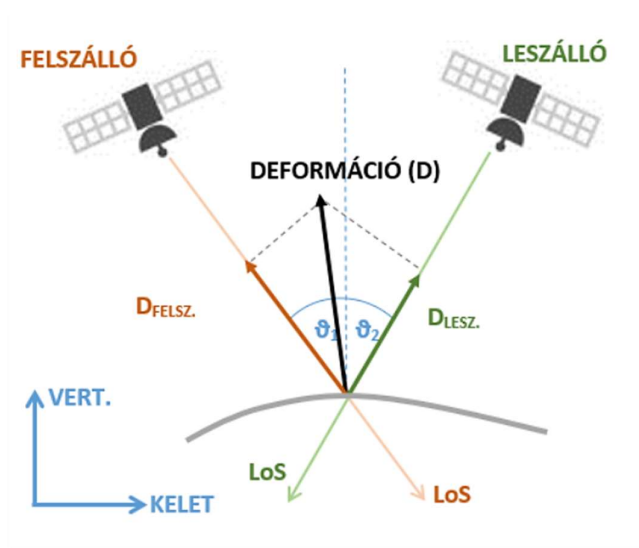
10 méter * 1 méter az átlagos nagysága a műholdakon található antennának. Ez az antenna elektromágneses jelet sugároz (megvilágítja) a földfelszín közel ellipszis alakú,

100 km $\times$ 5 km nagyságú területére (lásd: 7. ábra), ekkora kiterjedésben képes egyszerre információt gyűjteni. Az antenna a földfelszínt ferdén világítja meg, a nadírhoz képest körülbelül 20-23 fokban. [9, 8, 11, 12, 17]



7. ábra: A megvilágított terület a felszálló és leszálló pályákon mozgó műholdak által a megfigyelési sávban [9]

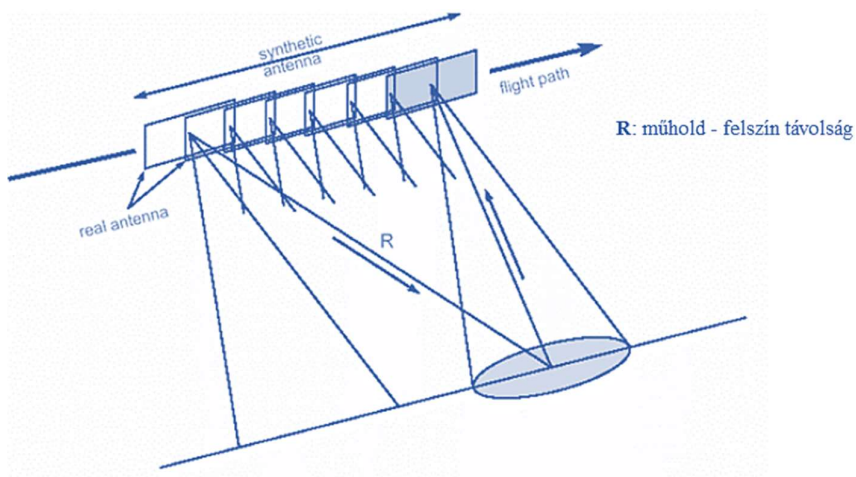
A felszálló és leszálló műholdpályákon lévő szatellitok a felvételeket a megfigyelt területről eltérő „irányokból” készítik el (lásd: 8. ábra). A felszálló ágon 44 fokban, míg a leszálló pályán 316 fok azimutban (ellentétes oldalról) sugározza a műhold antennája az elektromágneses jelet a földfelszínre. A megvilágítás foka eltérhet a földrajzi szélesség változásával. A felszín deformációk a két különböző műholdgeometriájú felvételnek köszönhetően horizontális, illetve vertikális komponensre is felbontható. [9, 8, 11, 12, 17]



8. ábra: A valódi deformációnak (D) a műhold irányú deformációk a felvételi helyzetből adódóan más-más vetületét mutatják meg [17]

A Sentinel-1A műhold esetében a visszatérési időintervallum 12 nap egy műholdpályát tekintve, a monitorozott földfelszín részletre vonatkozóan a fel-és leszálló műholdpályákról készült felvételek között 6 nap telik el.

Ahogy már említésre került, a műholdak az elektromágneses sugárzás kibocsátása közben a fel- és leszálló műholdpályákon haladnak. A távolság megnövekedése a vizsgált felszín és a műhold között a felvételek felbontásának romlását eredményezi, az antennával történő egyszeri megvilágítása a vizsgált területnek nem ad jelentős visszaverődési értéket. Azonban, ha a haladás mentén a műhold felvevője egyfolytában egyesíti, integrálja a felszínről/tereptárgyokról visszaverődő jeleket ¹, akkor az antenna hossza megnövelhető (lásd: 9. ábra). Az antennának tehát a műhold mozgásával szimulálják a megnagyobbítását. Ebben az eljárásban a szintetikus apertúrájú (SAR) radar megtöbbszörözi a visszaverődött jel intenzitásának értékét, így jobb felbontású felvételt kapunk. Ez a felbontás 5 méteres azimut irányban (lásd: 10. ábra). [9, 8, 11, 12, 16, 17, 18]

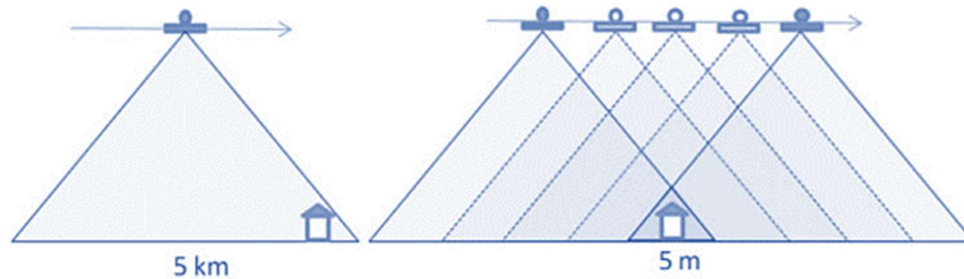


9. ábra: SAR radar: az antenna méretének megnövekedését a hordozó mozgásának segítségével szimulálják [18]

Ezek a visszaverődött jelek oszlopokból és sorokból álló pixel hálózatot alkotnak, amelyben a pixelek egy-egy komplex számot jelölnek. Ezt a komplexitást a visszavert jelek fázisszöge, intenzitása és amplitúdója adja. Az interferometrikus feldolgozási eljárásban a fázisszög a használt mennyiségi érték, míg a radar felvételek esetén az

¹ Ezt az eljárást Fraunhofer diffrakciónak nevezik.

intenzitás adja meg ezt. Az intenzitási értéket több tényező befolyásolhatja pl.: mintavételezett felület anyaga, érdessége, növényzet és talaj víztartalma stb.



10. ábra: A műholdnak a megfigyelt sávban történő mozgásakor folyamatosan rögzített jelek javítják a felvételek felbontását [9]

Az InSAR szoftverrel történő feldolgozás végtermékeként megkapjuk az SLC-t, vagyis a Single Look Complex-et, ami egy 100 km * 100 km nagyságú négyszög alakú felvétel. A felvétel mérete, valamint annak felbontása műholdtípusonként és feldolgozási módonként változhat. Interferometrikus feldolgozásban a Sentinel - 1A műhold által készített felvétel mérete 250 km * 250 km, amelynek 5 m * 20 m-es a felbontása. [9, 8, 11, 12, 16, 17, 18]

5. UAV TECHNOLÓGIA A LÉGI TÁVÉRZÉKELESBEN

Szakedolgozatomban az InSAR technológia mellett az UAV technológia segítségével is meghatározom a kutatásomban vizsgált hulladéklerakó térfogatát. Ehhez most szeretném az UAV technológiához kapcsolódó jelentősebb információkat bemutatni.

5.1 Az UAV fogalma

A légi távérzékelés kapcsán leggyakrabban az alábbi rövidítésekkel találkozhatunk, melyeknek jelentése némileg eltér egymástól:

- UAV: pilóta nélküli légi jármű
- UAS: pilóta nélküli légi rendszer (földi állomás és egyéb kiegészítő berendezések is beleértendő)
- RPAS: távirányítású repülőgépes rendszer

Az UAV, (angolul: *unmanned aerial vehicle*), vagyis a pilóta nélküli légi jármű olyan légi távérzékelésben használt eszköz, amely képes a földről irányítva különböző technológiák segítségével felvételezni a vizsgált területet, így a fedélzetén nem kell embernek tartózkodnia. Helikopterek, léghajók, merevszárnyú repülőgépek (lásd.: 11. ábra), drónok stb. is ebbe a kategóriába tartoznak. [25, 26]



11. ábra: Légi felvételezés merevszárnyú repülőgépre szerelt kamerával [29]

Csoportosíthatjuk őket az irányításuk alapján is:

- Programozható légi jármű (*autonomous UAV*): olyan légi jármű, mely alkalmas egy előre megírt és beállított program végrehajtására. Ekkor a beprogramozott repülési nyomvonalat automatikusan repüli le, manuális beavatkozás nélkül. Ezeken az eszközökön (pl.: drón) különböző berendezések vannak üzembe helyezve, például mérőműszer, fényképezőgép stb.
- Manuálisan távirányított légi jármű (*radio controlled, remote piloted aircraft systems*): olyan légi távérzékelésben használatos eszköz, melyet kezelője manuálisan irányít, köztük a kapcsolat vezeték nélküli. [25]

5.2 Drón működése és felhasználási területei

A drón még mindig napjaink úttörő találmányának számít, pedig már több, mint 20 éve gyártották a prototípust. Az elmúlt évtizedben világszerte jelentősen megnőtt a népszerűségük, egyre több területen használják őket. A drónok adatrögzítésre való használata rengeteg előnnyel jár. Bizonyos munkák, például nyitott bánya belsejének feltérképezése, egyes építmények térfogatának meghatározásakor is segítséget nyújt a drón használata, hiszen ekkor nem kell az embereknek veszélyes, magasan lévő helyekre felmászniuk, a drón elvégzi a munka egy részét helyettük azáltal, hogy velük távolról is fel lehet mérni a környezetet. [26, 27]

A drónok a bennük található GPS-modul segítségével képesek beazonosítani helyzetüket a Föld körül pályájukon haladó műholdak hálózatához képest. A drónok miután észlelték a műholdak jeleit, képesek a pozíciójuk megtartására, az autonóm repülésre és a kiinduló pozícióba való hazatérésre is a küldetés nyomvonalának lerepülése után. A katonai, kereskedelmi és fogyasztói típusú UAV drónokra olyan modern technológiákat szerelnek, mint például a lézer, infravörös kamerák, GPS. A drónt GSC, vagyis földi helyzetű távvezérlőrendszeren keresztül lehet koordinálni. [27, 28]

Alább felsoroltam pár olyan tevékenységet/munkát, amelyeket drón segítségével tudnak az emberek elvégezni:

- filmkészítésben légi felvételek készítése,
- logisztika területén: termékek, csomagok kiszállítása (lásd: 12. ábra),

- emberek számára nehezen megközelíthető vagy nagy kiterjedésű földrajzi területen az eltűnt emberek hatékony keresése a drónokra szerelt hőérzékelő kamerák segítségével,
- természeti katasztrófa után az érintett terület feltérképezése információszerzés céljából,
- állatkolóniák mozgásának megfigyelése,
- mezőgazdaságban az ültetvénytípus ellenőrzése, terménybecslés stb.,
- határvédelemben a határőröknek nyújt segítséget,
- közúti forgalom megfigyelése a rendőrség által. [26]

5.3 Drónnal való repülés tervezése

Az előre megtervezett, drónnal történő repüléseket felelősségteljesen szükséges előkészíteni, hiszen több szempontot is figyelembe kell venni a repülés tervezésekor.

A repülési tervben meg kell határozni a fel- és leszállóhelyet, de esetleges vészhelyzet (pl.: kedvezőtlen időjárásváltozás) esetén érdemes megjelölni vészleszállási területet is. Abban az országban, ahol szeretnénk elvégezni a repülést, előre kell tájékozódni az ott érvényben lévő jogszabályokról a drónos repülést illetően. Magas és kiemelkedő objektumokat, domborzatot, növényzetet is érdemes figyelembe venni a tervezési fázisban, nehogy annak figyelmen kívül hagyása okozzon a repülés közben gondot, akár balesetet. Ha a drónra egyéb mérőberendezési eszköz, például mérőkamera vagy fényképezőgép van szerelve, akkor figyelembe kell venni annak a tömegét is. A tervezés elején már érdemes tisztában lenni a drón akkumulátorának nagyságával és ennek figyelembevételével kell a repülést megtervezni.

A kalkulációba tehát vegyük bele a drón energiaforrásának nagyságát, illetve az időjárási és terepi viszonyokat is. [25]



12. ábra: Amazon webáruházának csomagkézbesítő drónja [30]

6. A KUTATÁSI FELADAT BEMUTATÁSA

6.1 A feladat ismertetése

Szakedolgozatomban egy Hajdú-Bihar megyében található hulladéklerakó térfogatát számítom ki InSAR és UAV technológiával. Az előző fejezetekben a két technológiát és azokhoz szorosan kapcsolódó ismereteket mutattam be. Az elmélet után most rátérek a gyakorlati megvalósításra. Először kiértékelem az InSAR technológia felhasználásával kapott eredményeket, majd ezt követi az UAV technológia segítségével elért eredmények bemutatása. Az eredmények ismertetését követően összehasonlítom azokat, majd levonom a következtetéseket.

