

1 Andmete kogumine

Andmete kogumine on eesmärgipärane tegevus, mille analüüsil soovitakse saada vastus püstitatud uurimisküsimus(t)ele. Reeglina on andmete kogumisel terve hulk kitsendusi, mille seavad ette tehnoloogiaga seotud võimalused (platvormid, andurid), seadusandlikud piirangud (nt lennuload ja keelualad) ja keskkonnatingimused (nt tuul, valgus, sademed, temperatuur jne) ja lisaks veel muidugi eelarve ning osalevate inimeste oskused.

Toetudes eelkirjeldatule, on vaja andmekogumist väga hoolikalt planeerida ja leida kompromisse võimaluste ning vajaduste vahel. Reeglina on drooniga andmete kogumine ainult üks osa laiemast (väli)tööst, mis reeglina hõlmab ka muid tegevusi ja logistikat. Näiteks on vaja korjata maapealset kontrollandmestikku või organiseerida drooni akude laadimine; suhelda mõne maaomanikuga, et küsida luba ligipääsuks uuritavale alale jne. Nii on enne ja pärast otsest droonilendu päris suur hulk tegevusi, et meil ikkagi sellest lennust kasu ka oleks oma uurimisküsimusele vastamiseks. Plokkskeemina kirjeldab kogu seda töövoogu Tmušić *et al.* (2020). Sellest artiklist pärineb ka järgnev kokkuvõtlik plokkskeem (Joonis 1).



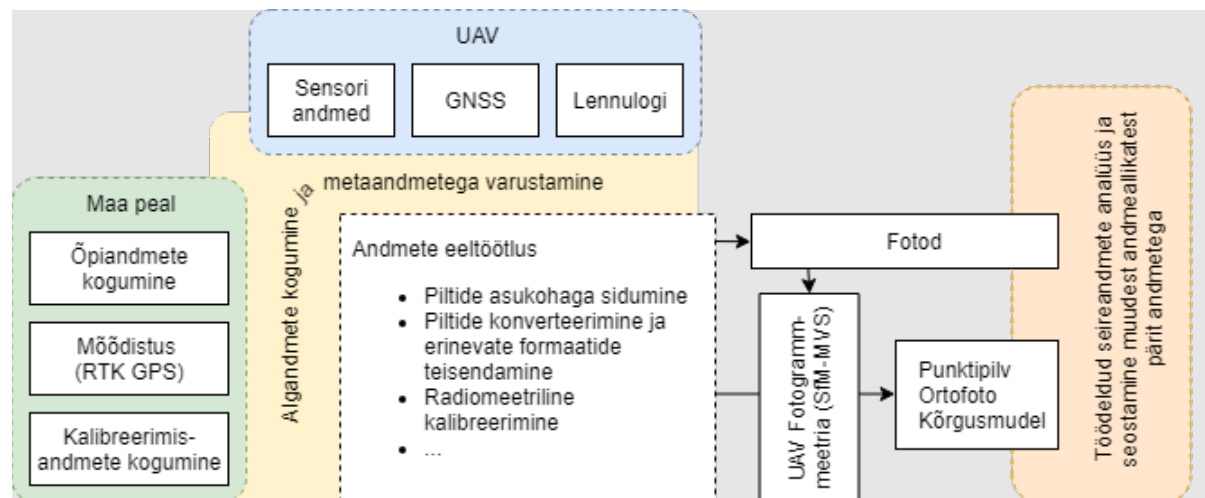
Joonis 1. Kogu drooniga tehtava kaardistusprotsessi töövoog, (QA – quality assurance, e kvaliteedi kontroll (Tmušić *et al.*, 2020).

Välitööde planeerimisel on mõistlik kasutada droonidega töötamise suhtelist paindlikkust ja lühikest ettevalmistusaega ning valida oma probleemi lahendamiseks parim hetk. Üldiselt on hea meele pidada, et 3D-kaardistamiseks on sobivaim aeg, mil taevast on ühtlase pilvkatte all, sest nõnda ei teki segavaid varje või peegeldusi. Parimaid hetki tuleb silmas pidada aga ka sesoonses kui ka fenoloogilises mõttes (nt orhideed on kõige parimini tuvastatavad õitsemisel ajal) või sündmuse põhiselt (nt peale esimest kerget

lumesadu saab ka tavakaamera kaardistada suhteliselt soojemaid alasid). Mõne sündmuse või spetsiifilise ilma ootamine eeldab, et kõik ettevalmistustööd on ette ära tehtud ning tehnika üle vaadatud ja pakitud. Selline planeerimine võimaldab väga kõrge kvaliteediga andmestiku kogumist, aga teisalt eeldab head uuringuobjekti tundmist ning omapoolset valmidust võimaluse avanedes kiirelt tegutseda ja vahel paraku ka kogu pakitu tulemuseta lahti pakkida.

Droon-kaardistusega on otseselt seotud **lennuplaani** koostamine, mis võimaldab ala katta andmetega süstemaatiliselt ning vajadusel teha sama meetodika alusel korduslende. Lennuplaani koostamisel on otsesed lõivsuhted näiteks uuringuala suuruse ja ruumilise resolutsiooni vahel – soovides suuremat maapealset ruumilist lahutust, ei saa me reeglina katta nii suuri alasid, sest peame lendama madalamat ja aeglasemalt.

