

1 Droon - mõiste, tekke- ja arengulugu

Sõna *droon* algupära otsides jõuame Briti Kuningliku sõjaväemuuseumi abil sõjaväelise kasutuse juurde: esimesed mehitamata lennumasinad võeti appi I maailmasõja lõpus nii ründerelva kui ka õhutõrjemeeskondade sihtmärkidena. 1930. aastatel toodeti UK-s suurel hulgal "*DH.82B Queen Bee*" nimelisi raadio teel juhitavaid sihtmärke ja arvatakse, et just *Queen Bee* (emamesilane e.k) nimetusest arenes välja mõiste *drone*, mis tähistab inglise keeles isamesilast ehk leske.

Drooni-mõiste ilmus massimeediasse laiemalt 1990. aastatel, kui neid hakati USA poolt kasutama ründerelvana sõdades Lähis-Ida riikidega. Sellest ajast peale on tavainimese jaoks sõnale *droon* jäänud külge ebameeldiv tähendusväli ja 2022. aastal alanud Venemaa vallutussõda Ukrainas, kus droonidega sooritatud rünnakud on igapäevased, on seda suhtumist ainult süvendanud.

Teaduskirjanduses kasutatakse tänapäeval mehitamata õhusõidukite tähistamisel järgmisi lühendeid:

(s)UAV (*small unmanned aerial vehicle*)

UAS (*unmanned aerial system*)

RPAS (*remotely piloted aerial system*) (pms lennunduses)

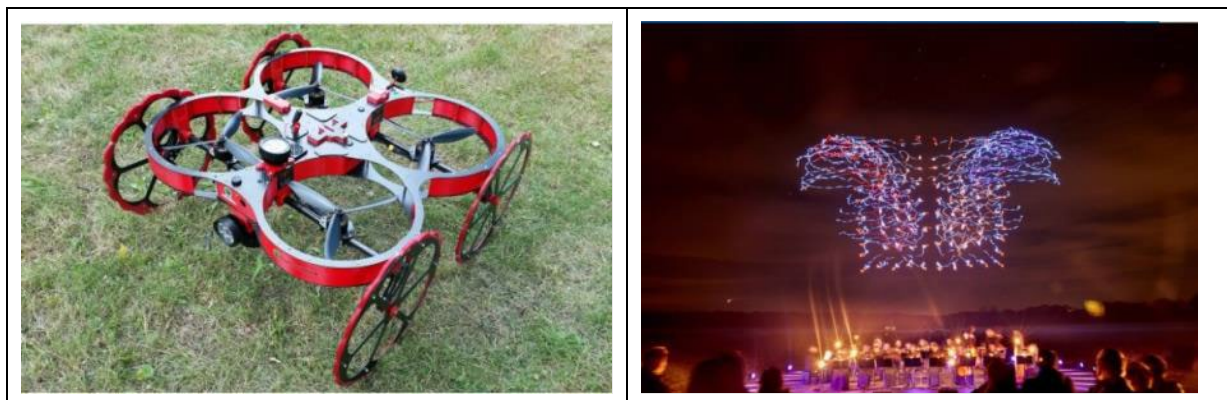
Eesti keeles kasutab lennundusvaldkonda haldav Transpordiamet mehitamata õhusõiduki tähistamiseks lühendit MÕS.

Kõige laiema tähendusega neist lühenditest on UAS. Selle lühendiga tähistatakse terviklikult lennumasinaga integreeritud riist- ja tarkvara komplekti (sh erinevaid andureid), mille abil kogutakse andmeid ja kontrollitakse lennumasinat. Teiste lühendite all mõeldakse pigem ainult mehitamata õhusõidukit ennast.

Lisaks õhus lendavatele mehitamata sõidukitele on olemas maa peal (UGV – *unmanned ground vehicle*), vee peal (USV – *unmanned surface vehicle*) ja vee all (UUV – *unmanned underwater vehicle*) liikuvad masinad. Kõigist neist sõidukitest leiab tervikliku ülevaate Balestrier *et al.* (2021) poolt kirjapandust, kus muuhulgas käsitletakse ka erinevate sõidukite koostöövõimalusi.

Üks väga huvitav arengusuund on erinevate keskkondade [nt õhk-vesi-õhk (Li *et al.*, 2022) või õhk-maa-õhk (EL H2020 Huuver projekt)] vahel liikuvad droonid. Mõned näited on esitatud joonisel 2. Teine märkimisväärne arengusuund on drooni parvede moodustamine, kus mitmed droonid tegutsevad sünkroniseeritud parvena (*swarm*) ning jagavad jooksvalt omavahel ülesandeid ning kogutavat keskkonnainfot (Zhou *et al.*, 2022). Seda laadi drooniparved on jõudnud ka laiema avalikkuse ette väga efektsete droonishowdega, kus sajad droonid liiguvad ja vahetavad sünkroniseeritult värve (Joonis 2).

Siin käsiraamatus on mehitamata õhusõidukite emakeelse vastena peamiselt kasutusel sõna droon.



Joonis 1. Vasakul UGV ja UAV hübriid Terra Drone Tilt Ranger ja paremal Intel-i 100 droonist moodustatud valguskujund.

Eesti ülikoolidest tegeleb droonide endi tehnilise arendamisega Tallinna Tehnikaülikool, mis teeb koostööd ka Eesti peamise (militaar)droonide tootjaga Threod. Droonide ja nendega seotud süsteemide arendamise ja ehitamisega tegelevad Eesti firmadest veel koostaja andmetel ELI (militaardroonid ja nende lisad), Skycorp (vesinikdroon), Hepta Airborne (elektriliinide ja muu drooniseire) ning Krattworks (masinõppe rakendamine reaajas, droonide arendus). Eesti Lennuakadeemia on arendanud mitmeid mehitamata sõidukite käitlemist õpetavaid kursusi ning arendab Eestis koos riigifirma Lennuliiklusteenused AS-iga üldist õhuruumi halduskeskkonda U-Space.

Kui heita pilk lähinaabritele, siis Lätis on kõige tuntum droonidega tegelev firma SPH Engineering, kus on loodud lennuplaneerimise tarkvara UgCS ja kus tegeletakse ka droonide ühendamise erinevate anduritega, nt georadarite ja sonaritega. Läti tuntuim droonitootja UAV Factory (Penguin-seeria droonid) tegutseb alates 2022. aastast edasi Edge Autonomy nime all. Meie põhjanaabritel, soomlastel, on oma laia haardega drooniarenduskeskus FUAVE (Finnish UAV Ecosystem) ja üsna värske LIFT Future Aerospace Centre, mis loodi ülikoolide ja erafirmade koostöös 2022. aasta sügisel. Soomlased on kindlasti maailmas esirinnas droonidega tehtavate metsanduslike uuringute (MosaicMill) ning hüperspektraalkaamerate tootmise ja arendamise (Specim, Senop Ricola) poolest.