Kutatásom célja kideríteni azt, hogy melyik technológia alkalmasabb egy hulladékdeponia térfogatának pontosabb meghatározására.

6.2 Mérési időpontok

20/2006. (IV. 5.) KvVM rendelet a hulladékdeponiákkal kapcsolatos előírásokat tartalmazza. Ebben szerepel az a szabály, hogy a működő hulladéklerakók esetében legalább évente egyszer fel kell mérni a még rendelkezésre álló lerakókapacitást. [31]

A szakdolgozatomban vizsgált hulladéklerakó térfogatának változásait is évről-évre felméri egy mérnöki iroda. Az UAV technológiával történő helyszíni mérést a feladatra felkért mérnöki iroda munkatársai segítségével végeztem el 2022.10.18-án.

Az 1. táblázatban látható, hogy mely időpontokban volt az elmúlt 2 évben a hulladéklerakó lerepülése drón segítségével:

1. felmérés 2020.01.20.	2. felmérés 2020.07.15.	3. felmérés 2021.01.11.	4. felmérés 2021.10.15.
----------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------

1. táblázat: A vizsgált hulladéklerakó drónnal történő felmérésének időpontjai [saját szerkesztés]

Miután birtokomba kerültek a helyszíni felmérések időpontjai, elkezdtem a megfelelő műholdfelvételek letöltését.

7. ADATFELDOLGOZÁS INSAR TECHNOLOGIÁVAL

7.1 Előkészítés – SLC letöltése

A feladat kapcsán az InSAR technológiával történő feldolgozás első lépése az interferometrikus műholdfelvételek letöltése. Mivel adottak voltak azok az időpontok, amikor az UAV-s felvételek készültek, így azokhoz az időpontokhoz közeli radarfelvételeket kerestem az összehasonlíthatóság miatt.

A Sentinel-1 műholdfelvételeket a Copernicus Open Access Hub weboldalon keresztül töltöttem le, ahol ingyenes hozzá lehet férni a műholdfelvételek adatbázisához. A vizsgált területet a leszálló és felszálló ágról készült felvételek alapján is elemeztem a SNAP programban. [32, 34]

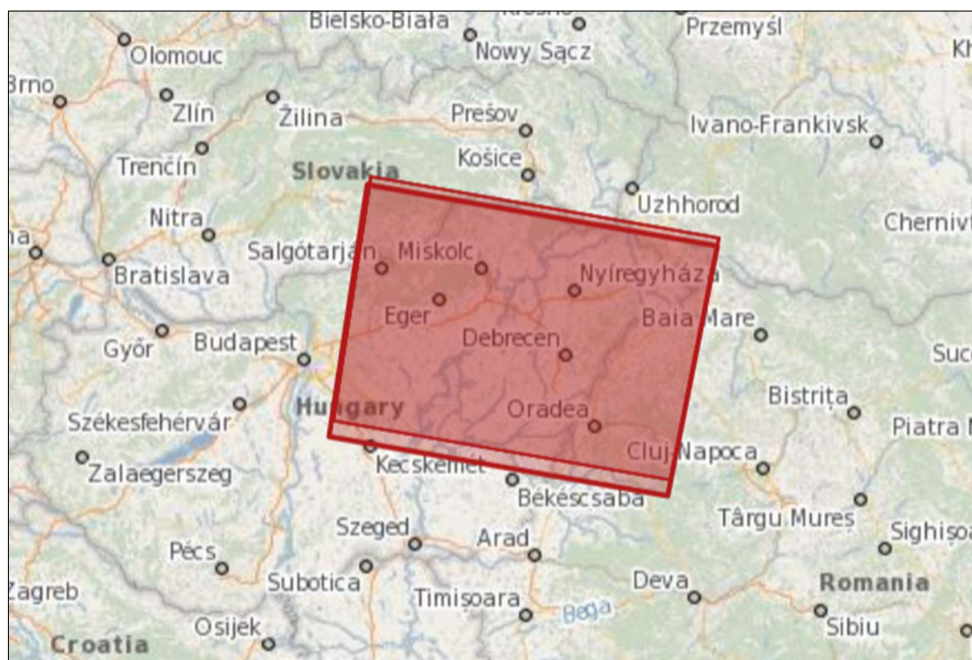
A megfelelő műholdfelvételek megtalálásához a beállított szűrési feltételek a képernyőképen láthatóak:

» Sort By:		» Order By:	
Ingestion Date		Descending	
» Sensing period			
2020/01/13		2020/01/27	
» Ingestion period			
Mission: Sentinel-1			
Satellite Platform		Product Type	
S1A_*		SLC	
Polarisation		Sensor Mode	
VV		IW	
Relative Orbit Number (from 1 to 175)			
153			

13. ábra: Keresési beállítások a Copernicus Open Access Hub weboldalon [32]

A képmetszeten (lásd: 13. ábra) az első drónnal történő helyszíni felmérés időpontjához közeli műholdfelvételekre szűrtem. A további kereséseknél egyedül az időintervallumot változtattam meg, a többin nem módosítottam.

A „relative orbit number”² minden esetben 153-ra lett állítva, mivel ezen a keringési körön és leszálló ágon készíti a műhold olyan felvételt, ami a vizsgált területet megfelelően lefedi. Ráadásul az azonos állású felvételeket lehet jól egymással összehasonlítani. A 14. ábrán látható az 5 kiválasztott műholdfelvétel helyzete, az alatta lévő táblázatban (lásd: 2. táblázat) pedig az drónos felmérési időpontokhoz rendelt műholdfelvételek készítési időpontjai. [32]



14. ábra: SLC radarfelvételek állása a 153-as relative orbit number esetén [32]

	1. felmérés	2. felmérés	3. felmérés	4. felmérés	5. felmérés
UAV	2020.01.20.	2020.07.15.	2021.01.11.	2021.10.15.	2022.10.18.
InSAR	2020.01.18.	2020.07.16.	2021.01.12.	2021.10.15.	2022.10.22.

2. táblázat: UAV és InSAR technológiával készített felvételek rögzítési időpontjai a vizsgált területről [saját szerkesztés]

² Relative orbit number: magyarul relatív pálya/keringésszám. A Sentinel-1 műhold a műholdpályáján a kiinduló helyzetétől 175 kört megy a Föld körül, míg vissza nem ér ugyanabba a pontba, ahonnan elindult. [33]

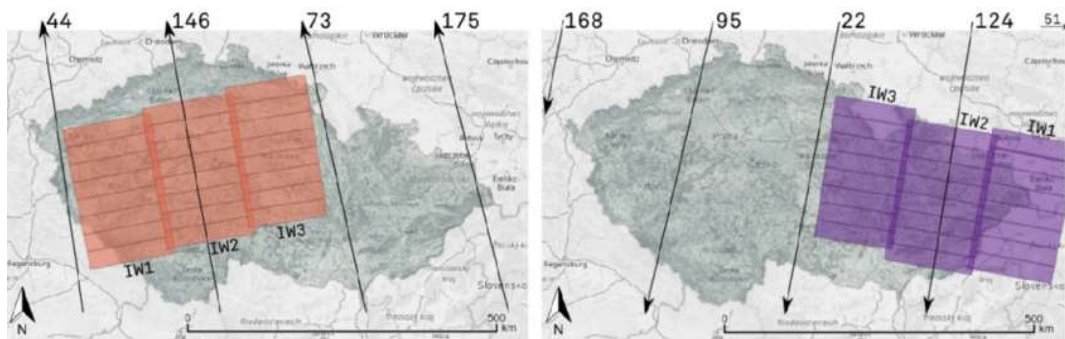
7.2 SNAP program - adatfeldolgozás

A műholdfelvételek feldolgozását és egymással történő összevetését a SNAP program segítségével tudtam kivitelezni. A SNAP (Sentinel Application Platform) egy mindenki számára elérhető oldal, ahol a Kopernikusz program keretében üzembe helyezett Sentinel-1, Sentinel-2 és Sentinel-3 műholdak radarképeit lehet letölteni a megadott paraméterek alapján.

7.2.1 Coregistration folyamata– fókuszban az IW2 alsáv

A SNAP programba betöltésre kerülő SLC radarképek nagy méretűek (átlagosan 4 GB), hiszen mindegyik pixel egy komplex magnitúdóértékkel rendelkezik, így ezekhez a felvételekhez már előre feldolgozott állapotukban juthatunk hozzájuk. [35]

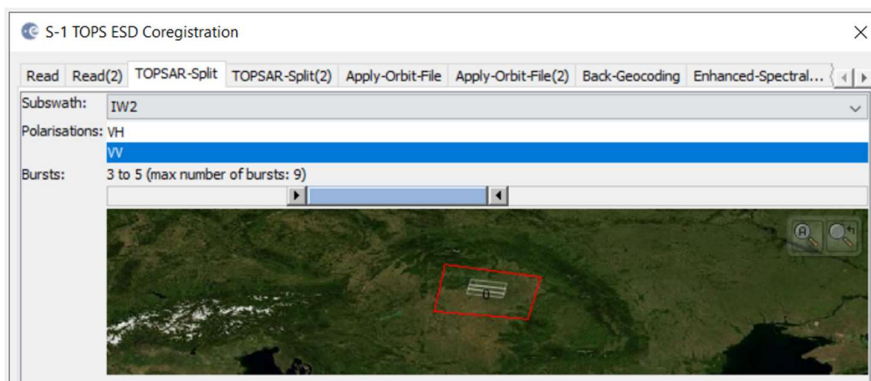
A műholdak által a területek felvételezése a TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scans SAR) technológia szerint történik. Három alsávot (IW1, IW2, IW3) különböztethetünk meg ezáltal a felvételeken. Ezekben a rövidítésekben az IW, angolul az Interferometric Wide-t jelenti. A 15. ábrán bal oldalon a felszálló, míg a jobb oldalon a leszálló ágról készült műholdfelvételeken látható az említett alsávok helyzete. Az egyes alsávok még további 9-9 egyforma méretű képre (Burst) oszlanak fel. [33, 35]



15. ábra: Az IW1, IW2, IW3 alsávok felosztása a műholdfelvételeken [36]

A hulladékdepónia területén végbement felszín deformáció mértékét a megfelelő fedést biztosító leszálló, majd felszálló ágon készült radarképekből igyekeztem meghatározni. Az adatfeldolgozást első lépésként betöltöttem a SNAP programba a legrégebbi (2020.01.18) és a legfrissebb (2022.10.22) radarfelvételt, melyet a Sentinel-1A műhold készített, leszálló ágon. A Coregistration alkalmával a szolga (slave) és a mester (master) radarkép kerül összeillesztésre, ezeket állítottam be az S-1 TOPS ESD Coregistration

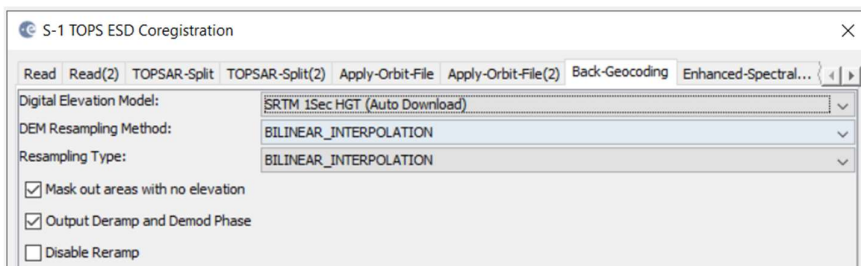
ablakon belül a Read és Read(2) fűlek alatt. Időben régebben készült képeket érdemes mester képnek beállítani. A Coregistration folyamat végén az affin transzformáció segítségével lesz a szolga kép pixelei a mester kép képpontjaihoz rendelve. [11, 12, 34]



16. ábra: A TOPSAR-Split fül beállítások a Coregistration ablak alatt [saját kép a SNAP programban]

A megfelelő alsáv (IW2) meghatározását követően a további sávok (3-tól 5-ig) kiszűrésével csökkentettem a vizsgálat céljából elemzésre szánt terület méretét (lásd: 16. ábra). A polarizáció típusának a VV-t, vagyis a vertikális-vertikális opciót jelöltem ki, mivel ezzel jobb eredményt kaphatunk a visszavert elektromágneses jelekre való érzékenység miatt. A TOPSAR-Split és a TOPSAR-Split(2) fül alatti beállításoknak meg kell egyeznie, hiszen ha a program eltérést észlelne, nem futna le a parancs a Coregistration folyamat végén.