Seega on lennuplaneerimisel valmiv lennuplaan väga spetsiifiline, sobitudes konkreetse drooni, kasutatava anduri, välitingimuste ja soovitud lõppeesmärgiga. Kui üks neist komponentidest muutub, siis reeglina on meil vaja üle vaadata ka kogu ülejäänud lennuplaan (vt peatükk 1.4). Selles peatükis proovime erinevad piirangud kõrvale jätta ja käsitleda andmete kogumise protsessi natuke laiemalt (Joonis 2).



Joonis 2. Ühe lennukorra põhimõtteline skeem.

Aspektid, millele andmekogumisel tähelepanu pöörata ja mis mõjutavad nende hilisemat kasutamist:

- kasutatav riistvara ja selle väljund ning erinevad formaadid;
- töötluks kasutatavad programmid ja nende sisend;
- maapealne toetav seire ja selle sidumine droonilt kogutavate seireandmetega: ruumiline sidumine (georefereerimine), õpiandmete kogumine, vajadusel radiomeetrilist kalibreerimist võimaldav andmestik.

Kahe esimese punkti puhul keerleb kõik selle ümber, kuidas ühe väljund ja teise sisend omavahel ühilduvad. Näiteks, kas anduri/kaamera pildi väljundformaad on otse töötlust tegevas programmis kasutatav või on vaja seda veel enne mingisse teise formaati teisendada, kas kaamera salvestab kõik andmed terviklikult või on andmeid vaja mitmest kohast võtta ning järeltöötluks ühildada. Kolmas punkt kätkeb endast eelkõige andmete omavahelist ruumilist sidumist ehk georefereerimist.

Järgnevalt püüame vastuseid leida kahele küsimusele:

Millise lahutusega (ajaline, ruumiline, spektraalne) andmeid koguda?

Kuidas andmeid koguda, et need oleksid hiljem kasutatavad edasises töötluksprotsessis?

1.1 Andmete resolutsioon ehk lahutus

Nii drooniseire kui ka muude seiremeetodite kasutamisel tuleb läbi mõelda lahutuse ehk resolutsiooni erinevad aspektid:

1. ajaline – iseloomustab objekti seiramise sagedust;
2. ruumiline – iseloomustab detailide suurust, mida oleme võimelised objektilt eristama;
3. spektraalne – iseloomustab spektrikanalite hulka, mida oleme võimelised eristama objektilt peegelduvast valgusest;
4. radiomeetriline – kui täpselt suudame mõõta ja eristada andurisse saabuva kiirguse intensiivsust.

Neist kaks esimest aspekti on suuremal määral kasutaja kontrollitavad aga, nagu juba öeldud, omavahel enamasti lõivsuhtes. Kaks viimast resolutsiooni-aspekti on aga pigem määratud anduri enda parameetritega ja seega üsna otseselt lõivsuhtes eelarvega – suurema spektraalse ja radiomeetrilise lahutusega andurid on kallimad.

Ajaline lahutus

Seirelennud droonidega võtavad teatud aja. Kui näiteks soovime katta mõne ala piltidega ja hiljem teha nende andmete põhjal 3D-mudeli. Lennuplaneerimise tulemusena saame teada, et meile kättesaadava drooniga kulub minimaalselt 40 minutit lennuaega, et vajaliku ruumilise lahutusega pildid saada. Sellele lisandub akude ja andmekandjate vahetus, vajadusel drooni taaskäivitus, rekaliibreerimised jne. Nõnda saame arvestada minimaalseks seiresammuks koos väikese varuga 50 minutit.

Kas see seiresamm on piisav, sõltub otseselt uuringu eesmärgist. See ajavahemik võib olla rohkem kui piisav taimestiku kaardistusel, aga mõne kiire protsessi (nt maalihke või põlengu arengu jälgimiseks) võib see jääda liiga pikaks. Ajalist lahutust on võimalik tõsta mitme drooni ja andurikomplekti paralleelse kasutusega, aga see tähendab kohe arvestatavat lisakulu.

Ajalise lahutuse puhul peab arvestama järgmisi asjaolusid:

- Ajalise lahutuse suurendamisel suurendame andmemahutu ja sellega seotud ajakulu arhiveerimisele ning järeltöötlusele. Kõige säästlikum on valida maksimaalne ajaline samm, millega saab veel uurimisküsimusele vastata – peab arvestama võimalusega, et mõni välitöö võib ebaõnnestuda. Tihti on probleemiks ilm, mille negatiivset mõju saab võimalusel leevendada kombineerides robustsemat andurit/drooni. Võrreldes fotokaameratega, on laserskannerid 3D-modelleerimise jaoks küll kindlamad, aga kallimad tööriistad, sest nad ei sõltu valgusoludest.
- Kui meil on vaja jäädvustada mitut ajahetke aasta jooksul (nt kaardistada taimkatte biomassi muutusi), siis erinevatel päevadel seiret läbi viies peaks mõtlema, kas seire lõpptulemust võivad mõjutada päeva jooksul toimuvad keskkonnamuutused. Antud näite puhul soovitaks kõik seirelennud sooritada keskpäeval, mil päike on horisondi suhtes kõige kõrgemal. Seireprojektid, mis kestavad pikemalt kui aasta, on soovitatav jälgida fenoloogilist, mitte kalendriaastat.

