



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Anyagmozgatási és Logisztikai Rendszerek Tanszék

TDK DOLGOZAT

*Forgalomszervezési stratégiák drónokkal
támogatott tömeges áruszállítási feladatok
esetén*

Készítette:
Kovács Dóra
Kovács Petra

Konzulens:
Dr. Bóna Krisztián

2023.

Tartalomjegyzék

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | Bevezető, kutatási motivációk | 4 |
| 2. | A drónok logisztikai alkalmazásának jelenlegi helyzete | 7 |
| 2.1. | A logisztikai operációt befolyásoló jogi szabályozások [1] | 7 |
| 2.1.1. | A drónokkal végzett műveletek kategóriái | 7 |
| 2.1.2. | A légtérhasználat szabályai | 9 |
| 2.1.3. | Eseti légtér igénylése | 9 |
| 2.1.4. | Egyéb jogi szabályozások | 9 |
| 2.2. | Drónok jelenlegi logisztikai alkalmazása | 10 |
| 2.2.1. | Lehetőségek a last mile szállításban | 10 |
| 2.2.2. | Működő dróntechnológiai megoldások az utolsó mérföldes szállításban | 11 |
| 2.3. | A drónok technológiai jellemzői [18] | 13 |
| 2.3.2. | Egyéb csoportosítások | 14 |
| 2.3.3. | Az alkalmazott szenzorok [20] | 15 |
| 2.4. | Az UTM rendszerek [21] | 17 |
| 3. | Rajszerű mozgások elemzése terén elért eddigi kutatási eredmények | 19 |
| 3.1. | Mozgás rajokban az élővilágban [23] [24] [25] | 19 |
| 3.2. | A rajszerű mozgások modellezése..... | 20 |
| 3.3. | Kihívások a rajszerű mozgásokkal kapcsolatban | 23 |
| 3.4. | Drónrajok mozgásszervezése egy lehetséges áruszállítási operáció során | 24 |
| 4. | Egy rajszerű elven működő forgalomszervezési modell | 26 |
| 4.1. | Működési peremfeltételek és az elképzelt munkafolyamat..... | 26 |
| 4.2. | A forgalom szervezésének egyes lépései..... | 27 |
| 4.2.1. | A szortírozott csomagok adatainak feldolgozása | 27 |
| 4.2.2. | A csomagok hozzárendelése a drónokhoz és a csomagautomatákhoz..... | 28 |
| 4.2.3. | A drónok rajokba csoportosítása az aktuális kiszállítási feladatok alapján | 32 |
| 4.2.4. | A drónraj elindítása | 33 |

| | | |
|---------|---|----|
| 4.2.5. | Összehangolt repülés a szétválási pontig | 36 |
| 4.2.6. | A drónok leválása a rajból a szétválási ponton | 40 |
| 4.2.7. | A drónok önálló repülése a kijelölt csomagautomatáig | 40 |
| 4.2.8. | A csomagok bekerülése a csomagautomatába | 43 |
| 4.2.9. | A drónok önálló repülése a találkozási pontig | 44 |
| 4.2.10. | Új rajba szerveződés a találkozási ponton | 46 |
| 4.2.11. | A raj összehangolt repülése vissza a depóba..... | 47 |
| 4.2.12. | A drónok érkezésének kezelése a depóban | 48 |
| 4.3. | Lehetséges döntéstámogató modellek a felmerülő problémákra (példák) | 49 |
| 4.3.1. | A depók elhelyezése és a körzetek kialakítása..... | 49 |
| 4.3.2. | A drónrajok létrehozásának támogatása az aktuális kiszállítási feladatok alapján | 51 |
| 4.3.3. | Várakozási idők csökkentése sorállás esetén | 55 |
| 5. | Kitekintés és összegzés..... | 59 |
| 5.1 | A modell megvalósításához szükséges fejlesztési területek | 59 |
| 5.2. | Összegzés..... | 60 |
| | Ábrajegyzék..... | 61 |
| | Táblázatjegyzék..... | 62 |
| | Hivatkozások | 63 |
| | Melléklet..... | 66 |

1. Bevezető, kutatási motivációk

Napjainkban az egy nap alatt kiszállítandó árumennyiség folyamatosan növekszik, amit jelenleg többnyire közúton juttatnak el a felhasználókhoz, ezzel jelentős terhelést okozva a közforgalmú közlekedési infrastruktúrának. A nagyvárosokban felmerülhet a kérdés, hogy ez a mennyiség meddig növekedhet úgy, hogy a kiszállítás megfelelő szolgáltatási szint mellett elvégezhető legyen úgy, hogy közben ne bénuljon meg a forgalom, valamint ne terheljük túl az amúgy már jelenleg is túlterhelt logisztikai infrastruktúrát, a káros környezeti hatásokról már nem is beszélve. Bár még távolinak tűnik 2035, de az uniós tagállamok megszavazták, hogy attól az évtől kezdve nem lehet belső égésű motorokkal felszerelt járműveket értékesíteni. Ez a legtöbb komplex logisztikai szolgáltatást nyújtó cégnek valószínűleg nehézségeket fog okozni, hiszen jelenleg az elektromos meghajtással működő járművek hatótávolsága igencsak alacsony és jelenleg nem tudhatjuk, hogy 10 év alatt ezt milyen szintre lehet fejleszteni. Több alternatívát is vizsgáltak már a klasszikus közúti járművek kiváltására. A jelenlegi kutatási és gyakorlati eredmények azt mutatják, hogy ezek közül az alternatívák közül reálisnak tűnik a drónok alkalmazása bizonyos specifikus tulajdonságú kiscsomagok kiszállítására, azonban ez hosszabb távon csak úgy lehet hatékony, ha egyszerre több eszközt alkalmazunk, azaz tömegesen vagyunk képesek ilyen jellegű szállítási tranzakciókat megvalósítani ezeknek az eszközöknek az alkalmazásával. Mintarendszer szinten több elgondolás is megvalósult már arra vonatkozóan, hogy egy-egy drón hogyan tud egy adott helyről egy másikra egy-egy specifikus tulajdonságú kiscsomagot eljuttatni, azonban relatíve keveset foglalkoztak a drónok tömeges alkalmazásának kérdéskörével, ami további még fel nem tárt és meg nem válaszolt kérdésköröket vet fel.