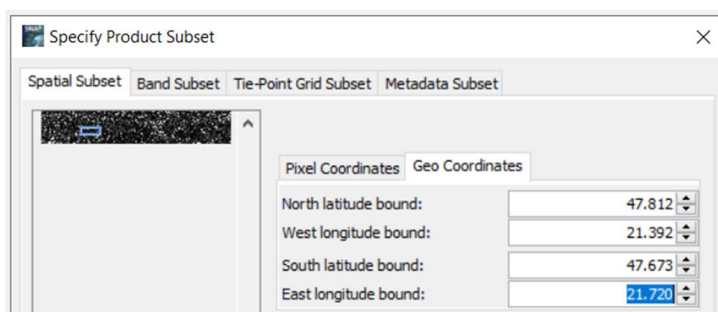
A következő fül a „Back-Geocoding” volt, ahol az eredeti beállításhoz képest módosítottam. Az SRTM 1sec HGT típusú domborzatmodellt választottam a jobb térbeli felbontás miatt (lásd: 17. ábra). Így 30 méteres terepi felbontással rendelkező digitális felszínmodellt kaptam. [8, 11, 12, 34]



17. ábra: A Back-Geocoding fül beállítása [saját kép a SNAP programban]

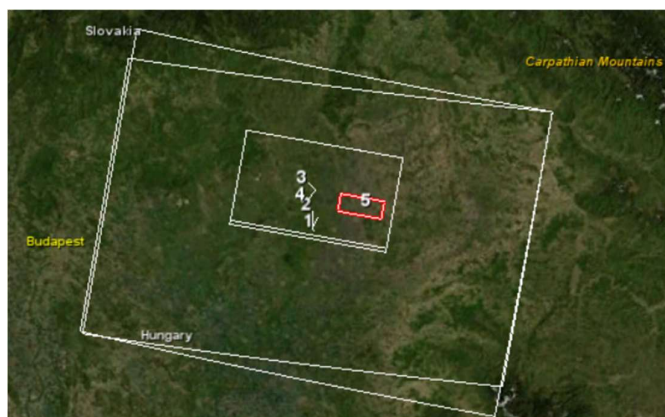
7.2.2 Specify product subset

A Coregistration parancs lefutása után, az „Interferogram Formation” beállítását követően a kapott kép két sávból állt össze. A „Deburst” beállítás segítségével a szemmel látható fekete csíkok eltűntek, vagyis a sávok összefonódtak. Az így kapott interferogram területét a „Subset” lehetőséggel tovább kicsinyítettem. Ehhez nem manuálisan jelöltem ki a területet, hanem a koordináták beírása alapján azt a program automatikusan kijelölte (lásd: 18. ábra). A koordinátákat a Google Earth programból írtam ki. [11, 12, 34]



18. ábra: A koordináták megadása a területkivághoz [saját kép a SNAP programban]

A 19. ábrán szerettem volna szemléltetni a megadott földrajzi koordináták alapján kijelölt területet: ez 5-ös számmal látható, pirossal bekeretezve. A Subset előnye, hogy kisebb területen végzett számításoknál egy-egy parancs gyorsabban lefut a SNAP programban.



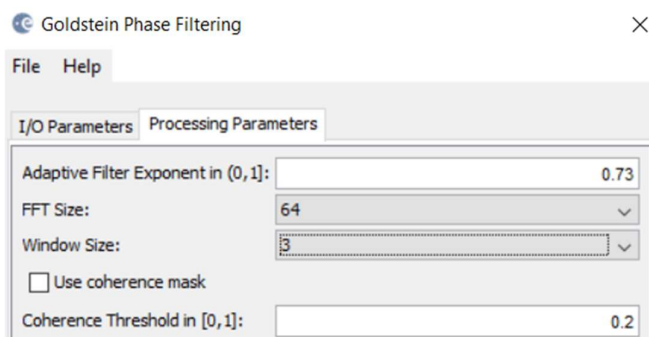
19. ábra: Földrajzi koordináták alapján kivágott terület [saját kép a SNAP programban]

A kivágnak köszönhetően egy 10,8 km * 26,45 km nagyságú területet kaptam. A következő lépésben erre a területre fogom alkalmazni a Goldstein fázisszűrést.

7.2.3 Goldstein fázisszűrő használata

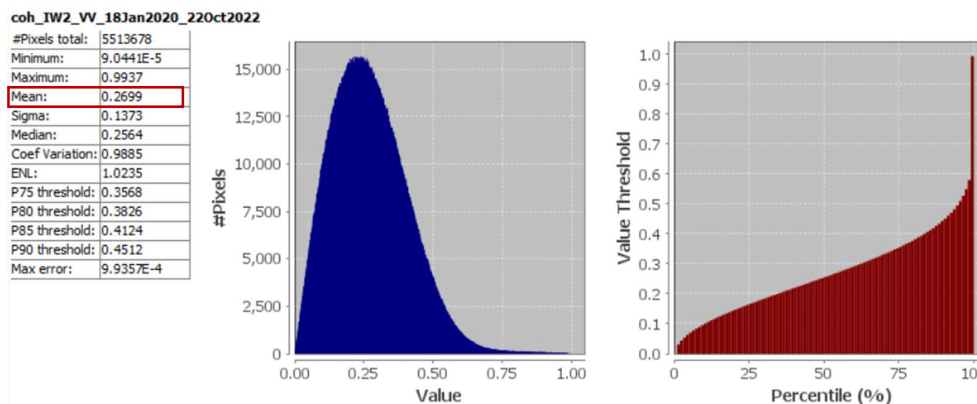
A digitális felvételek feldolgozásakor többféle szűrőt alkalmazhatunk például a felvétel zajszűrésére, élesítésére, fontosabb paramétereinek kiemelésére. A kivágat utáni felvételem zajos, ez fekete pontokként jelenik meg a képen. A zaj mértékének csökkentésében a Goldstein fázisszűrőt használtam. A szűrő paramétereit a zaj erősségének függvényében kell beállítani úgy, hogy minél jobb felvételt kapjunk.

A Golden Phase Filtering algoritmus beállításához 4 paramétert (Adaptive Filter Exponent, FFT Size, Window Size, Coherence Threshold) módosíthatunk (lásd: 20. ábra). [11, 12, 34]



20. ábra: A Goldstein-féle fázisszűrés beállítandó paramétereit [saját kép a SNAP programban]

Az adaptív szűrő exponens értékét, vagyis zajszűrés erősségét befolyásoló mutatószámot az $a = 1 - y$ egyenlet segítségével tudtam meghatározni. A képletbe az abszolút koherencia középértékét helyettesítettem be (y), ami a fázisszűrés előtti koherencia felvétel statisztikai mutatói (*Mean*) között szerepelt (lásd: 21. ábra). A behelyettesítéssel az a értéke kerekítve 0,73 lett. [8, 9, 11, 12, 34]



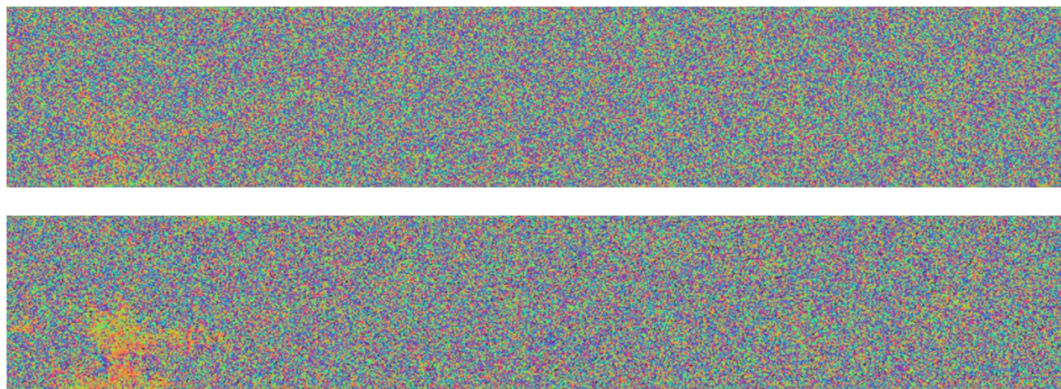
21. ábra: Az abszolút koherencia középérték [saját kép a SNAP programban]

Ezután az FFT (Fast Fourier Transformation) Size beállítása következett, ahol kiválasztottam, hogy az interferogramot az algoritmus mekkora pixelméretű egységekre bontsa fel. Ez a paraméter a felvétel jel-zaj arányának javítására szolgál. A következő értékeket veheti fel: 32, 64, 128, 256. Az első alkalommal 64-et állítottam be erre a tényezőre.

A Window Size értékei a következők lehetnek: 3, 5, 7. Ezek a számok azt jelölik, hogy a fázisértékek módosítását mekkora pixelméretű mozgó ablak készítse el az adott területen végighaladva.

Az utolsó beállítható paraméter a koherencia küszöbérték, de ahhoz, hogy az algoritmus ezt figyelembe vegye, előtte szükséges bepipálni a *Use coherence mask* opciót. Itt 0-1 közötti értéket írhatunk be. Ennek a beállításával a program nem jeleníti meg a beírt számtól kisebb értékekkel rendelkező szegmenseket. [8, 9, 11, 12, 33, 34]

A 22. ábrán látható eredményt a következő beállítás után kaptam: Adaptive Filter Exponent = 0.73, FFT Size = 64, Window Size = 3.



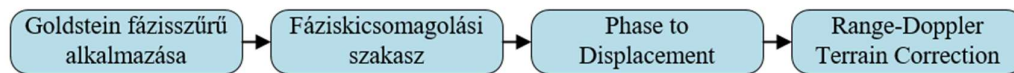
22. ábra: Goldstein szűrő használata előtti (fent) és utáni (lent) interferogram [saját kép a SNAP programban]

7.2.4 Fáziskicsomagolás és georeferálás

A Goldstein-féle fázisszűrő használata után a fáziskicsomagolás következik, melynek 3 lépése van: export, unwrapping, import. Ehhez előzetesen letöltöttem a SNAP programon belül a *Snaphu* szoftvercsomagot, amivel el tudom majd végezni a fázis kicsomagolását. A fázis kicsomagolás alatt azt értjük, amikor a szoftver a fázisértékeket szétszedi egész fázisértékekre azért, hogy ezen értékek segítségével tanulmányozhassuk a végbement

felszín deformációt. Meghatározásra kerül két egymás mellett lévő interferometrikus cella közötti fáziseltérés, amely a két cella közötti felszín deformáció mértékét mutatja meg.

Az Export lépésben a Goldstein fázisszűrés után kapott interferogramot hívtam be. Itt az átfedések (row & column overlap) értékét változtattam meg 0-ról 200-ra. Az Export lépés után a kicsomagolás következik, mely több időt igényel. Ezt követi az Import lépés, ahol a Goldstein fázisszűrés előtti interferogramot és a kicsomagoláskor létrejött képhez tartozó „*hdr*” formátumú UnwPhase elnevezésű fájlt kell behívni. Ekkor pillantható meg először a kicsomagolás utáni eredmény. Ezután már csak két lépés van hátra a végső interferogram eléréséhez (lásd: 23. ábra). [8, 9, 11, 12, 33, 34]



23. ábra: A többszörösen ismételt lépések a jobb eredményért [saját szerkesztés]

A további lépéseket a már kicsomagolt interferogramon szükséges végrehajtani. A Phase to Displacement funkcióval méter dimenzióba váltjuk át a fázisértékeket, ezáltal a kapott interferogram könnyebben értelmezhető, illetve csak ezután következhet a georeferálás. A Range-Doppler Terrain Correction funkcióval az ellipszoidi, ezt követően a vetületi illesztése történik meg a radar koordináta-rendszerben értelmezett pixeleknél. A transzformáció a WGS84 földrajzi koordináta rendszerben történik. [8, 9, 34]

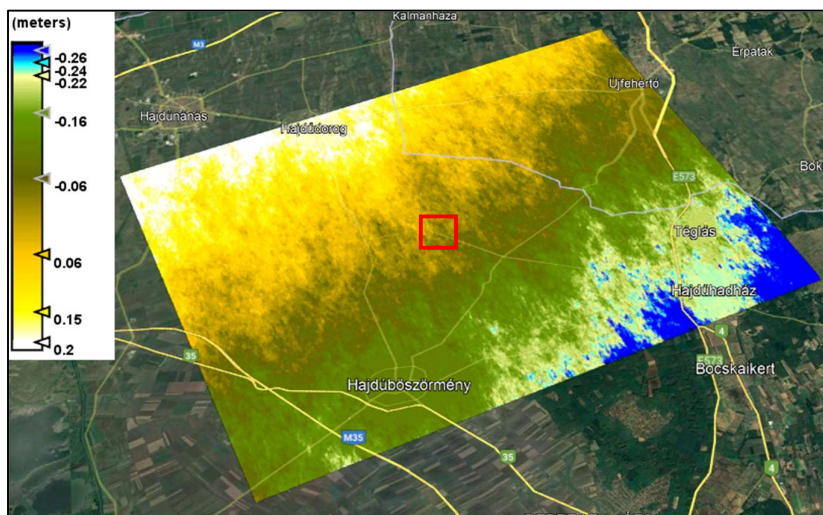
7.3 Térfogatszámításhoz felhasznált kép kiválasztása

A WGS84 koordináta rendszerbe transzformált képet a „*View as Google Earth KMZ*” opcióval exportáltam, így a térképen is megnézhettem a felszín deformálódás mértékét a vizsgált területen.

A Goldstein fázisszűrő paramétereinek beállításait variáltam annak érdekében, hogy a hulladékdepónia térfogatszámításához megfelelő képet kapjak. Több, mint 30 variációt próbáltam ki, majd jelenítettem meg a Google Earth Pro alkalmazásban. Ezek közül hármat szeretnék bemutatni, melyekhez a műholdfelvételek az első esetben a felszálló ágról, míg a további két esetben a leszálló ágról készültek. A koncepció az volt, hogy a legrégebben készült radarképet hasonlítottam össze a legújabbal (az időpontokat a drónos helyszíni méréshez igazítottam). Pirossal jelöltem a hulladéklerakó helyét a képeken.