1.1 Droonide tüübid – multirootorid

Üldiselt jagatakse droonid liikumise- ja tõstemehhanismi alusel kolmeks: multirootorid, lennukdroonid ja nende hübriidid (Hassanalien ja Abdelkefi, 2017). On ka teisi viise liikumiseks nagu reaktiivmootoreid kasutavad või lausa tiibu lehvitavaid droone, aga vähemalt tsiviilvaldkonnas ei ole nende kasutus laialt levinud.

Multirootorite puhul tõstetakse kogu masin üles puhtalt propellerite pöörlemisega tekitatud tõstejõu abil. Multirootorite suurimaks eeliseks teiste droonide ees on võime ühe koha peal hõljuda. Samuti on need droonid väga hea manööverdusvõimega, mis lubab multirootoreid kasutada väga piiratud ruumis. Paraku on taolised droonid võrdlemisi suure energiatarbega, mis muudab multirootorite lennuaja suhteliselt lühikeseks. Näiteks tüüpiline akutoitega multirootor suudab lennata 30–40 minutit, kusjuures lennuaeg sõltub nn kasuliku lasti (*payload*) kaalust. Ei tasu unustada, et tootjatele meeldib maksimaalset lennuaega reklaamida nn tühja drooni lennuaja abil.

Multirootorid on tänapäeval kõige universaalsemad droonid, mida saab kasutada nii erinevate alade kaardistamiseks (mõistlik aladel *ca* <50 ha), kohapealseteks vaatlusteks (nt kotkapesa kontroll) kui ka lihtsalt huvitava objekti pildistamiseks või filmimiseks. Uuematel multirootoritel on loodud võimekus nn arvutinägemise ja/või ultraheliandurite abil automaatselt vältida takistusi (*obstacle avoidance*) ning lennata lausa siseruumides isegi algaja piloodi abil. Siiski selleks, et drooni nn arvutinägemine töötaks tõhusalt, on tänase seisuga vaja veel selgeid kontrastseid mustreid. Näiteks ei tööta nn arvutinägemine puhta ja värske lume kohal või ultraheliandurid väikeste objektide (nt traadid) puhul. Tänapäeval veel pisut robustne kokkupõrke ärahoidmissüsteem koos reaajas ümbritseva ruumimudeli loomisega on kindlasti eelduseks, et tulevikus saaksid samaaegselt ja turvaliselt õhuruumi kasutada nii droonide kui mehitatud lennukite piloodid. Huvilisele on sel teemal heaks sissejuhatuseks droonidel kasutatavatest kokkupõrke ärahoidmise süsteemidest Yasin *et al* (2020) artikkel.

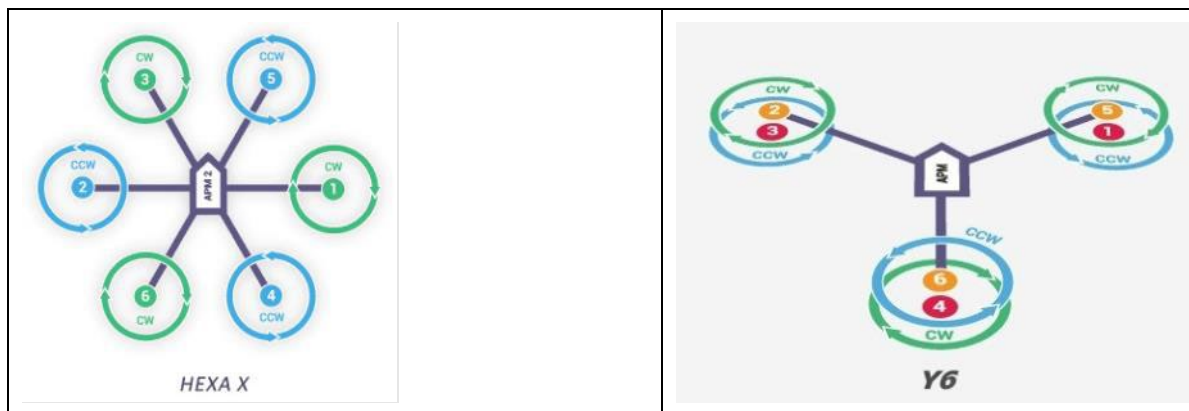
Tavaliselt liigitatakse multirootoreid rootorite arvu järgi: **birootoril** on kaks mootorit, **heksarootoril** kuus jne (Joonis 4). Teatava mõõndusega mahuvad siia hulka ka ühe suure tiiviku ja sabarootoriga **helikopterid**, mida samuti kasutatakse mehitamata kujul (Kaňuk *et al.*, 2018). Multirootoritest on kõige levinumad 4, 6 ja 8 mootoriga variandid. Drooni konstrueerimisel tuleb arvestada vastandlike parameetritega nagu keerukus, tõstejõud, lennuaeg, kaal, vastupidavus riketele (*redundancy*) jne. Nii on kõige lihtsamad, kergemad ja odavamad multirootorid reeglina nelja mootoriga ning suuremat võimsust arendavad variandid vastavalt kuue või kaheksa mootoriga. Suurem mootorite arv annab võime ka rikete puhul ikkagi õhus püsida või vähemalt kontrollitult maanduda.

Üldiselt kukub nelja mootoriga droon ühe mootori seiskumisel kivina alla. Nüüdseks suudab aga nt DJI-firma poolt toodetud kallim, nelja mootoriga droon (nt M300), ka ühe seiskunud mootoriga kontrollitult maanduda. Professionaalidele suunatud droonide puhul on heksarootori valimisel olnud aastaid põhiline argument see, et selline droon suudab ka ühe mootori seiskumisel kontrollitult maanduda; oktarootor säilitab kontrollitud maandumisvõime isegi kahe mootori seiskumisel.

Multirootorite manööverdamine toimub osade mootorite suhtelise kiirendamisega. Edasiliikumiseks suurendatakse nn tagumiste mootorite pöörlemiskiirust, mis kallutab drooni ning tekkiva tõukejõu horisontaalse komponendi tõttu hakkabki masin liikuma kallutamise suunas. Sellise manööverdamisviisiga peab arvestama juhul, kui on soov drooni peale või alla kinnitada mõni andur, sest jäiga kinnituse puhul

muutub maapinna suhtes ka anduri kaldenurk. USA-s, Berkley ülikoolis, on välja arendatud kvadrootor QUA_{RTM}, mis kallutab liikumisel ainult mootoreid (Tang *et al.*, 2022).

Mootorite paigutus raamil võib olla erinev ja tavaliselt kasutatakse sümmeetrilist paigutust. Näiteks tüüpilisel heksarootoril on kuus nn käppa võrdsete vahedega ning vaheldumisi erinevate pöörlemissuundadega propellerid (CW – *clockwise*; CCW – *counterclockwise*). Samuti võivad mootorid olla paigutatud koaksiaalselt st, et ühel käpal on kaks rootorit, mis pöörlevad vastassuundades. Koaksiaalne paigutus võimaldab drooni teha oluliselt väiksemaks ning kasutada pikemaid propellereid. Nii on võimalik ühesuuruse raamiga masinatel saavutada koaksiaalse mootorite paigutusega suurem tõstejõud kui tavalise, ühel tasapinnal paiknevate mootorite skeemiga. Mootorite koaksiaalse paigutuse miinuseks on aga propellerite müra oluline kasv ning lühenev lennuaeg, sest mootorite tekitatav turbulents muudab nende efektiivsuse väiksemaks (Joonis 3).