Ruumilisest lahutusest sõltub, kui väikeseid objekte me oma andmetest saame hiljem eristada. See omakorda sõltub otseselt kaamera/anduri lahutusest ja suurusest, lennukõrgusest ja objektiivi fookuskaugusest. Planeerides lendu, tuleb nende faktoritega žongleerida, et leida enda ülesande lahenduse jaoks sobiv kombinatsioon. Fotopõhise kaardistamise rusikareeglina võiks arvestada, et uurimisobjekt, mida soovime hiljem ortofotolt eristada, peaks koosnema vähemalt kümnest pikslit. Näiteks on soov kaardistada keskmiselt 10 cm läbimõõduga õisikuid (pindala ca 80 cm²), siis peaks ruumiline lahutus olema vahemikus 2–3 cm piksli kohta - üks objekt koosneks seega umbes 9 - 20 pikslit.

Tänapäeval, peale kaamera konfiguratsiooni sisestamist, arvutavad lennuplaneerimise tarkvarad (vt peatükk 1.4) maapealse resolutsiooni (GSD) etteantud lennukõrguse jaoks automaatselt.

Spektraalne lahutus näitab, mitmes erinevas spektrivahemikus ehk kanalis objektilt peegelduvat valgust jäädvustatakse. Ideaalis tuleks valida andur, mis katab need spektrivahemikud, kus meie objekt on ülejäänud „taustast“ võimalikult erinev, kus tema spektraalsignatuur on unikaalne. Näiteks kaske on droonipildilt määndidest kesksuvel üsna raske eristada, samas varakevadel või sügisel, kus kaselehed on vastavalt helerohelised või kollased, on eristamine lihtsam. Kriitiliste spektrikanalite defineerimisel aitab meid ennekõike kirjandusega tutvumine, sest keegi teine võib olla selle küllalt töömahuka osa olla juba ära teinud. Üks variant on teha esmakaardistus kõige rikkalikumat spektraalinfot andva hüperspektraalse kaameraga, mis aitab leida meie kõige rohkem infot kandvad spektrikanalid. Seda infot teades saame hakata kasutama lähteülesande täitmise jaoks optimaalset modulaarset multispektraalkaamerat, et vähendada andmemahutu ja järeltöötamiseks kuluvat aega.

Radiomeetriline lahutus sõltub anduri tundlikkusest ja andmeväljundi formaadist. Anduri tundlikkust saab kasutaja mõneti tõsta, kasutades elektroonilist võimendust (nt ISO RGB kaameratel ning *gain* termokaameratel), aga sellega kaasneb paratamatult ka suurem müra. Pildiformaadi valik mõjutab oluliselt radiomeetrilist lahutust: jpg-formaadis piltide radiomeetriline lahutus ehk värvi sügavus (*color depth*) on tavaliselt 8 bitti, mis tähendab, et näiteks punase värvi intensiivsust saab väljendada 256-astmelise skaala abil. Kui sama pildi toorformaadi (*raw*) versioonil on värvisügavus aga näiteks 14 bitti, esitatakse punase värvi intensiivsust palju täpsemal, 16384-astmelisel, skaalal. Selle täpsuse hind on faili suurus – failid toorformaadis on kordades suuremad. Viimane piirab omakorda maksimaalset pildistamissagedust ja täidab kiirelt ka andmekandjaid. Kui pildistades on valgusolud head, siis piisava tekstuuriga („kirjute“) objektide puhul on mõistlik kasutada võimalikult vähe kokku pakitud jpg-formaati. Ainult rasketes valgusoludes ja/või väga ühtlaste objektide puhul on sobivam kasutada raw-formaati, et järeltöötusega parandada piltide kvaliteeti ja fotogramm-meetrias toimetada edasi juba kokku pakkimata tif-piltidega.

1.2 Andmetöötlusprogrammid ja nende sisend

Kogu andmetega seotud töövoos tuleb pidevalt mõelda erinevate tööetappide vahel toimuvale infovahetusele, täpsemalt selleks kasutatavatele andmeformaatidele. Ideaalis peaks ühe etapi väljund olema järgmisele etapile otseseks sisendiks, sest igasugune teisendamine toob kaasa lisatöö. Veelgi olulisem murekoht võib olla teisendamisega kaasnev võimalik andmekadu.