A 24. ábrán a Sentinel-1B műhold segítségével a felszálló ágról (102-es relative orbit number) készült radarfelvétel feldolgozása látható. A vizsgált hulladéklerakónál semmilyen kimagasló érték nem figyelhető meg.

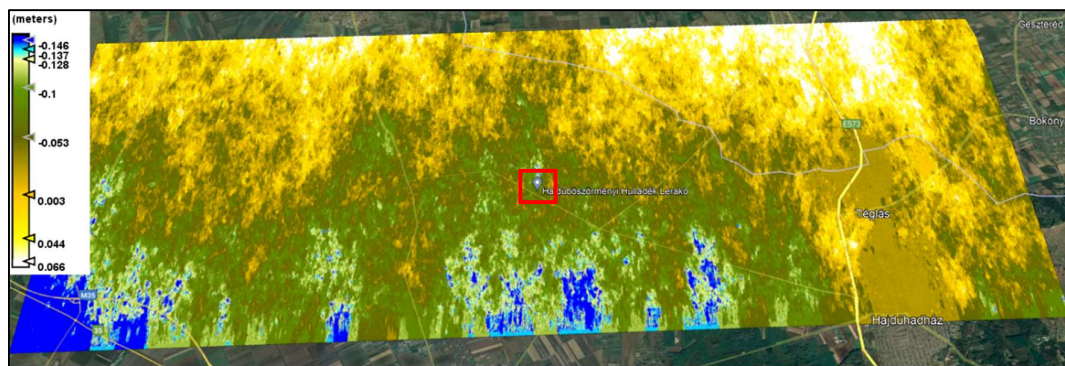
FFT Size	Window Size	Row&Column overlap
64	3	500



24. ábra: VV_500_64_3 felvétel megjelenítése [saját forrás]

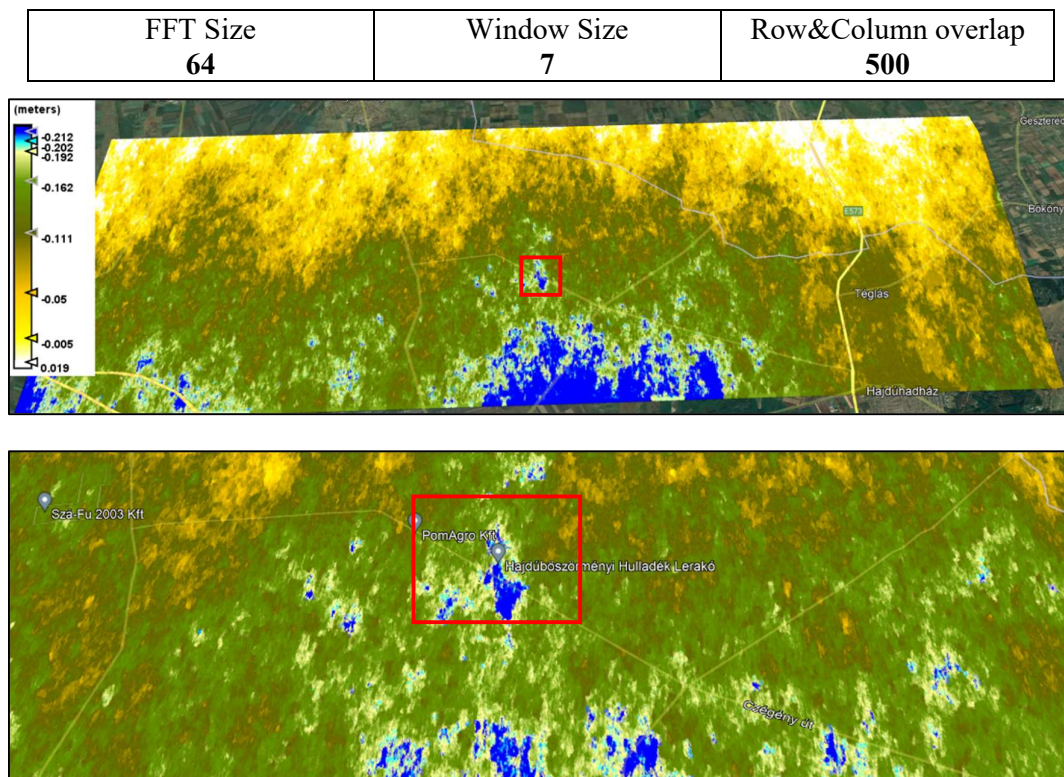
A 25. ábrán annak a folyamatnak az eredménye látható, amelynek a lépésein keresztül mutattam be a feldolgozást. Itt a Sentinel-1A műhold felvétele került feldolgozásra. Ahogy látható, ezen a képen már sokkal részletesebb a felszíndeformáció mértékének megjelenítése. A hulladéklerakó környékén különböző magassági értékek figyelhetők meg.

FFT Size	Window Size	Row&Column overlap
64	3	200



25. ábra: VV_200_64_3 felvétel megjelenítése [saját forrás]

A térfogatszámításhoz választott kép látható a 26. ábrán. A Goldstein szűrő paramétereinek ennek a kombinációjára esett a választásom a hulladéklerakó térfogatszámításához. Ha megbízható az InSAR technológiával történő térfogatszámítás, akkor ebben az esetben van a legnagyobb valószínűség arra, hogy az UAV technológiával történő térfogatszámítás eredményéhez közeli értéket kapjak.



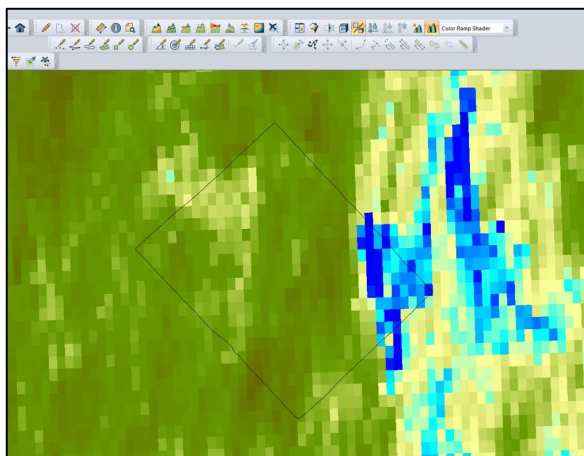
26. ábra: VV_500_64_7 felvétel megjelenítése [saját forrás]

7.4 Térfogatszámítás és domborzatmodell

Az előző fejezetben bemutatott műholdfelvételekből a SNAP programban készített felszínmodelleket behívtuk a Global Mapper programba térfogatszámítás céljából. A Global Mapper programban egyszerre két felszínmodellt lehet összevetni egymással, ahol a program a magasságkülönbségeket érzékeli, ezáltal meghatározva a két felvétel közötti térfogatváltozást.

A 27. ábrán szemléltettük a hulladéklerakó koronavonalának megjelenítésével a lerakó területét a felszínmodellen.

Szembesülnünk kellett azzal, hogy ezeken a felvételeken az hulladéklerakó területén nincs a vizsgálatunkhoz megfelelő adat. A lerakó területén a magassági értékek korrigálás után sem közelítettek a valósághoz, ezáltal az eltérő időpontban készített felszínmodellek közötti térfogatszámítás sem lett megfelelő.



27. ábra: Vizsgált terület a felszínmodellen [saját forrás]

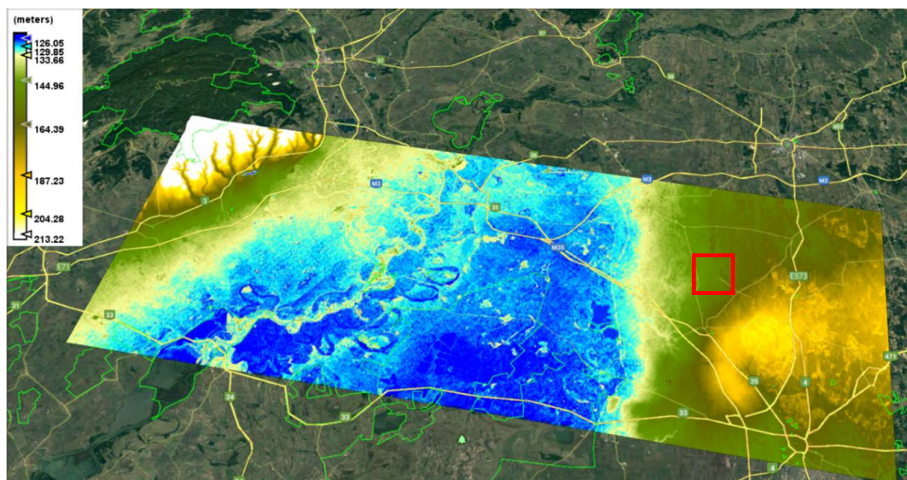
Mivel a „közvetlen” deformációvizsgálatból nem jött ki eredmény, ezért megpróbáltam domborzatmodellek létrehozásával megnézni a térfogatszámítást azért, hogy a vizsgálat teljeskörű legyen.

A domborzatmodell elkészítéséhez a Sentinel-1 Toolbox erre vonatkozó segédlete adott iránymutatást. A legjobb paraméterekkel rendelkező domborzatmodell két olyan műholdképből készíthető, mely 6, maximum 12 napos eltéréssel készült egymástól. Mivel a Sentinel-1B műhold 2021 végével meghibásodott, ezért 2021-es felvételeket alkalmaztam a DEM létrehozásához azért, hogy két olyan felvétellel tudjak dolgozni, amelyeknek létrejötte között 6 nap telt el. [40]

A III. drónos felmérés 2021.01.11-én, a IV. felmérés 2021.10.15-én volt, így a hozzájuk időben legközelebb eső Sentinel-1A műholdfelvétel már letöltésre került a felszínmodellek létrehozásakor. Már csak azokat a Sentinel-1B műholdfelvételeket kellett a DEM létrehozásához letöltenem, melyek 6 napra készültek el ezekhez a felvételekhez képest ugyanarról a területről.

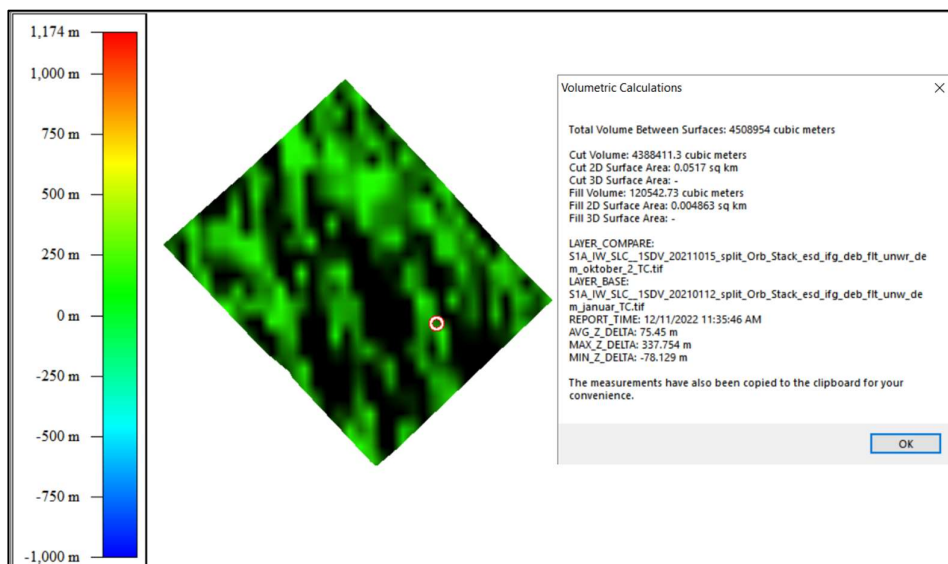
Miután rendelkezésemre álltak a megfelelő Sentinel-1A és Sentinel-1B műholdfelvételek, a SNAP programban végigmentem a segédlet alapján a DEM

létrehozása folyamaton. A 28. ábrán a 2021 októberében készült felvételekből előállított domborzatmodell látható, rajta pirossal jelölve a hulladéklerakó helyét.



28. ábra: SNAP programban létrehozott domborzatmodell [saját forrás]

Miután előállt a két domborzatmodell, behívtuk őket a Global Mapper programba csakúgy, mint a felszínmodellekkel tettük. Sajnos itt is azt kellett tapasztalnunk, hogy a két időpont közötti térfogatváltozás értéke nem felel meg a valóságnak, hatalmas értéket kaptunk, $4.508.954 \text{ m}^3$ (lásd: 29. ábra).



29. ábra: Térfogatváltozás értéke a domborzatmodellek között [saját forrás]

A következő fejezetben a szakdolgozatomban vizsgált második technológiát, az UAV technológiával történő térfogatszámítást mutatom be.