Joonis 2. Kaks tavalisemat heksarootori mootorite paigutusskeemi: vasakul tasapinnaline ja paremal koaksiaalne paigutus.

Mootorite paigutusskeem määrab ära ka propellerite maksimaalse läbimõõdu. Suuremad propellerid on efektiivsemad (=pikem lennuaeg), aga samas väheneb sel moel drooni manööverdusvõime, sest suurem inerts ei lase pöörlemiskiirust kiiresti muuta. Näiteks spetsiaalselt kaardistustöödeks ehitatud masinad ongi üldjuhul suuremate propelleritega, sest esmatähtis on pikendada lennuaega ja selle toel suurendada kaetavat ala. Drooni väga täpne ja kiire manööverdusvõime ei ole taolise eesmärgi puhul prioriteet. Samas võib lennumasina hea manööverdavus olla lennuajast olulisem nt filmitööstuses või akrobaatilise lennu tarvis – nendel droonidel kasutatakse väiksemaid propellereid.

Multirootorite enamlevinud sidelahendused drooni ja maapealse kontrolleri vahel kasutavad kas 2,4 või 5,8 GHz sagedusvahemikke. Tasub meeles pidada, et tootekirjeldustes esitatud sideulatused on usaldusväärsed vaid *line-of-sight* (LOS) ja muudest kasutajatest suhteliselt vabas sideruumis. Kuna 2,4 GHz on tavaline wifi-sagedus, siis on segajaid ennekõike linnakeskkonnas, kuid neid võib tavapärasest sagedamini ette tulla ka nt sidemastide läheduses. Praktikas tähendab see seda, et drooniga metsateelt õhkutõusmisel, kus tihe mets on lennu ajal kasutaja ning drooni vahel, sulab tootekirjelduses lubatud 7–8 km sideulatus tegelikkuses umbes ühe kilomeetriini. Tänapäevased droonid suudavad tuvastada vähem hõivatud sagedusvahemikke ehk kanaleid ning vajadusel hüpata sidet katkestamata ühelt kanalilt teisele (*frequency hopping*), samuti saab sidet tahtmise korral krüpteerida.

Sideulatust saab oluliselt tõsta suundantennidega, näiteks tuntud multirootorite tootja DJI loodud toodetele on sellised lisad jaemüügis saadaval. Siiski pole sideulatus tavaliselt probleem multirootorite puhul, sest nende suhteliselt lühike lennuaeg ei luba nagunii väga kaugele (ja tagasi) lennata. Müügil on

droonide juhtimist võimaldavad lisaseadmed, mis toimivad üle mobiilse andmeside (nt Sky Drone 4G lisamoodul Yuneec H520 droonile).

Multirootoreid müüakse nii integreeritud kaameraga, vahetatavate integreeritud kaameratega ja lihtsalt platvormina, kuhu kasutaja paigutab endale sobiva kandami.

Võttes arvesse eelnevat, siis:

1. **kasutusmugavuse** ja **hinna** poolest on parimad ühe integreeritud kaameraga, nn kokku volditavad droonid (nt DJI Mavic seeria, Autel Evo seeria, Parrot ANAFI);
2. **kasutusmugavuse** ja **võimsuse** poolest on parim kombinatsioon vahetatavate integreeritud kaameratega mudelid (nt DJI Matrice seeria, Yuneec H520);
3. **suurima vabaduse** annab standardne drooni platvorm, kuhu kasutaja või tootja paigaldab vajalikud lisad st andurid vms (nt Acecore Zoe, Vulcan D seeria) (vt ka Joonis 4).

Kahe esimese võimaluse puhul on tarbija üsna kindlalt lukustatud ühe tootja ühe tooteseeria külge (nt uuele versioonile üle, minnes tuleb uuendada ka akusid, kontrolleri, kaameraid jne). Kolmanda võimaluse puhul saab modulaarselt drooni uuendada, vahetades nt ainult sidesüsteemi või ostes uue võimekama anduri vanale platvormile. Selle vabadusega kaasneb aga kindlasti rohkem töötunde, mis kuluvad drooni platvormi ja andurite omavahelise suhtlemisvõime loomiseks.

 GAIA 160 Elite Hybrid Drone FOXTECH	Parrot ANAFI Ai 
DJI Mavic 3 	Acecore ZOE 

Yuneec H520



Skydio 2+



Vulcan D8



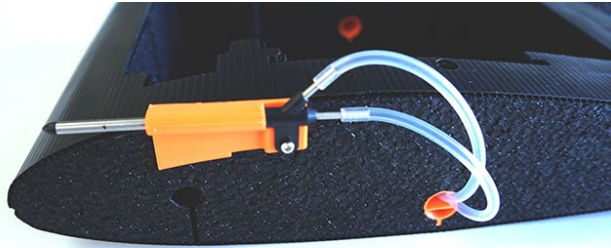
DJI Matrice 200



Joonis 3. Mõnede peatükis mainitud multirootorite pildid tootjate või edasimüüjate kodulehtedelt.

1.2 Lennukdroonid

Lennukite puhul tekitatakse tõstejõud kere külge fikseeritud tiiva kuju tõttu tekkivate rõhuerinevuste abil. Piisava tõstejõu jaoks on vaja lennukil minimaalset kiirust (*stall speed*), millest aeglasemalt liikudes ei saa lennuk enam õhus püsida. Oluline on siinjuures, et tegemist on lennukitiiva ning ümbritseva õhumassi suhtelise kiirusega – nii peab näiteks tugeva tuulega lennuki maa peale projitseeritud kiirus (*ground speed*) olema allatuult lennates oluliselt suurem:



Joonis 4. Pitot-toru

lennuki minimaalne kiirus + tuule kiirus). Samas vastutuult liikudes piisab ka väiksemast liikumiskiirusest - lennuki minimaalne kiirus miinus tuule kiirus. Seetõttu on lennukil hädavajalik spetsiaalne õhu kiirussensor e *Pitot*-toru (Joonis 1), mis mõõdab lennuki kiirust just ümbritseva õhumassi suhtes. *Pitot*-toru on lennukite puhul kriitilise tähtsusega ning vajab korralikuks toimimiseks takistamata õhuvoolu. Seetõttu on ta väga tundlik ummistumise (tolm, jää jne) suhtes ning peab

olema transpordi ajal kaetud. Samas ei tohi toru otsa kaitsekatet unustada lendamise ajaks toru peale!