Mõned näited, mida läbi mõelda:

- Maapealne mõõdistus RTK GNSSiga pakub väljundiks tekstifaili (.txt või .csv) ning .bin-formaadi, mida oskab lugeda vaid vastava seadme tootja tarkvara. Seetõttu on vaja andmete mahalaadimisel valida salvestusviisiks tekstifail, sest siis saame faili otse avada fotogramm-meetria tarkvaras.
- Fotogramm-meetria tarkvara arvutab 3D-mudelit palju kiiremini, kui ta teab piltide asukohti. Parimal juhul on droon ja kaamera omavahel selliselt ühendatud, et drooni (RTK) GNSS asukohad salvestatakse kohe pildi juurde, arvestades siinjuures GNSS-antenni ja anduri omavahelist nihet. Halvemal juhul tuleb georefereerimine teha hiljem lennulogi abil järeltöötuse käigus. Fotode puhul on selleks vaja teada täpset piltide tegemise hetke, ajalast nihet GNSS-i ja kaamera sisemise kella vahel ning GNSS antenni ning anduri vahelist kaugust. Piltidele koordinaatide

lisamine järeltöötlusena on sisse ehitatud mitmesse lennukontrolli või droonide PPK GNSS lisamoodulite juurde käivasse tarkvarasse (nt Mission Planner, Emlid Reach).

- Fotogramm-meetria tarkvara ei oska otse avada erinevate kaameratootjate .raw-formaate. Info maksimaalseks säilitamiseks tuleks .raw-formaat konverteerida samaväärse värvisügavusega (12–16 bitti) .tif-formaati.

1.3 Metaandmed

Lisaks andmetele uurimisobjekti kohta, tuleb koguda ka andmeid andmete endi kohta st **metaandmeid**. Eriti oluline on see olukorras, kus seireandmeid ei kasutata vahetult peale lendu või tehakse seda kellegi teise poolt. Taoline lisainfo on tihti kriitilise tähtsusega, kuna võimaldab/ei võimalda andmeid hiljem uuesti kasutusele võtta (nt teha andmeanalüüsi uuemate meetoditega). Metaandmeteks võib liigitada kõik abistavad andmed, mis aitavad meil aru saada ja kasutada mõõtmistega saadud olulist infot (nt millise spektraalse kanali pildiga on tegemist, millal see pilt tehti, kes oli piloot, kui kõrgel ja mis ilmaoludega drooni lennutati, kus asusid maapealse kontrollseirealad, mis ja kes seal midagi tegi jne).

Kuidas, mis kujul ja kui palju koguda metaandmeid, sõltub jällegi eesmärgist. Küll võib üsna kindlalt ennustada, et tulevikus muutub andmete analüüsi võimekus järjest suuremaks ja seega ei tasuks metaandmete kogumist ja lisamist alahinnata. Metaandmete kogumine on enamasti tüütu ja aeganõudev ning seetõttu kiputakse taolisest tööst tihti viilima. Kergendavaks asjaoluks on see, et suure osa tööst teevad ära juba meie seadmed (nt piltidele kirjutatakse juurde kellaajad, nimed on ajalisel järjestuses, droon salvestab lennulogi jne). Samas kui neid logisid seadmetest alla ei laeta, kokku ei korjata ja ära ei süstematiseerita, muutub nende hilisem leidmine ning kasutamine kiiresti keeruliseks või lausa võimatuks.

Kõige mõistlikum on tegeleda metaandmete kogumisega samal ajal kui andmed tekivad st paralleelselt välitööga. Kindlasti tuleb vahetult peale lendu alla laadida seadmete endi logifailid ning neid arhiveerida süsteemselt.

Drooniga tehtava kaardistuse töövoo kohta käivate metaandmete kogumisel on abiks (Tmušić *et al.*, 2020) poolt koostatud tabel.

Välitööplaan	Drooni omadused	Drooni tüüp
		Massi ja lasti max kaal
		Max kiirus
		Max lennu kõrgus
		GNSS-vastuvõtja tüüp ja täpsus
	Anduri omadused	Anduri tüüp ja omadused
		Anduri kaal
	Kaamera seaded	Pikslite suurus
		Anduri suurus
		Fookuskaugus
		ISO
		Ava
	Lennuplaan	Säriaeg
		GSD (cm)
		Lennukõrgus ja selle referents
		Lennukiirus
Piltide põik- ja pikiülekatte %		
Drooni juhttarkvara		
Programmi nimi		

	Georefereerimine	Georeferentseerimise tüüp
		Referentspunktide arv
		Referentspunktide paigutus
Lendamine	Ilm	Tuule kiirus ja suund
		Valgusolud
		Õhuniiskus
	Missioon	Keskmine lennukiirus
		Lennuaeg
		Lennu muster
		Kaamera nurk
		Pildiformaat
Järeltöötlus	Geomeetriline järeltöötlus	SfM-tarkvara
		Lõpptooted
		SfM-seaded
	Radiomeetriline kalibreerimine	Signaali-müra suhe
		Radiomeetriline lahutus
		Vaate geomeetria
		Kanalite jaotus
		Peegeldusväärtuse leidmine
		Vinjetimine
		Kvaliteet
Täpsuse hinnang		Vigade suurus
		Statistilised parameetrid
		Vigade vähendamine

1.4 Lennuplaani koostamine

Selleks, et drooni edukalt lennutada ning saada tema abil vajalikud andmed, tuleb kogu protsess etappide kaupa läbi mõelda:

- **Lähteülesande planeerimine** – see etapp hõlmab kogu välitöö üldise ja konkreetsete alaeesmärkide määratlemist. Selle üks osa on drooniseire, mis peab kokku sobituma teiste seiremeetoditega. Drooniseire metoodilisi detaile aitab paika panna selge arusaam, kuidas on hiljem soov kogutavaid andmeid töödelda. Näiteks on fotogramm-meetria rakendamisel vajalik suur fotode ülekate: pöikülekate määrab ära lennuradade omavahelise kauguse ja pikiülekate määrab fotode tegemise sageduse.
- **Marsruudi planeerimine:** kui lähteülesanne on paigas, tuleb järgmise sammuna kavandada drooni liikumismarsruut, mis hõlmab mh võimalike ohtude või piiratud alade tuvastamist. Eriti oluline on see lennukdroonide puhul, mis, võrreldes multirootoritega, vajavad manöövrite tegemiseks palju rohkem ruumi. Marsruut planeeritakse teepunktide (*waypoint*) abil, mis ühendatakse tavaliselt sirgjoonelistel lennuliikudega.
- **Tegevuspunktide planeerimine:** tegevuspunktides täidab droon mõnda konkreetset ülesannet (nt pildistab, suunab kaamera kindlale punktile jne). Tegevuspunktid võivad kattuda teepunktidega aga võivad olla ka eraldisesvad.
- **Lennu simulatsioon:** enne tegelikku lendu saab mõnes lennuplaneerimise tarkvaras (nt Mission Planner) lennuplaani läbi proovida.

Lennuplaani koostamine peab algama meid huvitava probleemi defineerimisest ning selle kaardistamiseks/leidmiseks on hea valida parim saadaolev andur ning sobivaim kasutusaeg. Taoline eeltöö tehakse üldjuhul kirjanduse põhjal, mida täiendavad konsultatsioonid objekti hästitundva eksperdiga. Enda jaoks tuleb läbi mõelda ka vähim võimalik andmeresolutsioon (GSD – *ground sampling distance*), mille juures objekt on veel tuvastatav. Vajalik GSD määrab ära kaamera ning lennukõrguse kombinatsiooni, millega lend tuleb teostada. Laserskanerite puhul on samuti vaja teada minimaalset punktitiheidust, kuid lisaks lennukõrguse või vaatenurga vähendamisele saab punktitiheiduse tõstmiseks lennata lennuradasid mitmekordselt.

Näiteks SfM fotogramm-meetria meetodit kasutades on hea tulemuse eelduseks fotode suur ülekate, tavaliselt vähemalt 70% nii külgsuure kui pikisuunas. Keerukate objektide (nt poolläbipaistev taimestik) või madalama resolutsiooniga kaamerate (nt termokaamerad) puhul peab ülekate olema kuni 90%.

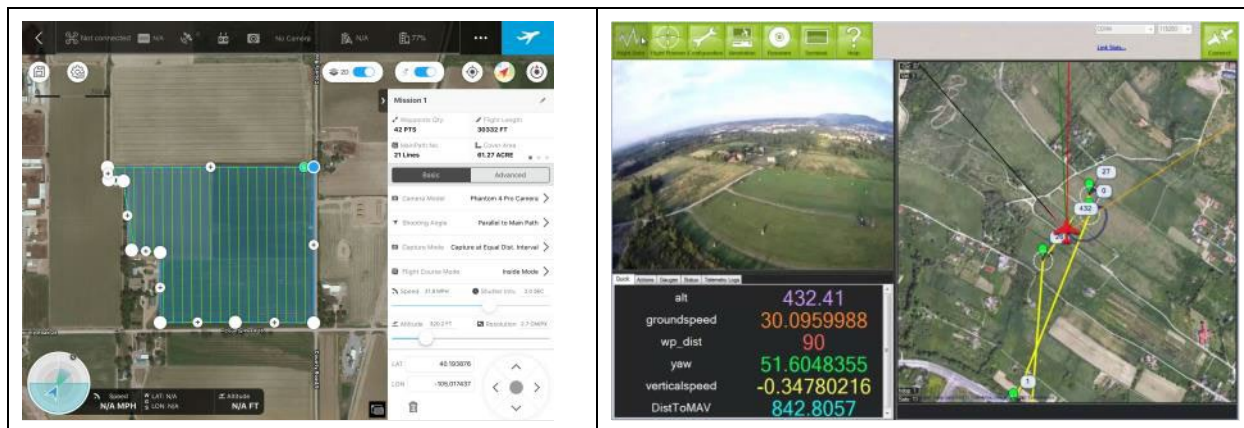
Madalalt ja kiirelt lennates võib tekkida probleem tehtud fotode salvestamiskiirusega. Selleks on hea enne lennu planeerimist kaamera spetsifikatsioonist või, veelgi parem, testlennu abil teha kindlaks konkreetse kaamera maksimaalne pildistamise sagedus, mille käigus andur veel konkreetsele mälukaardile või mõnd teist tüüpi salvestusseadmesse andmeid salvestab. Eriti tähtsaks muutub salvestuskiiruse kontroll juhul, kui on soov salvestada suuremahulisi toorformaadis (.raw) fotosid.

Säriaja seadistamisel kehtib rusikareegel, et säriaja jooksul ei tohi droon liikuda rohkem kui pool maapealse piksli suurusest. Seega lennates näiteks kiirusega 15 m/s ja soovides saavutada piltidel piksli suurus 3 cm, peab säriaeg olema ligikaudu 1/1000 sekundit. Selleks, et säriaeg oleks nii kiire, on vaja häid valgusolusid, suure avaga objektiivi ja/või kõrge ISO (sensori signaali elektrooniline võimendus) juures madala müratasemega kaamerat.