8. ADATFELDOLGOZÁS UAV TECHNOLÓGIÁVAL

8.1 Előkészítés

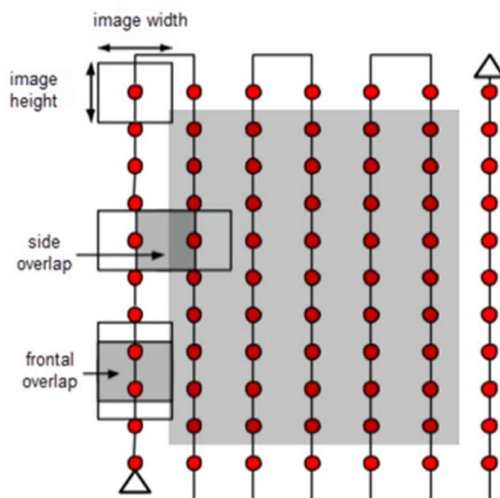
A helyszíni mérést megelőzően megtekintettem a hulladéklerakó műholdképét a Google Earth program segítségével (lásd: 30. ábra). Jól látható, hogy a felmérni kívánt területet lombos növényzet nem árnyékolja be, zavartalanul történhet a mérés.



30. ábra: Műholdfelvétel a vizsgált hulladéktárolóról [Google Earth]

A mérést megelőzőn a tervezett repülés időpontja, időtartama és az érintett terület koordinátái bejelentésre kerültek a Mydronespace telefonos alkalmazáson keresztül. Ez a mobilalkalmazás a hivatalos drónapplikációja a HungaroControlnak. Mivel nem lakott területen történt a felmérés, így nem volt szükséges eseti légteret kijelölni (lakott terület feletti repülés esetén kormányrendelet írja elő ezt), viszont az applikáció használatával lehetett csak használnunk a drónt.

A drónnal történő repülést megelőzően megtervezésre került a drón repülésének útvonala (lásd: 31. ábra), illetve a beállításra kerültek a drón és kamerájának paraméterei is (lásd: 32. ábra).



31. ábra: A repülési terv vázlata a hulladéklerakó területén [37]

A légi felmérés előre tervezett repülési sávok mentén történik a teljes terület lefedésével. A soron belüli felvételek és a sorok közötti átfedés 80-80 %-ra lett állítva.



32. ábra: Drón és kamerájának beállítása [saját forrás]

Beállításra került a drón repülési sebessége, a kamera optikai tengelyének állásszöge (angel) és a képátfedés (overlap) mértéke is.

8.1.1 A terepi méréshez használt műszerek

A helyszínen drónos felmérést egy DJI Phantom4Pro forgószárnyas repülő eszközzel végeztük (lásd: 33. ábra). A repülő eszköz kamera és tájékozási paraméterei a következők:

- Szenzor: 1" CMOS (20 MP)

- Lencse: FOF 84°, 8,8 mm (35 mm format equivalent: 24 mm), f/2,8 – f/11
- ISO tartomány: 100 – 3200
- Mechanikus zár: 8 – 1/2000 s
- Képméret: 5472 x 3648 pixel (3:2 képarány)
- Fotó: JPEG
- Műhold: GPS/GLONASS
- Pozicionálási pontosság: $\pm 0,5$ m vertikális; $\pm 1,5$ m horizontális
- Stabilizálás: 3 irányú aktív gimbal



33. ábra: DJI Phantom4Pro [saját forrás]



34. ábra: Stonex S900 RTK GNSS [38]

A 34. ábrán látható Stonex S900 RTK Rover GPS segítségével tudtuk az illesztőpontok pontos helyzetét meghatározni. Ez a műszer 60 fokos IMU dőlésérzékelővel rendelkezik, ennek köszönhetően nem kellett a libella pontosságára koncentrálni, hatékonyabban mehetett a mérés.

8.2 A terepi mérés

A helyszíni mérés 2022.10.18-án zajlott le a drón és a GPS műszer segítségével. A mérést a hulladéklerakó térfogatának felmérésével megbízott mérnöki csapat tagjaival végeztem el.

8.2.1 A hulladéklerakó koronavonalának meghatározása

A depóniater korona vonalát (lásd: 35. ábra) az I. felmérés során (2019-ben) a mérnöki csapat 70 pont mérésével határozta meg. Ebből kifolyólag a jelen mérésnél is az ezen pontokból interpolált felszínt tekintettük a referencia felszínnek a depóniater föld feletti és alatti térfogatának meghatározásakor.



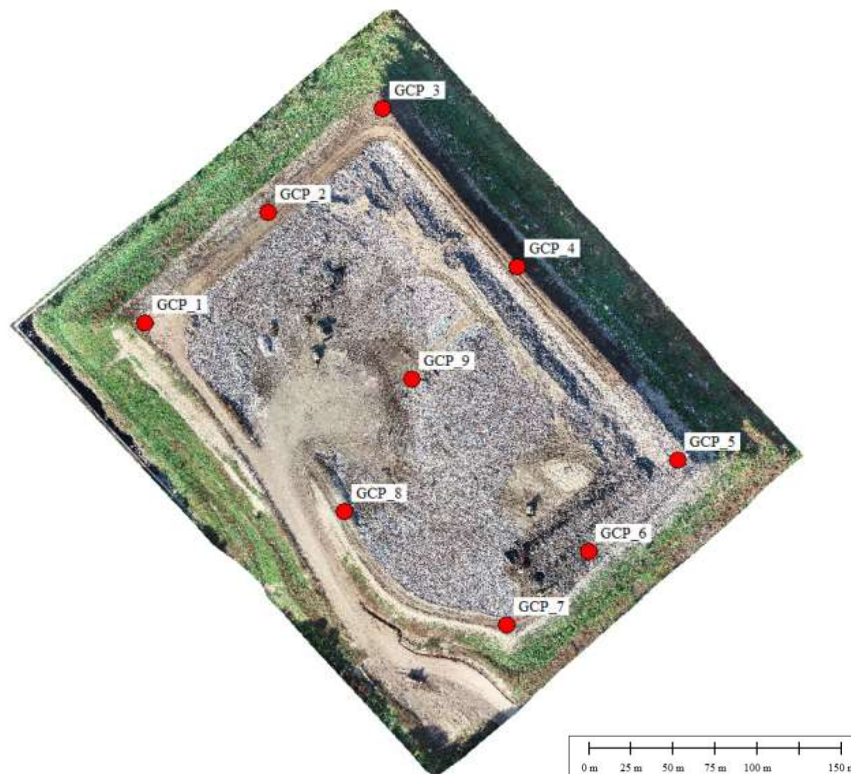
35. ábra: A 70 db mért pont (sötétkék) a koronavonal mentén [saját forrás]

8.2.2 Illesztőpontok mérése GPS eszközzel

A légifelvételek fotogrammetriai feldolgozásához az I. és II. felmérések során rögzített terepi illesztőpontokon (GCPs – Ground Control Points) kívül, további 24 pontot került rögzítésre a depóniaterületén (főként a depónia felső, aktívan használt részén) az előzőekben bemutatott GPS eszközzel és módszerrel. Az előző négy felmérés során összesen 56 illesztő- és 27 ellenőrző pontot lett bemérve. A mostani, V. felmérés alkalmával, mivel a korábbi felmérések illesztőpontjai nem voltak felhasználhatók, mérés előtt közvetlenül kihelyezett illesztőpontokat használtunk fel a légiháromszögelésre. Ezek 50 x 50 centiméteres négyzet alakú fekete-fehérre és piros-fehérre festett pontjelek voltak (lásd: 36. ábra, 37. ábra).



36. ábra: GCP bemérése GPS eszközzel [saját forrás]



37. ábra: Terepi illesztőpontok eloszlása [saját forrás]

8.3 Légifényképek feldolgozása

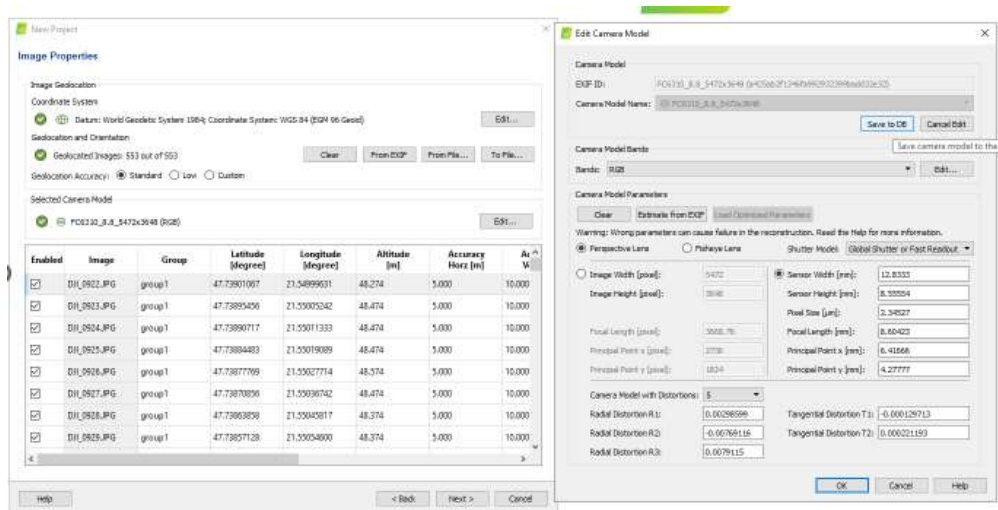
A repülés során 553 kép készült, az adatméret pedig 4,50 GB volt. A légifényképeket a konzulensem, László Gergely tanár úr segítségével dolgoztam fel a Pix4D Mapper szoftverrel. Ez a szoftver egy fotogrammetriai szoftver, melyet elsősorban drónnal készített képek automatizált feldolgozására használnak. RGB-, hő- vagy multispektrális

képek is importálhatóak a PIX4D Mapperbe. Légi vagy földi felvételekből képes a fotogrammetriai algoritmusoknak köszönhetően digitális térképeket, 3D modelleket előállítani. A szoftver a sugárnyaláb kiegyenlítés elvén működik. A fotogrammetriai feldolgozás során az illesztőpontok alkalmazásával készítettük el a fotogrammetriai pontfelhőt, felszínmodellt és az RGB fotómozaikot. [39]

8.3.1 PIX4D Mapper- a feldolgozásról röviden

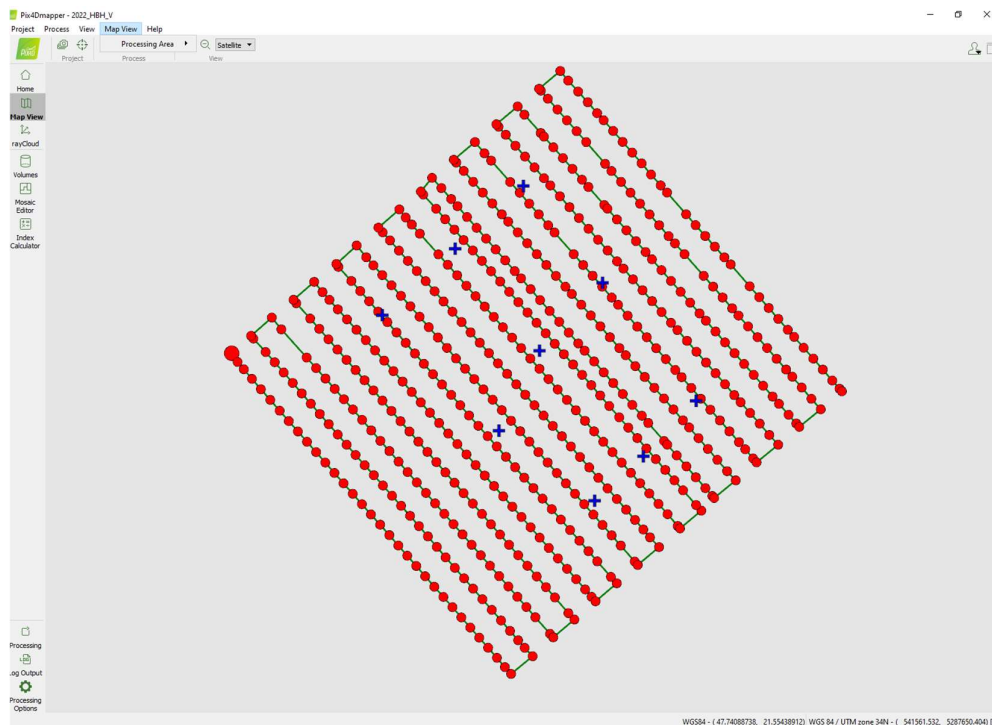
A feldolgozás első lépéseként új projektet hoztunk létre a PIX4D Mapper programban, majd behívtuk a drón által készített képeket. A program ekkor beolvasta a képekhez tartozó „Exif” (meta)adatokat. Az „Image Properties” fülön belül láthatjuk a nyers, külső tájékozási paramétereket: longitude, latitude – pozíció; omega, phi, kappa – drón állását mutatja meg. Itt módosíthatjuk azt is, hogy a bevitt adatok milyen koordináta-rendszerben legyenek. Az „Edit Camera Model” ablakban lehetőségünk van kamera paramétereket is megadni. Ha kalibrált kameránk lenne, akkor itt tudnánk megadni a hozzá tartozó adatokat (lásd: 38. ábra).

Az elején érdemes korrigálni a drón által érzékelt magassági értékeket, mivel akár több 10 méteres hiba is lehet bennük. Ehhez a képek betöltése után kiexportáltuk az Exif előzetes koordináta-értékeket egy külső fájlba, ott javítottuk a magasságot majd visszaolvastuk a programba a javított értékeket. Ezt úgy tudtuk megtenni, hogy repülés előtt a drónnal a földön készítettünk egy fényképet, majd azt a pontot GPS műszerrel is lemértük.