Kuna lennuki tõstejõud tuleneb tiiva liikumisest õhu suhtes, siis vajavad mehitamata lennukid lendamiseks suhteliselt suurt kiirust (tüüpiliselt >10 m/s) või väga suurt tiiva pindala. Seetõttu ei sobi lennukdroonid väiksemate objektide kaardistamiseks ja manööverdamiseks kitsastes



Joonis 5. Tüürpinna liigutamiseks kasutatav mootor ja varras.

oludes. Samas on lennukdroonid energiakulu osas märgatavalt efektiivsemad võrreldes multirootoritega. Lennukdroonide lennuaeg võib olla ka LiPo akudega 1–3 tundi ja suur kiirus võimaldab lennuaja jooksul katta küllaltki suure maa-ala. Lennukdroonid on oluliselt tundlikumad tasakaalu nihkumise suhtes ja seetõttu tuleb neid lasti vahetamisel uuesti tasakaalustada. Lennu ajal toimub liikumine tiiva ja/või saba kuju muutmise kaudu, liigutades spetsiaalse mootori ja varraste abil tüürpindasid (Joonis 2).

Odavamatel seadmetel on juhtmootorid ja -vardad väljaspool lennuki raami ning seetõttu võivad transpordi käigus lahti tulla jms. Kontrolli juhtimissüsteemi korrasolekut enne lendu!

Õhku tõusmiseks vajalik kiirus antakse lennukdroonile stardihetkel, kas lennukit käest visates, spetsiaalse katapuldiga või kiirendades lennumasinat ratastel hoovõturajal. Õhkutõusmine ja maandumine on mehitamata lennukite (tegelikult kõigi lennumasinate) puhul kõige ohtlikum lennu osa, sest lennukdroon peab saavutama või kaotama suhteliselt suure kiiruse väga lühikese aja jooksul. Seetõttu on igasugused ebaõnnestumised nendes lennufaasides tihti üsna katastroofiliste tagajärgedega. Mõistlik on kasutada tuule abi: nii startima kui ka maanduma peaks alati vastutuult. Osa lennukdroone keeravad end maandumisel ka (pool)automaatselt

vastutuult, sest see aitab vähendada riski küljelt äkilisema tuulepuhangu korral tiivaotsaga vastu maad „pidurdamist“, mis lõppeb üldiselt halvasti.

Maandumiseks on tüüpilisele lennukdroonile vaja vähemalt sadakond meetrit pikka ja paarkümmend meetrit laia maandumiskoridori, mille leidmine võib olla maastikul tõsine probleem. Seda muret aitab mõneti kompenseerida lennukdrooni suurem lennuulatus: sobiv maandumispaik võib olla üsna kaugel kaardistatavast objektist.

Täiendavalt on maandumise hõlbustamiseks välja mõeldud mitmeid lahendusi:

- **ringmaandumine**, kus suurem osa kõrguse ja kiiruse kaotamisest tehakse tiireldes ümber maandumiskoha ja samaaegselt laskudes. Maandumine lõpetatakse siiski otselennul. Ringi raadius võib olla üsna suur, sest lennukid ei saa väga järsku pöörata ning seega peab ümber maandumispunkti igas suunas ja kõrguses olema piisavalt vaba ruumi.
- **automaatne maandumine**, mida juhib lennuarvuti. Selle lahenduse korralikuks toimimiseks peab lennukil olema nii *Pitot*-toru kui ka kaugussensor (tavaliselt kas laserkaugusmõõdja või ultrahelisensor). Enamik tänapäevastest lennukontrolleritest (nt Pixhawk) suudavad lennukdroonil edukalt ning järjepidevalt aidata maanduda. See aga ei lahenda küllalt pika ja laia maandumiskoridori vajadust.
- **maandumine langevarju abil**, kus lennukdrooni küljes on langevari, mida saab avada nii eelprogrammeeritud punktis või raadioside kaudu. Samuti võib seda kasutada hädamaandumiseks, kui lennuk on näiteks kaotanud juhitavuse vms. Langevari lahendab hästi suure maandumisala probleemi, kuid lennuk on langevarju avanemise järel täiesti juhitamatu ning võib näiteks tuulega kanduda puu otsa, tiiki vms. Samuti ei saa maandumist peake kangevarju avanemist enam katkestada. Langevarje paigaldatakse kallimatele droonidele ka pehmema hädamaandumise võimaldamiseks.
- **propelleriga pidurdamine**. Lennuki kiiruse kiireks vähendamiseks pannaks propeller vahetult enne maandumist korraks tagurpidi käima (nt AgEagle Ebee seeria lennukdroonid).

Vahetult enne maandumist lülitatakse mootorid välja, lennuki kere viiakse maapinnaga paralleelseks ja lennuk liugleb maapinnani. Väiksemad lennukdroonid maanduvad tavaliselt otse „kõhule“, suurematel on telikud ning rattad nagu mehitatud lennukitelgi. Väiksematele lennukitele on parim maandumispaik muruväljak, et vältida kere liiga kiiret kulumist korduvatel maandumistel ning samuti väheneb sel moel oht kahjustada kaameraid.

Tüürpindade toimimisel on võimalik piloodil aidata lennukdroonil maanduda ka vaatamata seiskunud (pea)mootorile. Samas kaotab lennumasin juhitavuse kui tüürpindade juhtimismehhanismiga midagi juhtub.

Lennukdrooni suurem lennuulatus nõuab suurema ulatusega sidesüsteeme, mille jaoks kasutatakse peale multirootoritelt juba tuttava 2,4 ja 5,8 GHz sageduse ka paremini levivaid madalamaid sagedusvahemikke. Kasutuses on 1,2–1,3 GHz, 0,87 GHz või 0,43 GHz. Sageduse mõjutavad andmete edastuskiirust. Näiteks reaajas saab droonilt mõistliku resolutsiooniga pilti edastada 1,2 GHz juures, veel madalamate sageduste ribalaiusest piisab aga ainult telemeetria edastamiseks (drooni asukoht, kiirus, kaugus, kõrgus jms).

Drooni abil mõne ala kaardistamiseks ei ole üldjuhul otseselt vaja reaajas pilti edastada, sest korjatavad andmed salvestatakse tavaliselt SD-kaardile või kõvakettale. Samas on näiteks lennumasina reaajas edastavat teavet vaja otsingu-eesmärgiga töodel. Sideulatuse suurendamiseks kasutatakse ka mõningaid lisaseadmeid. Üks tuntumaid on suundantenn (nt *Yagi*-tüüpi) koos jälitajaga (*antenna tracker*), mis hoiab antenni droonile suunatuna. Lisaks on mõningad tootjad hakanud pakkuma integreeritud 4G mobiilsidevõrgul toimivaid sidelahendusi, mis vähemalt teoorias pakuvad piiramatut sideulatust mobiilvõrgu katvuse piires. Tulevikus hakatakse seda kahtlemata üha enam kasutama, aga käesoleval hetkel on veel piiravaks teguriks nüanss, et 4G-side on hetkel optimeeritud maapealseks kasutuseks (st antennid on suunatud maapinna poole), seega võib levi nt 100 m kõrgusel olla juba kehv.