Lendu aitab planeerida selleks spetsiaalselt loodud tarkvara. Näiteks on vabavarana allalaetav Mission Planner, mis peale kaardistusala ning kaamera defineerimist, aitab kasutajal pool-automaatselt luua

parima võimaliku lennuplaani. Pea kõigil suurematel droonitootjatel on lennuplaneerimiseks oma tarkvara ning on loodud ka mitmeid otseselt SfM-tarkvaraga (näiteks Pix4d) integreeritud lennuplaneerijaid. Valdavalt on taoline tarkvara tasuta või siis tuleb see kaasa vastava tootja drooniga.

Lennuplaneerimise tarkvara sisaldab üldjuhul palju teisigi funktsioone: drooni seadistus, lennu-eelne drooni kontroll, lennuaegne telemeetria- ning videoid, lennulogide analüüs, fotode georefereerimine, lennusimulaator jne (Joonis 3).



Joonis 3. DJI Groundstation PRO lennuplaneerimise tööriist (vasakul); Mission Planner-i lennuaegne UAV telemeetria- ja videovoog (paremal).

Lennates muutlikumareljeefiga kohtades, tuleb arvestada, et nii droon kui ka lennuplaneerimise tarkvara arvestavad vaikumisi lennukõrgust drooni sisselülitamise koha suhtes. Stardipunkti suhtes samal kõrgusel lendamine on enam-vähem tasase reljeefi puhul igati sobilik lahendus. Üldiselt võivad kaardistatavate alade suhteliste kõrguste vahed olla lennukõrgusest kolm-neli korda väiksemad. Kui muutused kõrguste vahel on suuremad, hakkavad nii maapealne resolutsioon kui ka fotode ülekatte protsendid kaardistusala erinevates osades juba väga suurel määral muutuma, sest mõlemad on otseses seoses kaamera ja objekti vahelise kaugusega (Nesbit *et al.*, 2022).

Selleks, et hoida pidevalt (maa)pinna suhtes sama kõrgust, tuleb tavaliselt lennuplaneerimise tarkvaras eraldi sisse lülitada vastav funktsioon (*terrain following*). Siinkohal tuleb teada, kus kohast saab lennuplaneerija (maa)pinna mudeli, kui vana ja täpne see on ning kas vahepeal võib olla olukord muutunud. Näiteks on hiljuti rajatud kõrge hoone, kuid lennuplaneerija vanemas pinnamudelis seda pole ja droon peaks lennuplaani kohaselt lendama läbi maja. Mõnikord on vaja kõigepealt luua ajakohane kõrgusmudel ja alles seda kasutades planeerida lõplik lennuplaan. Parima tulemuse, eriti ortofoto osas, saab, kui lisaks pinna jälgimisele keerata ka kaamera optiline peatelg risti objekti tasapinnaga (Trajkovski *et al.*, 2020).

Veelgi keerukamate objektide puhul on võimalik kasutada ka n-ö tagurpidi fotogramm-meetria, kus olemasoleva pinnamudeli abil koostatakse vajalikest kaameraasenditest ja -nurkadest optimaalne 3D-lennuplaan (nt Agisoft Metashape).

Koostatud lennuplaan laetakse üles drooni juhtarvutisse. Viimane etapp on lennuplaani täitmine, kus droon lendab autonoomselt vastavalt lennuplaanile. Lennu ajal saab drooni piloot drooni, integreeritud sensori korral ka sensori tööd jälgida ja juhtida reaalajas ning vajadusel katkestada ka lennuplaani.

Kuna akude pinge langeb teatud lävendini jõudmisel väga kiiresti, siis on lennuplaani koostamisel soovitatav jätta varuks *ca* 20% akude mahtuvusest. Miinuskraadide puhul võib akude poolt välja antav energiahulk hoopis drastiliselt väheneda ja varuks tuleks jätta 30–40%. 0-kraadi lähedaste temperatuuride

puhul on kõrge õhuniiskuse (nt udu) korral võimalikuks ohuks propellerite ja/või tiibade jäätumine. See protsess vähendab väga kiiresti nende efektiivsust ja halvemal juhul võib kaasa tuua drooni alla kukkumise.

Ilmastikust on suurimaks probleemiks tavaliselt tuul ja vihm/lumesadu. Osa droone on küll vihmakindlad, kuid kaamerate ja LIDARiga pole vihmas/lumesajus midagi peale hakata. Konkreetse drooni tuulekindlus (*wind resistance*) on tavaliselt kirjas drooni tehnilises dokumentatsioonis. Tuule tugevuse hindamisel tuleb rõhutada selle sõltuvust kõrgusest: maa peal mõõdetud 4 m/s võib tähendada saja meetri kõrgusel pigem 8–10 m/s tuule tugevust. Ilmaennustus võtab tuule tugevuse puhul vaikumisi mõõtmiskõrguseks 10 m. Eriti ohtlikud on äkilised puhangud (nt äikesepilvede lähedal). Lisaks võivad kõrgete objektide vahel (kõrghooned) tekkida oluliselt tugevama tuulega n-ö tuulekoridorid ja nende lähedal tugev õhu liikumine ka vertikaalsuunas.