38. ábra: Kép tulajdonságainak beállítása [saját forrás]

A következő lépésben kiválasztottuk azt, hogy mit szeretnénk feldolgozni, így a 3D Maps opciót jelöltük ki. Ezután a program felvázolta a koordináták alapján a pontokat és meghatározta a repülési vonalakat is (lásd: 39. ábra). Ennek az előzménye az volt, hogy a PIX4D Mapper mobilalkalmazásában megadtuk a repülés előtt, hogy mekkora felbontást szeretnénk elérni, mekkora területen (bekereteztük a területet). A program ezen információk alapján megtervezte azt, hogy soronként milyen sűrűen készüljenek a fényképek és azt, hogy a sorok milyen közel legyenek egymáshoz.

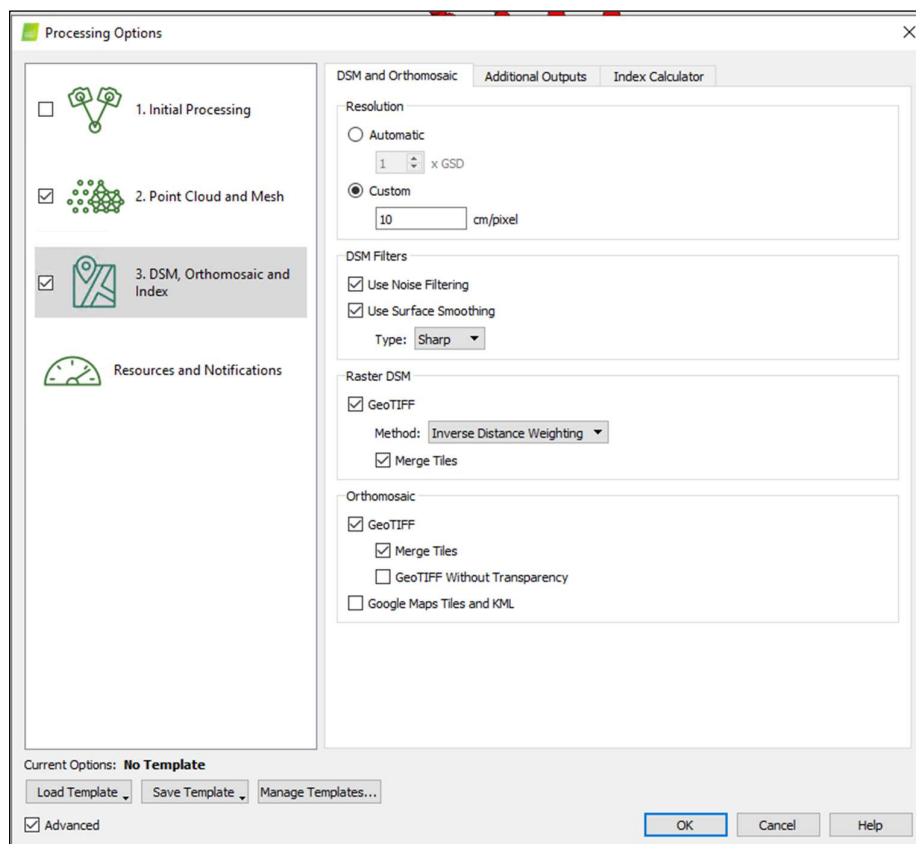


39. ábra: Behívás utáni megjelenítés [saját forrás]

A „Processing Options” fül alatt végeztük el a további beállításokat. Az „Initial Processing” menüpontban az alapbeállításokat alkalmaztuk és így végeztük el az előzetes légiháromszögelést, mivel ez megkönnyíti ezt követően a GCP-k kijelölését.

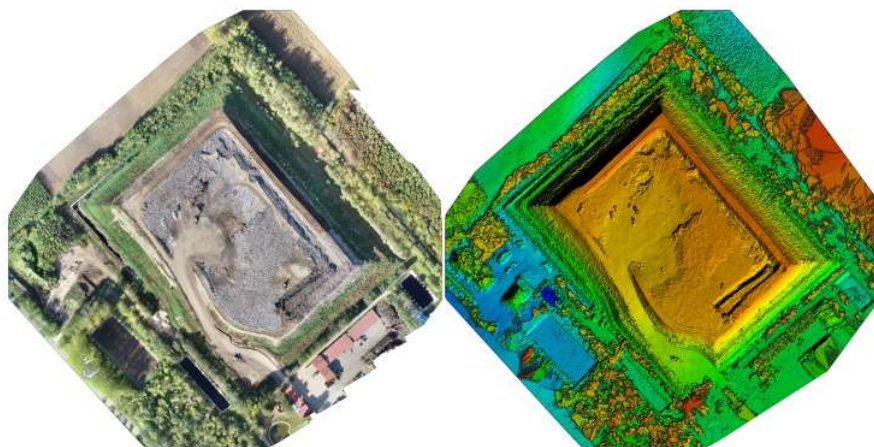
Ily módon nem kellett őket egyesével megkeresni, mert az automatikus képfelismerő funkció ekkor már alkalmazható volt. Az előzetes légiháromszögelést követően GCP-nként két képen kellett csak megkeresnünk a pontokat. Ezáltal a relatívan tájékozott képekből, abszolút tájékozott képeket kaptunk.

Ezt követően a 2. pontban kiszámításra kerültek a pontfelhő pontjai, a pontok 3D-s koordinátákat kaptak. Itt beállítottuk, hogy osztályozott pontfelhőt kapjunk. A 3. pontban többek között beállítottuk azt, hogy 10 cm/pixel felbontású felszínmodellt kapjunk (DSM) és legyen zajszerűsítés (lásd: 40. ábra).



40. ábra: DSM paramétereinek beállítása [saját forrás]

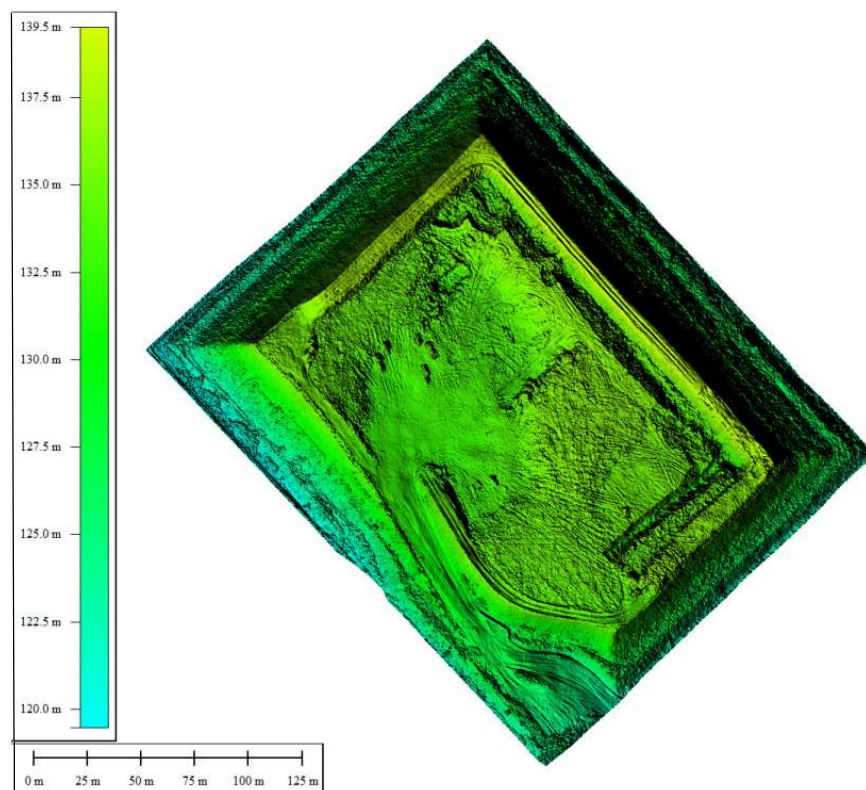
A 2. és 3. pont lefutása után a PIX4D Mapper program automatikusan előállít egy jegyzőkönyvet (Quality report), mely numerikusan és grafikusan is tartalmazza az eredményeket, megtalálhatóak benne a hibaellipszisek, az ortofotó és a felszínmodell is. A 41. ábrán láthatjuk a jegyzőkönyvben szereplő ortofotót (magasságtorzítások nélkül) és felszínmodellt.



41. ábra: PIX4D Mapper által létrehozott ortofotó és felszínmodell [saját forrás]

8.3.2 A hulladékdepónia felszínmodellje

A fotogrammetriai pontfelhőből utófeldolgozás során eltávolítottuk a bokrokat, munkagépeket és a tisztított pontfelhőből interpolációval állítottuk elő a raszteres digitális felszínmodellt (lásd: 42. ábra).



42. ábra: V. mérés magasság szerint színezett felszínmodellje [saját forrás]

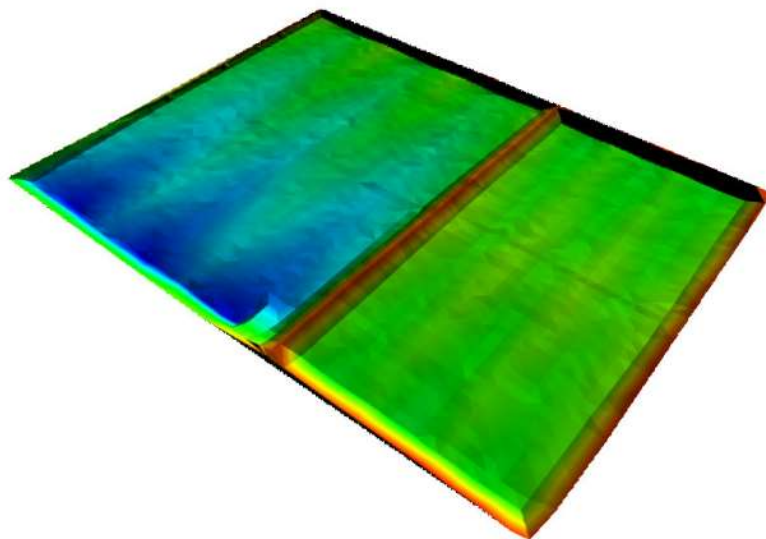
A tisztított pontfelhőből előállított nagyfelbontású EOVS vetületű felszínmodellt alkalmaztuk a hulladéklerakó aktuális térfogatának kiszámításához.

8.4 Hulladéklerakó térfogatának számítása

Az ideai térfogatszámítás előtt a kapott adatok alapján kiszámítottuk a hulladéklerakó 2005-ben történő megnyitásakor engedélyezett maximális térfogat méretét. Ezt követően számítottuk ki az V. felméréskor aktuális térfogatát a hulladékdepóniának.

8.4.1 Depóniatér koronavonala alatti térfogata

A depóniatér alatti térfogat meghatározása során az I. felméréskor alkalmazott módszertan segítségével kiszámított térfogat adatokat alkalmaztuk azért, mert a hulladéklerakó ezen része nem változhatott, így a térfogatában sem történt változás. A depóniatér felszín alatti térfogatát (koronapontokra illesztett, referencia felszín alatti terület) a kapott 2243 db aljzat koordináta interpolálásával készített felszín modell alapján számítottuk ki. A két depóniatér között egy „bakhát” található, ami elválasztja egymástól a tározórészeket. Az aljzat koordináták egy rácsháló sarokpontjaiban helyezkednek el, EOVS vetületi rendszerben, Balti tengerszint feletti magassági értékeket tartalmaznak. A kisebb területű depóniatéren 0,5 méter, a nagyobb területen pedig 0,3 m vastagságú kavicság van, mely értékekkel korrigáltuk a koordináták magasságait (lásd: 43. ábra).



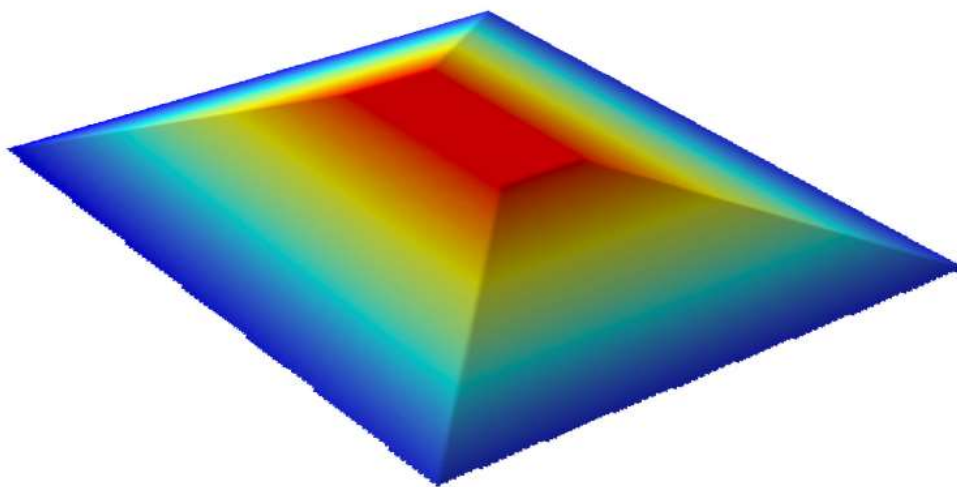
43. ábra: A depóniatér koronavonal alatti felszínének perspektivikus 3D-s megjelenítése [saját forrás]

A koronavonal alatti depóniatér térfogata: **131.077,9 m³**. A hulladéklerakó ezen része már feltöltésre került, a további számításokban a térfogata állandóként szerepel.