Multirootoritel on muutunud üsna tavaliseks kokkupõrke vältimissüsteemide (*obstacle avoidance*) kasutus, kuid vaatamata teadusartiklites vastavate süsteemide kirjeldustele (nt (Lin *et al.*, 2018)), lennukdroonide jaoks neid veel autorile teadaolevalt saada ei ole. Küll on lennuk- ja ka teisi droone võimalik varustada transpondritega (*ADS-B out*) või vähemalt passiivse transponder-vastuvõtjaga (*ADS-B in*), mis võimaldab lennukdroonidel olla lennujuhtidele nähtav või vähemalt märgata teise transponderiga varustatud masina lähenemist. DJI firma poolt toodetud suurematel, < 250 g kaaluvatel droonidel on see võimekus (*AirSense*) alates 2020. aastast sisse ehitatud. Mõnedel mudelitel tuleb see ise menüüst sisse lülitada, mille järel hakkab pult edastama hoiatust, kui lähedal on sisselülitatud transponderiga potentsiaalsel kokkupõrkekursil liikuv õhusõiduk.

Lennukdroonide üheks eripäraks on see, et üldiselt peab kasulik last paiknema üleni kere sees, sest igasugused „väljaulatuvad“ osad mõjuvad lennudünaamikale kehvasti ning vähendavad märkimisväärselt lennuaega. Militaar- ja otsingu-pääste valdkonnas kasutatakse vajadusel kerest sisse/välja liigutatavaid andursüsteeme (*sensor ball*). Kere sees pole aga tavaliselt kuigivõrd ruumi ning teiseks on vaja tagada kogu komplektile õige tasakaal, mistõttu on lennukdroonid tihti disainitud kandma vaid konkreetset akut ja kaamerat ning neid ei saa kergesti vahetada halvendamata sealjuures lennuomadusi.

Tõenäoliselt maailmas kõige laiemalt kasutatavad lennukdroonid on AgEagle Ebee X, millest on nii tava- kui ka multispektraal-kaameraga versioone. Mõned teised tuntumad mudelid on Trimble UX5, Delair UX11, Honecomb AgDrone ning droonide kõrgliigast leiab nt C-Astral Bramor või Delair DT26 tooteseeria (Joonis 7). Alustades lennukdrooni kasutamisega, on hea variant treenimiseks Parrot Disco. Kokkuvõtvalt peab küll mainima, et viimastel aastatel on lennukdroonide osatähtsus kindalasti vähenenud, sest nende asemele on tulnud hübriid-droonid, põimides endas nii lennuk- kui multirootor droonide paremaid omadusi.

Mehitamata lennukitest on koostanud hea eestikeelse ülevaate Janno Berg-Jürgens, kes kaitses sel teemal 2015. aastal Eesti Maaülikoolis magistritöö (Berg-Jürgens, 2015).

Multirootorite ja lennukdroonide võrdluse leiab alljärgnevast tabelist

Multirootorite eelised	Lennukdroonid eelised
Lihtne juhtimine	Pikem lennuaeg ja kiirem lend
Ühe koha peal lendamise võime	Suurtel kõrgustel ohutumad
Vertikaalne tõus ja laskumine	Vastupidavamad kehvale ilmale
Odavad ja laialt levinud	Hooldus väiksem
Multirootorite puudused	Lennukdroonide puudused
Lühem lennuaeg	Keeruline ja ohtlikum õhku tõus ja maandumine
Rohkem akusid	Vajavad oluliselt rohkem ruumi
Propellerid on ohtlikud	Keerukas lennuplaneerimine
Multirootorid on kasulikud	Lennukdroonid on kasulikud
Väiksemate ja keerulisematel aladel	Suurte alade kõrgelt katmiseks
Väiksema kogemusega pilootidele	Seadmete kasutamiseks mida mootorid häirivad
Kitsastes ja kõrge riskiga oludes	Pikka lennuaega nõudvate ülesannete täitmiseks

Trimble UX5 	DataHawk 
Ebee 	Lancaster 5 
Sentera PHX 	AGdrone 
Delair DT26 	Bramor 

Joonis 6. Mõned fotod peatükis käsitletud lennukdroonidest.

1.3 Hübriid-droonid

Multirootorite ja lennukdroonide heade omaduste kombineerimiseks on välja töötatud mitmeid hübriidvariante, mida üldiselt tuntakse hübriid- või VTOL-droonide (*vertical take-off and landing*) nimetuse all. Põhiliselt on taoliste hübriidide eesmärk kasutada multirootoritele omast vertikaalset ja aeglasemat õhkutõusmist/maandumist koos lennukdroonile omase kiire ning efektiivse lennuga. Siiski on erinevaid lahendusi väga palju ning ülevaate koos piltidega leiab huviline Saeedi ja teiste poolt kirjutatud artiklist (2018). Järgnevalt lühitutvustus mõnest levinumast ja poest ostetavast hübriidlahendusest.

Kõige lihtsam ja ilmselt ka levinum hübriid-droon on nn *quadplane*-tüüpi, kus sisuliselt on lennuk monteeritud multirootori „raamile“. Mõlemal osal on omad, konkreetsele lennufaasile optimeeritud mootorid ja propellerid. Multirootori osa sellisest masinast on aktiivne õhkutõusmisel/maandumisel ning kiirendamisel. Lennukdrooni omadused domineerivad põhilises, stabiilsemas lennufaasis. Seda tüüpi hübriid-droone on turul vast kõige rohkem erinevaid variante (nt Vertical Technologies DeltaQuad või C-Astral SQA) (Joonis 8).

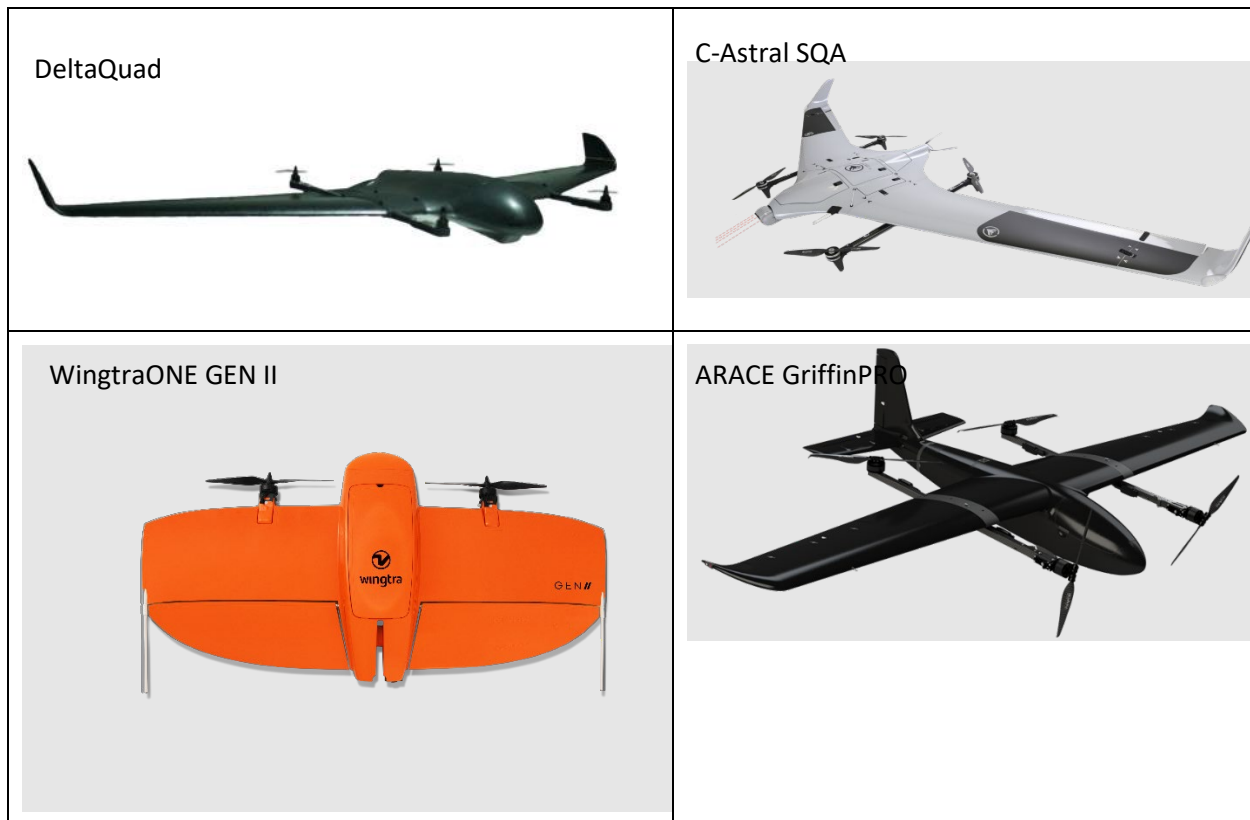
Teiste lahendustena kasutatakse hübriid-droonide juures järgmiseid variante:

- pööratakse mootoreid (*tilt-rotor*) (Autel Dragonfish või ARACE GriffinPRO);
- Pööratakse tiibu koos mootoriga (*tilt-wing*), mille kasutamine ei ole enam eriti levinud;
- terve lennuk stardib/maandub vertikaalasendis (*tail-sitter*) WingtraOne GEN II või HG Robotics Vetal);

Tänapäeva on hübriid-droonid kiiresti üle võtmas osa võimekusest ja turust, mis varasemalt oli lennukdroonide pärusmaa. Hübriidvariandid vajavad ülesannete täitmiseks vähem ruumi ning risk lennu alustamisel/lõpetamisel drooni (ja midagi muud) lõhkuda, on tunduvalt väiksem. Samuti saab hübriid-droonidega õhus ühe kohas „seista“ ja liikuda ainult mööda vertikaalsuunda.

Võrreldes hübriide lennukdroonidega, saab siiski välja tuua ka negatiivset – hübriid-droonid on tehniliselt keerukamad, mis tähendab ühtlasi kõrgemat hinda, nende lennuulatus ja -aeg on pisut väiksemad kui lennukdroonidel.

Side- ja liikumislahendused on põhimõtteliselt kombinatsioon multirootorite ja lennukite juures juba tutvustatud lahendustest.

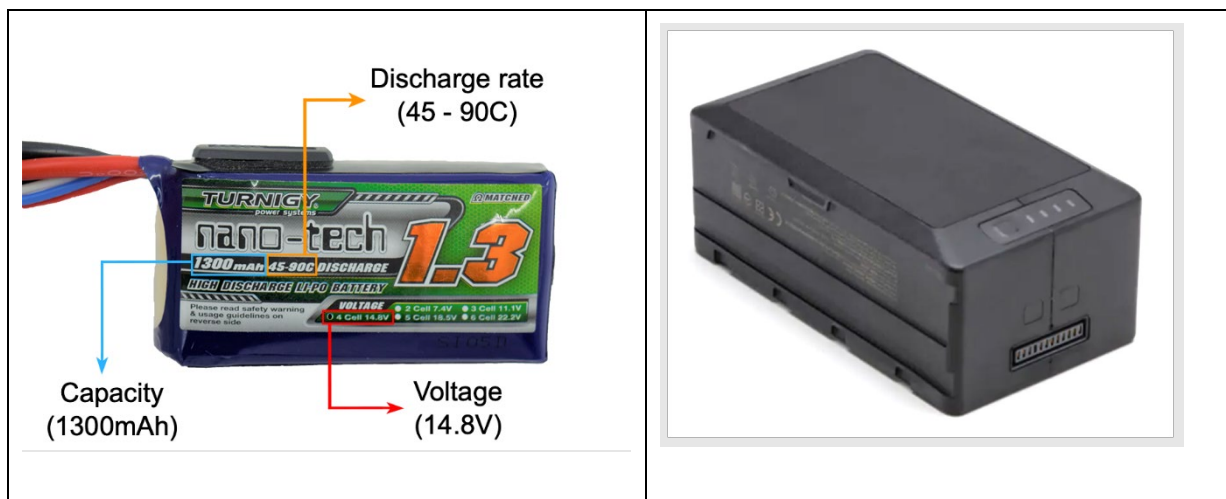


Joonis 7. Mõned fotod peatükis mainitud hübriid-droonidest, fotod tootjate kodulehtedelt.

1.4 Drooni energiaallikas – liitiumakud

Lennuaeg sõltub otseselt akutehnoloogiast (mahtuvusest) ja lennumasina kaalust. Lisaks mõjutab lennuaega oluliselt lennutamise viis, ennekõike kiirendused ja ilm (vt täpsemalt lennuplaneerimise peatükki).

Võib öelda, et akud on üks kallimaid komponente drooni juures ja ühtlasi on tegemist kulumaterjaliga, sest aku kasutuskord lüheneb tasapisi laadimise-tühjenemise tsüklite lisandumisel. Tänapäeval kasutatakse droonide energiaallikana tsiviilsektoris valdavalt liitiumpolümeerakusid (LiPo), lennukdroonidel ka liitum-ioon akusid (Joonis 9).



Joonis 8. Vasakul tavaline LiPo-aku koos tähistuse seletusega; paremal "tark" LiPo-aku DJI TB60.

Lisaks tavalisele LiPo akutehnoloogiale on kasutuses esimesed vesinikkütuseelementide abil toimivad lahendused. Sellist tehnoloogiat arendab Eestis Skycorp, kes lubab võrreldes tavaakudega *ca* 2–3 kordset lennuaega ja laadimisajaks vaid paari minutit.

Militaarvaldkonnas on täiendavalt kasutuses sisepõlemismootori, generaatori ja aku hübriidtehnoloogiad, mis võimaldavad multirootorite lennuaega pikendada 3–5 tunnini (vt näiteks Foxtech Thea). On olemas ka „juhtmega“ lahendused, kus droon saab aku asemel toidet juhtme abil maa pealt generaatorist ning saadab ka andmed läbi optilise kaabli maa peale kontrollpunkti. Sel juhul võib lennuaeg olla praktiliselt piiramatult, aga drooni liikuvus on üsna minimaalne. Tuntuim selliste lahenduste müüja on Elistair.

Hästi hoitud ja normaalselt kasutatud akud peavad vastu 200–300 kasutustsükli. Seda numbrit on aga võimalik oluliselt vähendada, kui eksida mõningate lihtsate reeglite vastu (vt Meeslespea allpool). Veelgi suurema riskiga on aga tuleohutuse eiramine. LiPo-akud sisaldavad põlevat orgaanilist lahustit ja aku mistahes põhjusel lühistamine võib kaasa tuua väga raskesti kustutatava tulekahju.