Tuulise ilmaga kaardistustlendude puhul on probleemiks taimestiku, eriti puude liikumine. Paraku fotogramm-meetria eduka rakendamise üheks põhieelduseks 3D-mudeli ja ortofotode loomisel on see, et objektid fotosessiooni ajal ei muutu/liigu. Taimestiku mõningane liikumine on paratamatu, aga tuule tugevnedes lähevad tulemused kiiresti halvemaks, seda eriti kõrgete puude puhul.

Teine põhiline probleem on pilvedest põhjustatud lennuaegne ebaühtlane ning muutuv valgus, mis muudab omakorda fotosid. Ühtlase valguse olemasolu on eriti oluline spektraalinfo korjamise ajal, aga ka 3D-mudelite loomisel vähendavad ebaühtlased ja teravad varjud mudelite täpsust. Muutlikes valgusoludes on fotogramm-meetria asemel suur eelis laserskaneerimisel, sest seda meetodit varjud ei mõjuta (Wallace et al., 2016).

Fotodepõhise kaardistamise mõttes on kõige parem tuulevaikne (< 3 m/s), ühtlase pilvisusega ilm. Paremuselt järgmine oleks tuulevaikne täiesti selge taevas, mil tuleks lennata võimalikult keskpäeval, et varjud oleksid lühikesed. Pikemate lendude puhul on paratamatu, et päikeselise ilmaga tekkivad varjud n-ö liiguvad märgatavalt ja see jääb näha ka fotogramm-meetria väljundites.

1.5 Lendamine

Konkreetselt lennuks ettevalmistused algavad kodus või kontoris. On üsna masendav sõita tagasi (kaugele) planeeritud seirekohast, sest üks juhe sai kunagi kohvrist välja võetud ja enne uut lendu ununes ta olemasolu. Et vältida kirjeldatud olukorda, on järgnevalt toodud näide, kuidas näeb välja korrektne välitöö ettevalmistus, mille eesmärk on multirootori abil kaardistada taimkatet.

Selleks tuleb enne välja minemist:

- taotleda ja saada **load** õhuruumi kasutamiseks (NOTAM-teadete kontroll <24 tundi enne plaanitud lendu);
- Kontrollida käitaja registreerimisnumbri olemasolu droonil;
- pöörata tähelepanu **ilmaennustusele**, eelkõige tuule suunale ja tugevusele (lennukõrgusel!), sademetele ja ka sellele, milline on pilvisuse iseloom. Ilmaennustuse täpsus on piisav ca 2–3 päeva enne plaanitud lendu. Päril usaldusväärset ennustust pakub näiteks uavforecast.com.
- kontrollida **maa magnetvälja häiringuid**, kuna need võivad oluliselt mõjutada GNSS-i ja kompassi täpsust! Häiringud on tavaliselt põhjustatud Päikese aktiivsusest. Droonidele ohtlikku magnetvälja häiringu taset näitab Kp indeks > 4 – 5. Seda indeksit peab kontrollima lennuga samal päeval, sest magnetvälja häiringuid ette ei ennustata (uavforecast.com näitab Kp indeksit). Sõjalisel otstarbel segatakse vahel GNSS-süsteemi täpsust teadlikult;
- **logistika** planeerimisel leida sobivad (auto) juurdepääsukohad (nt on vaja kaitsealale või eramaale sissepääsuluba vms) ja selgitada välja parimad võimalikud juhtimiskeskuse asukohad nii sideulatuse kui nähtavuse mõttes. Hea on läbi mõelda teiste inimeste kaasamise võimalus – alati on suur abi vaatlejast, kes toetab drooni pilooti, kontrollides drooni andureid, jälgides ohutust ja õhuruumi vms.
- tuvastada pinnamood ning potentsiaalselt **ohtlike objektide** (nt mastid, liinid, korstnad, kraanad jms) asukohad. Sellise taustteabe otsimiseks sobivad hästi Eesti maa-ameti geoportaali aerofotod, reljeefimudelid ja kaardid. NB! Tuleb meeles pidada, et olukord kaardipildis ja tegelikkuses ei pruugi minna kokku!
- koostada drooni esialgne lennuplaani;
- planeerida maaapealsete **referentspunktide** ja **-andmete** asukohad ning kavandada neile optimaalne juurdepääs;
- kontrollida, kas **andurite**, **mälukaardid**, **ühendusjuhtmed**, **varuosad** jne on olemas, ühilduvad ja töötavad;
- **kontrollida ja laadida akusid** (nii drooni kui muude seadmete omi);
- võtta vajadusel kaasa putukatõrje, päikesevari, kokkupandav tool jms piloodi mugavust kindlustavad vahendid:

Välitöö õnnestumiseks tuleb uuringualal:

- visuaalselt kontrollida lennuala ja märkida maha referentspunktid. Iiti linnades võivad olla tekkinud kraanad, mastid jms. ohtlikud objektid, mida Maa-ameti andmetes (veel) pole);
- jälgida ilma (nt äikesepilved);
- kontrollida drooni, juhtimiskeskuse ja nendevahelist sidet;
- kontrollida drooni kaitsemehhanismide (*fail-safe*) seadeid. Üks kõige kriitilisemaid on RTL (*return-to-launch*) kõrgus. Vajalik on läbi mõelda või kaaslasega arutada juhi käitumine rikete või näiteks segamise korral. Määrata ohutud alad hädamaandumise jaoks;
- kontrollida ettevalmistatud autonoomset lennuplaani ja vajadusel see sobitada kohapealsetele oludega;
- kontrollida andureid ning seadistada need kohapealsetele oludele vastavaks;

- lähedal seisjatele jagada ohutusalast teavet;
- kontrollida õhuruumi visuaalselt;
- kontrollida eelnevalt ohutust drooni vahetus läheduses, lülitada drooni lennuseisundisse (*arm*);
- Oodata ära IMU-de ja gimballi automaatne kalibreerumine ja GNSS-asukoha lukustus. Lukustuse hetkel fikseeritakse kodupunkt, kuhu droon rikete korral ise tagasi lendab;
- Enne kaardistamist pildistada vajadusel kalibreerimispaneel;
- juhtida droon paari meetri kõrgusele õhku;
- testida drooni manuaalselt juhtides kõigis liikumissuundades ja pöörates ümber oma telje;
- liikuda drooniga mööda vertikaaltelge vabale lennukõrgusele, st kõrgemale kõigist lennualal olevatest objektidest;
- vabal lennukõrgusel rakendada ettevalmistatud ja drooni mällu laetud autonoomset lennuplaani;

NB! Kui drooni liikumine õhus tundub ebatavaline, tuleb droon tuua koheselt tagasi maapinnale. Tõsisemate rikete puhul võib olla vajadus droon alla kukutada, kuid teha seda varem välja valitud alal, kus oht inimestele ja varale on võimalikult väike. Kui droon ei suuda tuulega võidelda, siis on vaja vähendada drooni kõrgust (sellega halveneb tihti side kuni katkemiseni!) ja proovida mehitamata lennumasin võimalikult maapinna lähedal lennates tagasi juhtida või vähemalt äratuntavasse ja ohutusse kohta maanduda. Viimast manöövrit ei maksa karta aga ohutud kohad peavad enne olema läbimõeldud, sest rikete korral ei kipu kõige paremate lahenduste välja mõtlemine loetud sekundite jooksul õnnestuda. Hea oleks enne hädamaandumist teha otse alla pilt, et asukohta oleks võimalik visuaalselt tuvastada ja kasutada saab ka droonipiltidel kaasas olevaid pildistamiskoha koordinaate. Lennutornide tööalas tuleb teavitada lennujuhti, kui kaob side drooniga.

Peale drooni maandumist tuleb:

- kontrollida mootoreid, katsudes neid palja käega. Korras mootorid peaks olema enam-vähem ühesuguse (sooja) temperatuuriga. Tuline mootor viitab võimalikule probleemile mähistes vms. Selline mootor tuleb enne järgmist lendu välja vahetada või vähemalt testida kontrollitud ja ohututes oludes.
- kontrollida kogutud andmete kvaliteeti;
- kokku korjata referentspunktide tähised, kalibreerimispaneelid jm varustus;

Lennujärgselt on vaja:

- anduritest ja lennukontrollerist maha laadida andmed ning logid, mis on omakorda vajalik süstematiseerida ja arhiveerida. Tehes lühikesel perioodil mitmeid lende, on mõistlik vahepeal andmed drooni andmekandjalt maha laadida ning varundada koheselt näiteks välisele kõvakettale;
- akud säilituspingeni tühjaks laadida kui järgmise kasutuseni on rohkem kui nädal.

Lennujärgne analüüs

Peale seda, kui mehitamata õhusõiduk on oma ülesande täitnud, analüüsitakse ja hinnatakse lennu ajal kogutud andmeid, et teha kindlaks välitöö edukus ja märkida üles nüansid, mida teha järgmine kord paremini.

2 Kasutatud kirjandus

- Nesbit, P., Hubbard, S., & Hugenholtz, C. (2022). Direct Georeferencing UAV-SfM in High-Relief Topography: Accuracy Assessment and Alternative Ground Control Strategies along Steep Inaccessible Rock Slopes. *Remote. Sens.* <https://doi.org/10.3390/RS14030490>
- Tmušić, G., Manfreda, S., Aasen, H., James, M. R., Gonçalves, G., Ben-Dor, E., Brook, A., Polinova, M., Arranz, J. J., Mészáros, J., Zhuang, R., Johansen, K., Malbeteau, Y., de Lima, I. P., Davids, C., Herban, S., & McCabe, M. F. (2020). Current Practices in UAS-based Environmental Monitoring. *Remote Sensing*, 12(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/rs12061001>
- Trajkovski, K. K., Grigillo, D., & Petrovič, D. (2020). Optimization of UAV Flight Missions in Steep Terrain. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/RS12081293>
- Wallace, L., Lucieer, A., Malenovský, Z., Turner, D., & Vopěnka, P. (2016). Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forests*, 7(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/f7030062>