8.4.2 Modellezett maximális depónia térfogat

A hatóság által engedélyezett maximális depónia tér csonka gúla modelljét a koronavonalra alapozva megszerkesztettük (lásd: 44. ábra). Az engedélyezett adatok alapján a modell rézsű dőlése 1:3 arányú, a maximális magassága pedig 30 méter.

A koronavonal feletti maximális hulladéklerakó térfogata az engedélyezett adatok alapján összesen **748.082,76 m³** lehet. A koronavonal alatti térfogattal kiegészítve pedig összesen **748.082,76 m³ + 131.077,9 m³ = 879.160,66 m³** lehet a tervezett hulladéklerakó térfogata. Ezek az értékek állandónak tekinthetők a felmérés és a tényleges térfogat számítás során.

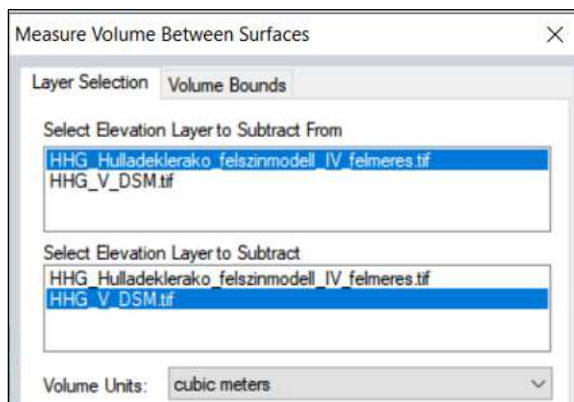


44. ábra: A modellezett hulladéktároló [saját forrás]

8.4.3 Légifényképekből számított térfogat

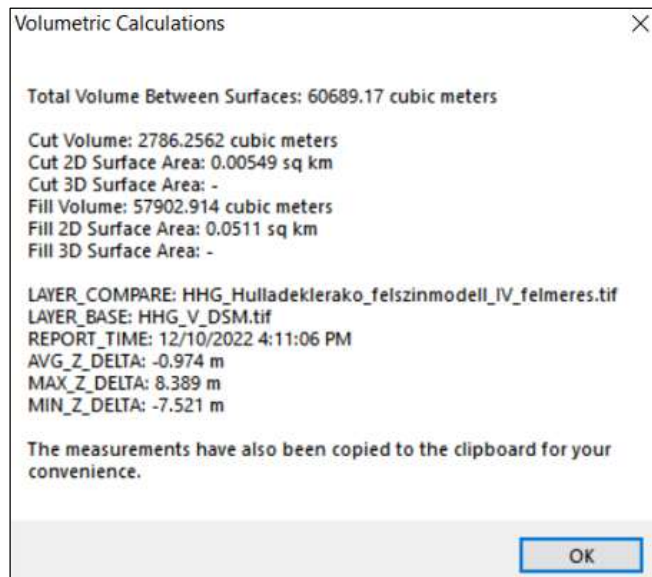
A PIX4D Mapper program segítségével előállított felszínmodelleket hasonlítottuk össze egymással a térfogatváltozás meghatározásához. Ehhez a Global Mapper programot használtuk.

A 45. ábrán ehhez a számításhoz most a IV. és V. felszínmodellt választottam ki, egyúttal ezzel mutatom be a program működésének elvét is.



45. ábra: Egymással összehasonlítandó felszínek [saját forrás]

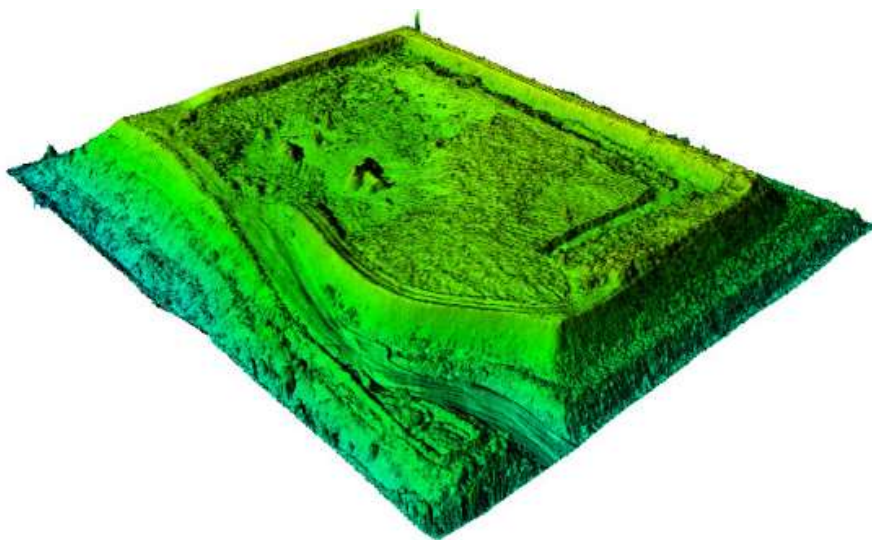
Miután kiválasztottuk a két egymással összehasonlítandó felszínmodell, a program lefut és a 46. ábrán lévő információk állnak elő. Láthatjuk azt, hogy a két időpont között összesen 60.689 m^3 változás volt, amiből 2.786 m^3 csökkenés, míg $57.902,9 \text{ m}^3$ növekedés. Mivel a csökkenés általában abból adódik, hogy egyik helyről a másikra felpakolnak egy halmot, így a tényleges térfogatváltozást úgy kapjuk meg, hogy a növekedésből levonjuk a csökkenést.



46. ábra: Két időpont közötti térfogatváltozás értéke [saját forrás]

Az V. felméréskor mért hulladéklerakó térfogatát az előző mérések alkalmával előállított felszínmodellekkel történő összehasonlítással, vagy a referencia felszínnel összevetve is megtudjuk adni.

A Global Mapper program segítségével tudtuk kiszámítani tehát azt, hogy az V. drónfelmérésből előállított felszínmodell (lásd: 47. ábra) alapján a referencia felszín feletti hulladéklerakó számított térfogata: **559.939,4 m³**.



47. ábra: Valós felszínmodellje a hulladéklerakónak (V. felmérés) [saját forrás]

A koronavonal alatti térfogattal kiegészítve pedig **559.939,4 m³ + 131.077,9 m³ = 690.956,6 m³** a jelenlegi, tényleges térfogata a hulladéktárolónak. Ez azt jelenti, hogy a hulladéklerakónak az engedélyezett maximális méretig még **188.204,06 m³**-rel nőhet a térfogata.

9. KONKLÚZIÓ

A kutatásom végén szeretném a szakdolgozati feladatom elvégzésével kapott eredményekkel kapcsolatban levonni a következtetéseket.

A kutatásom célja az volt, hogy választ kapjak arra, hogy az InSAR technológia használatával meghatározható-e a kiválasztott hulladéklerakó esetében az a térfogat érték, melyet az UAV technológia segítségével kapunk. Kíváncsi voltam arra, hogy egy ekkora nagyságú tereptárgy térfogatát milyen pontossággal lehet meghatározni az InSAR technológiával.

A hulladéklerakó térfogatát meghatároztam műholdfelvételekből készített felszín, - és domborzatmodellek segítségével, illetve drón által készített felvételekből is. A kutatási kérdésem így hangzott: egy hulladéklerakó térfogatszámításakor az InSAR technológia használatával kaphatunk-e olyan pontos értékeket, mint az UAV technológia alkalmazásakor?

A hulladéklerakó esetében a kapott eredményekből azt a következtetést vontam le, hogy a drónos felmérést nem tudja helyettesíteni az InSAR technológia, az InSAR technológia használatával nem kaptam pontos értékeket.

A feladatom elvégzésével szeretném megemlíteni, hogy a kapott eredmény nem zárja ki azt, hogy egy nagyobb lefedettségű objektum térfogatának pontos meghatározására az InSAR technológia ne lenne alkalmas.

A jövőre nézve egy újabb kutatás témáját adhatja az, hogy mely tényezők, hogyan befolyásolják a műholdfelvételekből a SNAP programban előállított felszín, - és domborzatmodell eredményét.

10. ÖSSZEFOGLALÓ

A szakdolgozatomban megvizsgáltam az InSAR és az UAV technológiával történő térfogatszámítás pontosságát egy Hajdú-Bihar megyében található hulladéklerakó területén. A következőkben szeretném röviden összegezve bemutatni a szakdolgozatom felépítését és a kutatásom eredményeit.

Az InSAR és az UAV technológiával történő adatfeldolgozás bemutatása előtt részletesen ismertettem a technológiák működésének alapelveit. A bevezetést követően a második fejezetben részletesen bemutattam a távérzékelés jellemzőit, működésének elvét, valamint a típusait energiaforrások alapján (aktív és passzív távérzékelés). Ezután az űrtávérzékelésben használt legjelentősebb elektromágneses hullámhossztartományok megnevezése és jellemzőinek, illetve az elektromágneses sugarak visszaverődésének (reflektancia) mértékét befolyásoló tényezők bemutatása következett. Az ezt követő 2.5-ös alfejezetben a műholdfelvételek felbontását mutattam be, amelyen belül ismertettem a térbeli, spektrális és időbeli felbontás jelentését. A 2.6-os alfejezetben az alkalmazott képsávok csoportjainak bemutatása következett: monokromatikus, multispektrális, hiperspektrális.

A harmadik fejezetben az InSAR technológiával szorosan összefüggő Kopernikusz földmegfigyelési programot mutattam be. Ismertettem a program múltját, jelenét és terveit a jövőre nézve. Továbbá egyesével kitértem a Sentinel műholdcsalád jelenlegi és leendő tagjaira is.

A negyedik fejezetben az InSAR technológia működésének alapelveiről írtam. A fejezetben a hangsúlyt a térbeli és időbeli bázisvonal, az interferometrikus feldolgozás, valamint a szintetikus apertúrájú (SAR) radar működési elve adta.

Az ötödik fejezetben a szakdolgozatomban vizsgált másik technológia, az UAV került bemutatásra, mivel ezzel a technológiával is meghatároztam a kutatásomban vizsgált hulladéklerakó térfogatát. A légi távérzékelésben használt pilóta nélküli légijármű típusait, működésének elvét, felhasználási területeit is prezentáltam a szakdolgozatom ezen fejezetében. Mivel a hulladéklerakó lerepülése drónnal történt, így a drónnal való repülés tervezésekor elengedhetetlen előkészületeket is itt részleteztem.

A hatodik fejezetben ismertettem a szakdolgozati feladatom megvalósításának lépéseit, a feladat kivitelezéséhez használt technológiákat, illetve azokat a mérési időpontokat, amikor UAV technológiával felmérésre került a vizsgált terület az elmúlt két évben.

A hetedik fejezetben az InSAR műholdképekből a SNAP program segítségével előállított felszínmodell és domborzatmodell lépéseit mutattam be. Ismertettem az elejétől a végéig a folyamatot, beleértve a műholdfelvételek letöltését, a SNAP program, a Global Mapper program és a Google Earth Pro használatát.

A nyolcadik fejezetben az drónnal történő mérés lépései következtek. A terepi méréshez használt műszerek, a helyszíni mérés folyamata, a légifényképek feldolgozása PIX4D Mapper szoftverrel, valamint a Global Mapper programban elvégzett térfogatszámítás került bemutatásra.

Az utolsó, kilencedik fejezetben az InSAR és az UAV technológiával kapott eredmények kapcsán levont következtetésemet mutattam be.

11. SUMMARY

In my thesis I examined the accuracy of volume calculation using InSAR and UAV technology at a landfill site in Hajdú-Bihar county. In the following I would like to briefly summarize the structure of my thesis and the results of my research.

Before introducing InSAR and UAV data processing, I described in detail the basic principles of how the technologies work. Following the introduction, in the second chapter I described in detail the characteristics of remote sensing, the principle of its operation and the types of remote sensing based on energy sources (active and passive remote sensing). Then I described the most important electromagnetic wavelength ranges used in space remote sensing and their characteristics, as well as the factors affecting the amount of electromagnetic radiation reflected (reflectance). Subchapter 2.5 then presented the resolution of satellite imagery, including the meaning of spatial, spectral and temporal resolution. In subchapter 2.6, the groups of image bands used were presented: monochromatic, multispectral, hyperspectral.

In the third chapter, I presented Copernicus, an earth observation program closely related to InSAR technology. I explained the program's past, present and goals for the future. Furthermore, I covered the current and future members of the Sentinel satellite family one by one.

In chapter four, I described the basic principles of how InSAR technology works. The emphasis in this chapter was on the principles of spatial and temporal baseline, interferometric processing, and synthetic aperture radar (SAR) operation.

In the fifth chapter, the other technology that was studied in my thesis, the UAV, was presented, as this technology was also used to determine the volume of the landfill that was studied in my research. I also presented the types of unmanned aerial vehicle used in aerial remote sensing, the principle of its operation and its applications in this chapter of my thesis. Since the landfill was flown by drone, I have also detailed here the preparations that are essential when planning a drone flight.