Selleks, et vähendada tuleohtu ja pikendada akude kasutusaega, on järjest enam hakanud levima nn targad akud, kus lisaks LiPo akuelementidele on veel hulganisti elektroonikat, mis mõõdab ja jälgib näiteks aku temperatuuri, sisemist takistust, laadimistsükli arvu ning rida teisi parameetreid. Täiendavalt oskavad enamik nn tarkadest akudest pikemaajalisel seisemisel ennast hoiustamispingeni tühjaks laadida. See tähendab, et nt kuu aega tagasi täis laetud akusid kiirelt kaasa krahmates, võib alles välitööl olles avastada, et lennuaega on droonil heal juhul 40–50% planeeritust.

Mõnele professionaalseks kasutamiseks mõeldud droonide akudele nagu DJI TB60 on sisseehitatud eelsoojendus, mis lubab neid akusid kasutada kuni -20 °C juures. Loomulikult kulutab see lisaenergiat ning lühendab lennuaega. Odavamatel laiatarbe-droonidel on reeglina akud eelsoojenduseta ning nende kasutamine väljaspool juhendis antud temperatuuriulatust võib kaasa tuua droonist ilma jäämise.

Akude tehnoloogiline täiustus nn eneseanalüüsi abil on muutnud LiPo-de kasutamise oluliselt ohutumaks, kuid mitte täiesti riskivabaks.

Kõige uuemaks lahenduseks on automaatsed laadimisjaamad, droonipesa ja drooni komplekt, kuhu droon ise peale missiooni lõppu tagasi pöördub ning ennast uuesti täis laeb. Sellised lahendused sobivad hästi kindla perimeetriga tööstusalade või siis näiteks torujuhtmete rutiinseks kontrolliks. Ilmselt on taoline lahendus ka üsna hea püsiseirealadel, mis asuvad kiirelt muutuvates keskkondades (nt maalihkealad, vulkaanid jms). Selliseid lahendusi on juba pakkumas mitmed firmad, ka suurim tootja DJI pakub Dock-i, kus droonipesa on integreeritud DJI M30 drooniga.

Väga huvitav areng on päikesepaneelide ja akude kombinatsiooni kasutavad ning praktiliselt juba piiramatu lennuajaga (2022 aastal lendas 64 päeva järjest!) lennukdroonid nagu Airbus Zephy.

Meelespea:

- Akusid, mis on vigastatud, sh „punnis“, ei tohi laadida täis ega tühjaks!
- Vigane või lihtsalt oma kasutusaja lõpuni jõudnud LiPo-aku on ohtlik jääde, mida ei tohi visata olmejäätmete hulka!
- Akude täis ja tühjaks laadimiseks on vaja kasutada korralikku ja balansseeritud LiPo-laadijat!
- Akude hoiustamiseks ja laadimisel on vaja kasutada tulekindlat akukotti (maksab ca 10 eurot) või metallkonteinerit, milleks sobib hästi näiteks laskemoonkast.
- Laadivaid akusid ei tohi jätta järelevalveta! Akude isesüttivad harva, aga kui see juhtub, on põleng kiire kuluga ning tuld on väga raske kustutada.
- LiPo-akusid ei tohi üle laadida (4,2 V elemendi kohta; LiHV akude puhul 4,35 V) ega täiesti tühjaks laadida (alla 3,2 V elemendi kohta). Ülelaadimine võib põhjustada plahvatuse, aku liigne tühjaks laadimine lühendab kõvasti aku eluiga/mahtuvust.
- Akude pikemaajalisel hoiustamisel (rohkem kui 3–5 päeva) on hea akud laadida 40–50% energiamahtuvuse peale (*Storage*-režiim), sest täislaetud akude pikaajaline hoiustamine vähendab nende mahtuvust/eluiga ja suurendab tuleohtlikkust.
- Hoiustamisest võetud aku on hea korraks peaaegu tühjaks laadida (10–15%) ja siis uuesti täiesti täis laadida. Seda protsessi on mõistlik korrata ca 50 lennutsükli või iga kolme kuu tagant, kui aku mahtuvust ei ole lennu jooksul ära kasutatud.
- Akude eluea lühendaja on kuumus (> 40–50 °C). Äsja kasutatud ja veel sooja akut ei tohi panna kohe laadima, sest laadimine tõstab täiendavalt aku temperatuuri!
- Akusid ei tohi jätta autosse, kuhu päike peale paistab!
- Aku temperatuuri langemisel alla 5–7 °C, väheneb aku mahtuvus oluliselt. Miinuskraadidega lendamisel on vaja akut eelsoojendada.
- Miinuskraadideni jahtunud akut on enne laadimist vaja kindlasti eelsoojendada, sest nn alajahtunud aku laadimine kahjustab seda jäädavalt!
- Drooni lennutamisel on vaja jätta aku energiamahust reservi ca 20–25% aku koguenergia mahtuvusest. Kui õhutemperatuur on alla 0°C, on mõistlik vältida drooni järske kiirendusi ja jätta reservi 30–40% aku energia kogumahtuvusest.

1.5 Positsioneerimine

Selleks, et droonidelt kogutavat teavet saaks kasutada, peab seda ruumis positsioneerima. Neid andmeid on vaja ka drooni enda asukoha jälgimisel. Selleks ülesandeks kasutatakse GNSS (*Global Navigation Satellite System*) seadmeid, mis kombineerivad erinevate riikide poolt loodud ja hooldatavaid satelliitsüsteeme nagu GPS, GLOSNASS, BEIDOU, GALILEO. Tavaliselt jääb droonidel kasutatavate geopositsioneerimise seadmete täpsus 2–5 m piiresse, mis on samas suurusjärgus nutitelefonidega. Taoliselt täpsusest üldiselt ei piisa näiteks (korduv)kaardistuste jaoks, kus oleks vajalik erinevatel aegadel tehtud ortofotod joondada sisuliselt ühe piksli täpsusega – tüüpiliselt < 10 cm.

Kõige levinum viis vajaliku täpsuse saavutamiseks ja hiljem ka kontrollimiseks on kasutada maapealseid referentspunkte. Viimati nimetatud jagunevad omakorda sõlm- ja kontrollpunktideks (vt peatükk 4.4) ja nende koordinaadid mõõdetakse vajalikku täpsust võimaldava mõõteriistaga, tavaliselt täppisGNSS seadmega. Sõlmpunkte kasutatakse andmete, näiteks ortofoto täpsemaks georefereerimiseks ja kontrollpunkte, et iseloomustada vigu. Põhimõtteliselt peab referentspunkt olema märgitud maastikul nõnda, et ta oleks andmetest üheselt äratuntav – fotode jaoks kasutatakse näiteks värviga markeerimist, LiDAR-tööde puhul kindla kujuga markereid, termotööl alumiiniummarkereid, mis peegeldavad külma taevast jne. Hea tulemuse saamiseks peavad sellised punktid paiknema ühtlaselt üle kaardistatava ala, nende arv sõltub konkreetse ülesande jaoks vajalikust täpsusastmest. Tuleb pidada silmas, et lisaks plaanilisele katvusele, peab arvestama ka referentspunktide ühtlase vertikaalse jaotusega. Ortofotode toomisel on soovituslik märkida üks referentspunkt 1–10 miljoni piksli kohta (Singh ja Frazier, 2018). Tihtilugu on kontrollpunktide mahamärkimine ja mõõdistamine kõige ajamahukam osa droonipõhisel kaardistamisel.