In the sixth chapter, I described the steps in the implementation of my thesis task, the technologies used to carry out the task, as well as the measurement times when the surveyed area was surveyed with UAV technology in the last two years.

In the seventh chapter, I presented the steps of the surface model and topography model generated from the InSAR satellite images using the SNAP program. I described the process from start to finish, including downloading the satellite images, using the SNAP program, the Global Mapper program, and Google Earth Pro.

In chapter eight, the steps for measuring with a drone followed. The instrumentation used for field measurement, the process of field measurement, the processing of aerial photographs using PIX4D Mapper software and the volume calculation in Global Mapper were described.

In the last, ninth chapter, I presented my conclusions on the results obtained with InSAR and UAV technology.

12.IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Balázsik Valéria (2010): Fotogrammetria 1., A távérzékelés fogalma, a fotogrammetria és a távérzékelés kapcsolata, NyME Geoinformatikai Kar
- [2] Nagyvárad László (2014): Adatnyerési módszerek, Környezeti Informatika, digitális tananyag, TÁMOP – 4.1.2.A/1-11/1 Forrás: http://www.geo.u-szeged.hu/~feri/kornyezeti_informatika/ch02.html, Letöltve: 2022.10.25.
- [3] Bányai László (2007): Geomatikai ismeretek, Tankönyvpótló segédlet a természetvédelmi mérnökhallgatók részére, NyME Erdőmérnöki Kar, pp. 83.
- [4] Vágó János, Seres Anna, Hegedűs András (2011): Alkalmazott térinformatika, egyetemi jegyzet, Miskolci Egyetem Földtudományi Kar
- [5] Bácsatyai László – Márkus István (2001): Fotogrammetria és távérzékelés, egyetemi jegyzet, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar
- [6] Magyar Asztronautikai Társaság (2021): Magyarország és a világűr, Pixelek és sávok: Mit mutatnak az űrfelvételek? Forrás: [Pixelek és sávok: mit mutatnak az űrfelvételek? - Magyarország és a világűr \(mant.hu\)](http://mant.hu) Letöltve: 2022.10.28.
- [7] Verőné Wojtaszek Malgorzata (2011): Fotointerpretáció és távérzékelés, egyetemi jegyzet, NyME Geoinformatikai Kar
- [8] Hábel Sára (2018): InSAR adatfeldolgozások paramétereinek vizsgálata és optimalizálása, Óbudai Egyetem Alba Regia Műszaki Kar, pp. 6-10., 20-26.
- [9] Bányai, László és Szűcs, Eszter és Kalmár, János és Eperné Pápai, Ildikó és Bán, Dóra (2014): Az InSAR technológia alapjai és a reflektáló felületek jellemzői, Geomatikai Közlemények, XVII., pp. 59-68.
- [10] Pesti Monika (2019): Mi is az az InSAR technológia? Lechner Tudásközpont Forrás: <https://lechnerkozpont.hu/cikk/mi-is-az-az-InSAR-technologia> Letöltve: 2022.10.30.

- [11] Skywatch (2021): Sentinel-1 Toolbox, InSAR Displacement Mapping with ERS data
Forrás: <http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20Stripmap%20Interferometry%20with%20ERS%20Tutorial.pdf> Letöltve: 2022.10.25.
- [12] Skywatch (2021): Sentinel-1 Toolbox, TOPS Interferometry Tutorial Forrás: https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial_v2.pdf Letöltve: 2022.10.25.
- [13] copernicus.eu: Kopernikusz program, Ismerje meg műholdjainkat, Forrás: [Ismerje meg műholdjainkat | Copernicus](#) Letöltve: 2022.10.26.
- [14] Soltész Katalin (2021): Kopernikusz program. Infojegyzet 2021/66. Forrás: [43f3ed47-4431-3ad3-3d31-405ac1b5bffe \(parlament.hu\)](https://www.parlament.hu/hu/43f3ed47-4431-3ad3-3d31-405ac1b5bffe) Letöltve: 2022.10.27.
- [15] Lechner Tudásközpont Kozmikus Geodéziai Obszervatóriuma (KGO): Műholdradar – interferometria (InSAR), Forrás: <https://www.sgo-penc.hu/muholdradar.php> Letöltve: 2022.10.30.
- [16] Pirkhoffer Katalin (2016): InSAR adatok megjelenítése GIS-ben, Óbudai Egyetem Alba Regia Műszaki Kar, pp. 14-25.
- [17] Eötvös Loránd Research Network: További információk a Zágráb mellett kipattant földrengésekről, 2020 Forrás: <https://epss.hu/en/tovabbi-informaciok-a-zagrab-mellet-kipattant-foldrengesekrol/> Letöltve: 2022.11.02.
- [18] Petrik Ottó (2007): Mikrohullámú távérzékelt adatok integrálása a felszínvizsgálatokba. Földtudományi Doktori Iskola, pp. 10-11., 16-17.
- [19] videotanfolyam.hu (2018): Felbontás, pixel, képarány, képfrissítés, pixelsűrűség Forrás: https://videotanfolyam.hu/blog/1090/Felbontas_pixel_keparany_kepfrissites_pixelsuruseg Letöltve: 2022.11.02.
- [20] www.esa.int Forrás: [ESA - Facts and figures](#) Letöltve: 2022.11.03.
- [21] sentinel.copernicus.eu (2022): End of mission of the Copernicus Sentinel-1B satellite Forrás: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/-/end-of-mission-of-the-copernicus-sentinel-1b-satellite/1.5> Letöltve: 2022.11.05.

- [22] geo-sentinel.hu (2016): Mi a Sentinel? Forrás: <https://geo-sentinel.hu/mi-a-sentinel-2/> Letöltve: 2022.11.05.
- [23] urvilag.hu (2021): Már dolgozik a Sentinel-6 Forrás: https://www.urvilag.hu/gmes/20210630_mar_dolgozik_a_sentinel6 Letöltve: 2022.11.05.
- [24] Christoph Rieke (2020): Air pollution: Using Sentinel-5P to monitor the atmosphere Forrás: <https://up42.com/blog/tech/air-pollution-using-sentinel-5p-to-monitor-the-atmosphere> Letöltve: 2020.11.05.
- [25] Bakó Gábor (2015): UAV és RPAS technológia a légi távérzékelésben. Interspect Csoport, elemző tanulmány Forrás: <http://acrsa.org/documents/BGUASMFGI.pdf> Letöltve: 2022.11.06.
- [26] dronexpert.hu (2020): A dróntechnológia múltja és jelene, jövője Forrás: <https://www.dronexpert.hu/drontechnologia-2020.html> Letöltve: 2022.11.06.
- [27] gobertpartners.com (2022): Hogyan működnek a pilóta nélküli légi járművek? Forrás: <https://gobertpartners.com/how-unmanned-aerial-vehicles-work> Letöltve: 2022.11.07.
- [28] droneblog.com (2022): What are GPS drones, and why does it matter Forrás: <https://www.droneblog.com/what-are-gps-drones-and-why-does-it-matter/> Letöltve: 2022.11.07.
- [29] <https://www.origo.hu/hirmondo/tudomany/www.wcs.org/www.su.se/english/20180422-a-fejlesztessel-elengedhetetlen-a-repuloterek-teruletenek-felmerese.html> Letöltve: 2022.11.07.
- [30] https://hvg.hu/tudomany/20150322_indul_a_teszt_repulhetnek_az_amazon_drono Letöltve: 2022.11.08.
- [31] <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0600020.kvv> Megtekintve: 2022.11.08.

- [32] Copernicus Open Access Hub weboldal. Forrás: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> Letöltve: 2022.11.09.
- [33] Bányai László et al. (2014): Sentinel-1A műhold és passzív reflektorok geodéziai alkalmazása. MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet. URSI MNB ülés. Forrás: <https://slideplayer.hu/slide/2789351/> Letöltve: 2022.11.09.
- [34] Jéger Róbert (2017): Az InSAR adatfeldolgozás Goldstein-szűrő algoritmusának vizsgálata, Óbudai Egyetem Alba Regia Műszaki Kar, pp. 24-27.
- [35] [Single Look Complex - Sentinel-1 SAR Technical Guide - Sentinel Online - Sentinel Online \(copernicus.eu\)](#) Letöltve: 2022.11.09.
- [36] https://www.researchgate.net/figure/Projected-Sentinel-1-centre-lines-for-IW2-swaths-of-a-ascending-pass-and-b-descending_fig1_344857139 Letöltve: 2022.11.10.
- [37] <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002471546-Image-acquisition> Letöltve: 2022.11.12.
- [38] <https://globalgpssystems.com/stonex-s900-rover-set/#configuration> Letöltve: 2022.11.12.
- [39] <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software> Letöltve: 2022.11.14.
- [40] Skywatch (2021): Sentinel-1 Toolbox, DEM generation with Sentinel-1 Forrás: <http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20DEM%20generation%20with%20Sentinel-1%20IW%20Tutorial.pdf> Letöltve: 2022.11.16.

13. ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A távérzékelés folyamatának szemléltetése.....	6
2. ábra: A passzív távérzékelés bemutatása	7
3. ábra: Az aktív távérzékelés bemutatása.....	8
4. ábra: Az elektromágneses hullámhossztartományok.....	9
5. ábra: Felszínborítások reflektancia értéke különböző hullámhossztartományokban.....	10
6. ábra: Sentinel-5P műhold begyűjtött adatainak terméke	15
7. ábra: A megvilágított terület a felszálló és leszálló pályákon mozgó műholdak által a megfigyelési sávban	18
8. ábra: A valódi deformációnak (D) a műhold irányú deformációk a felvételi helyzetből adódóan más-más vetületét mutatják meg.....	18
9. ábra: SAR radar: az antenna méretének megnövekedését a hordozó mozgásának segítségével szimulálják	19
10. ábra: A műholdnak a megfigyelt sávban történő mozgásakor folyamatosan rögzített jelek javítják a felvételek felbontását.....	20
11. ábra: Légi felvételezés merevszárnyú repülőgépre szerelt kamerával	21
12. ábra: Amazon webáruházának csomagkézbesítő drónja	23
13. ábra: Keresési beállítások a Copernicus Open Access Hub weboldalon.....	25
14. ábra: SLC radarfelvételek állása a 153-as relative orbit number esetén.....	26
15. ábra: Az IW1, IW2, IW3 alsávok felosztása a műholdfelvételeken.....	27
16. ábra: A TOPSAR-Split fül beállítások a Coregistration ablak alatt	28
17. ábra: A Back-Geocoding fül beállítása.....	28
18. ábra: A koordináták megadása a területkivághoz	29
19. ábra: Földrajzi koordináták alapján kivágott terület.....	29
20. ábra: A Goldstein-féle fázissűrűsítés beállítandó paraméterei.....	30
21. ábra: Az abszolút koherencia középérték	30
22. ábra: Goldstein szűrő használata előtti (fent) és utáni (lent) interferogram	31
23. ábra: A többszörösen ismételt lépések a jobb eredményért.....	32
24. ábra: VV_500_64_3 felvétel megjelenítése.....	33
25. ábra: VV_200_64_3 felvétel megjelenítése.....	33

26. ábra: VV_500_64_7 felvétel megjelenítése.....	34
27. ábra: Vizsgált terület a felszínmodellen	35
28. ábra: SNAP programban létrehozott domborzatmodell	36
29. ábra: Térfogatváltozás értéke a domborzatmodellek között.....	36
30. ábra: Műholdfelvétel a vizsgált hulladéktárolóról.....	37
31. ábra: A repülési terv vázlata a hulladéklerakó területén.....	38
32. ábra: Drón és kamerájának beállítása	38
33. ábra: DJI Phantom4Pro	39
34. ábra: Stonex S900 RTK GNSS.....	39
35. ábra: A 70 db mért pont (sötétkék) a koronavonal mentén	40
36. ábra: GCP bemérése GPS eszközzel.....	41
37. ábra: Terepi illesztőpontok eloszlása.....	41
38. ábra: Kép tulajdonságainak beállítása	42
39. ábra: Behívás utáni megjelenítés	43
40. ábra: DSM paramétereinek beállítása	44
41. ábra: PIX4D Mapper által létrehozott ortofotó és felszínmodell.....	45
42. ábra: V. mérés magasság szerint színezett felszínmodellje	45
43. ábra: A depóniatér koronavonal alatti felszínének perspektivikus 3D-s megjelenítése	46
44. ábra: A modellezett hulladéktároló.....	47
45. ábra: Egymással összehasonlítható felszínek	48
46. ábra: Két időpont közötti térfogatváltozás értéke.....	48
47. ábra: Valós felszínmodellje a hulladéklerakónak	49

14. TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: A vizsgált hulladéklerakó drónnal történő felmérésének időpontjai..... 24
2. táblázat: UAV és InSAR technológiával készített felvételek rögzítési időpontjai
a vizsgált területről 26

15. MELLÉKLETEK

Px darabszáma (vízszintesen)	Px darabszáma (függőlegesen)	Adott területen a felbontás értéke (Px*Px)
1 280	720	 921 600
1 366	768	 1 049 088
1 920	1 080	 2 073 600
3 840	2 160	 8 294 400

1. sz. melléklet: Az adott területen a pixelek számának növelésével (= méretének csökkentésével) a felvétel felbontásának értéke jobb lesz, részletgazdagabb képet kapunk [19, saját szerkesztés]