Alates 2018. aastast jõudsid laiemalt turule droonidele mõeldud täpsemad GNSS-seadmed, mille täpsusklass (1–5 cm plaaniliselt, <10 cm vertikaalselt) on juba piisav enamike tööde puhul andmete otseseks georefereerimiseks (*direct georeferencing*). Nende kasutamisel saab juba droonilt tehtud üksikud fotod või laserskanneri puhul andmepunktid georefereerida vajaliku täpsusega ning vajaminevate maapealsete sõlmpunktide arv langeb oluliselt või kaob isegi täielikult. Täpsuse kontrolliks on sõltumatuid kontrollpunkte siiski vaja, aga kuna täpsushinnangud käivad kaasas nüüd juba iga fotoga, siis piisab üldjuhul vaid paarist kontrollpunktist.

Valdavalt kasutatakse praegusel ajal kahte täppisGNSS lahendust: **PPK** (*Post Processed Kinematic*) ja **RTK** (*Real Time Kinematic*). Mõlema puhul on vajalik kahe samaaegselt töötava GNSS-anduri olemasolu, kusjuures üks nendest paikneb droonil ja teine on paigalseisev e staatiline baasjaam kuskil läheduses. Need kaks seadet peavad ruumis paiknema võimalikult lähestikku, et nad saaksid signaale samadelt satelliitidelt ning atmosfääriolud oleksid võimalikult sarnased. Kahe GNSS-seadme vahekaugusest (*baseline*) sõltub lõpliku georefereerimise täpsus: näiteks iseloomustatakse RTK mooduli puhul täpsust kujul „1.5 cm + 1 ppm“. Sealjuures „1.5 cm“ on viga igal juhul aga „+1 ppm“ tähendab, et drooni ja baasjaama vahekauguse iga kümne kilomeetri kohta kasvab viga ühe sentimeetri võrra.

Maapealse, staatilise baasjaamana võib kasutada iseenda teist GNSS-vastuvõtjat või kasutatakse kuskil kaugemal asuva püsijaama andmeid, millelt saadakse GNSS parand üle mobiilse andmeside või on andmed hiljem võrgust alla laetavad. Püsijaamadest on loodud võrgud (CORS - *Continuously Operating Reference Station*), mis on olemas enamikus Euroopa riikides, Selline võrgustik annab võimaluse arvutuslikult tekitada püsijaamade vahele virtuaalset baasjaama (VRS - *Virtual Base Station*), et vähendada baasjaama ja drooni vahekaugust võrreldes reaalse püsijaamaga. Eestis on riigi poolt hallatav 27 püsijaamast koosnev võrk, mis pakub ESTPOS-i nime all GNSS parandi jagamise teenust. Lisaks on Eestis veel mitu eraettevõtete (nt Trimble, Hades jne) poolt hallatavat püsijaamade võrku.

PPK lahenduse puhul toimub täpsete koordinaatide arvutamine peale lendu, RTK puhul aga reaalajas. Seega on RTK kasutamise puhul vajalik pidev kahepoolne side drooni ja maapealse kontrolleri ja püsijaama võrgu vahel. Kontrolleri ja drooni vaheliseks suhtluseks kasutatakse telemeetria jaoks mõeldud sidekanalit. Samas on pideva side tagamine kogu lennu ajal mõningatel juhtudel problemaatiline. PPK lahenduse korral salvestatakse üheaegselt mõlema GNSS-andmed ja koordinaatide parandamine tehakse hiljem arvutis. Sellisel juhul on kasutajal oluliselt suurem paindlikkus arvustuskeemide valimisel ja lisaks saab ka vigu täpsemalt analüüsida. Nii peetakse PPK süsteemi mõneti töökindlamaks aga võrreldes RTK-ga on see töömahukam. Samas üks ei välista teist: ka vaikimisi töötava RTK korral saab tavaliselt GNSS-andmed salvestada ning vajadusel teha nende abil hiljem PPK töötlus.

Nii PPK- kui ka RTK-lahendusi on võrreldud maapealsete referentpunktide meetodiga. Nende katsete tulemusena selgus, et fotode täpsemad asukohad (Stöcker *et al* 2017; Turner *et al* 2014) koos kaamera kalibreerimisega (Carbonneau ja Dietrich, 2017) võimaldavad tõesti saavutada vajaliku täpsuse (peaaegu) ilma aeganõudva referentspunktide märkimiseta. 2022. aastal on professionaalseks kasutuseks mõeldud droonid praktiliselt kõik RTK- ja/või PPK-võimekusega, lisaks saab vanematele droonidele juurde lisada PPK-lisamooduleid (nt Emlid Reach või Topodrone tooted). Mõlema täppisGNSS-lahenduse puhul on vajalik fikseerida täpne foto tegemise hetk – selleks kasutatakse tavaliselt välgu hoidjasse (*hotshoe*) käivat lisaseadet.

2 Kasutatud kirjandus

- Carbonneau, P. E., & Dietrich, J. T. (2017). Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: Implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(3), 473–486. <https://doi.org/10.1002/esp.4012>
- Kaňuk, J., Gallay, M., Eck, C., Zraggen, C., & Dvorný, E. (2018). Technical Report: Unmanned Helicopter Solution for Survey-Grade Lidar and Hyperspectral Mapping. *Pure and Applied Geophysics*, 175(9), 3357–3373. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1873-2>
- Lin, Z., Castano, L., & Xu, H. (2018). A Fast Obstacle Collision Avoidance Algorithm for Fixed Wing UAS. *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 559–568. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2018.8453307>
- Saeed, A. S., Younes, A. B., Cai, C., & Cai, G. (2018). A survey of hybrid Unmanned Aerial Vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 98, 91–105. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.03.007>
- Singh, K. K., & Frazier, A. E. (2018). A meta-analysis and review of unmanned aircraft system (UAS) imagery for terrestrial applications. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15–16), 5078–5098. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1420941>
- Stöcker, C., Nex, F., Koeva, M., & Gerke, M. (2017). QUALITY ASSESSMENT OF COMBINED IMU/GNSS DATA FOR DIRECT GEOREFERENCING IN THE CONTEXT OF UAV-BASED MAPPING. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W6, 355–361. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-355-2017>
- Tang, J., Jain, K. P., & Mueller, M. W. (2022). QUaRTM: A Quadcopter with Unactuated Rotor Tilting Mechanism capable of faster, more agile, and more efficient flight. *Frontiers in Robotics and AI*, 9, 1033715. <https://doi.org/10.3389/frobt.2022.1033715>
- Turner, D., Lucieer, A., & Wallace, L. (2014). Direct Georeferencing of Ultrahigh-Resolution UAV Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5), 2738–2745. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2265295>