Dolgozatunkban arra keressük a megoldást, hogy néhány évtized múlva, amikor feltehetően már minden CEP (Courier Express Parcel) területen tevékenykedő, csomagszállítással foglalkozó komplex logisztikai szolgáltató (operátor) fog UAV-eket (Unmanned Aerial Vehicle), köznapi nevén drónokat alkalmazni az ellátási lánc last mile szakaszában a küldemények továbbításában, hogyan oldható meg a forgalomszervezés kérdése. Forgalomszervezés alatt olyan keretrendszert, szabályokat, algoritmusokat és applikációkat értünk, melyekkel elérhető, hogy a pilóta nélküli légi járművek biztonságosan el tudják látni a szállítási feladatokat anélkül, hogy saját magukban, egy másik drónban, az emberekben vagy éppen a szállítandó csomagban kárt tennének. Mindezt olyan módon, hogy az általuk elvégzendő szállítási feladatok meghatározása, diszponálása és ütemezése során egy előre meghatározott optimalizálási szempontrendszert veszünk figyelembe, amely az operátor és az UAV légiforgalom központi

irányítását megvalósító menedzser (UTM – UAV Traffic Management) szempontjait is integrálni tudja.

De hogyan fog tudni egyszerre több száz vagy akár ezer drón közlekedni egymás akadályozása nélkül ugyanazt a légteret használva? Ha feltesszük, hogy két drón képes felismerni egymást, mi alapján hoznak majd döntést, hogy hogyan kerüljék ki egymást és melyiknek lesz prioritása? És ha nem csak két repülő objektumról van szó, akkor hogyan tudjuk elkerülni a káoszt? Világos, hogy a repülő objektumoknak vélhetően bizonyos fokú intelligenciával kell majd rendelkezniük a kritikus helyzetek elkerülése és kezelése érdekében. Mindemellett fontos szerep hárul a fentebb már említett UTM rendszerekre is a forgalom levezénylése, koordinálása és nyomon követése kapcsán, illetve további kérdés lehet az ember szerepének meghatározása ezekben a komplex rendszerekben, különös tekintettel a döntési helyzetekre, illetve a rendszer működtetése, működésének ellenőrzése tekintetében.

A tapasztalatok azt mutatják, hogy minden komplex probléma esetében érdemes lehet kicsit távolabbról szemlélni, illetve egy kissé tágabb értelemben vizsgálni a feltett kérdéseket. Számos esetben segített ez a gondolkodásmód már igen bonyolult helyzetek megoldásában. Ennek egyik érdekes példája, amikor a tudósok élővilágban előforduló jelenségeket azonosítottak, illetve hasonlítottak egy-egy bonyolult problémához, és igyekeztek feltárni, illetve megérteni a tapasztalható jelenség mibenlétét, szabályszerűségeit, melyeket hasznosítottak a bonyolult problémák megoldásában. Ennek analógiájára a drónok mozgásának támogatásában is azonosítható egy ilyen természetben előforduló jelenség, ami nem más, mint a rajszerű mozgás. A természetben számtalan faj rajokba rendeződve mozog, aminek az okai és előnyei mára többnyire már érthetőek, bár még számos megválaszolandó kérdés van ezen a területen is. A különböző fajok egyedei különböző alakzatokat vesznek fel mozgás közben különböző okokból kifolyólag. Hipotézisünk szerint egy-egy drónfelhőnek (azaz több drónból álló, különböző szállítási feladatokat megvalósító repülő objektumok halmazának) kezelésében is nyertes stratégia lehet a rajszerű forgalomszervezési logikák alkalmazása. Bár számos élőlénynek ez a fajta mozgás a génjeiben van, a drónoknak azonban ezt meg kell tanítani, kommunikálniuk kell egymással és össze kell hangolniuk a mozgásukat, illetve további számos megválaszolatlan kérdést (pl. rajok mérete, rajalkotási szabályok, csatlakozási-kiválási problémák stb.) kell kezelni a rajszerű mozgások realizálása során. Hogy mindez ne csak egy ötlet legyen, érezhető, hogy sok múlhat a jövőben a technológiai és szervezési megoldásokon, hogy mindezt meg lehet-e valósítani, és ha meg lehet, akkor milyen hatékonysággal és milyen színvonalon lehet kivitelezni.

Célunk elsőként az ötlet körbejárása, azaz annak több szempontból történő megvizsgálása, hogy van-e, lehet-e a jövőben realitása a rajszerű mozgásokon alapuló forgalomszervezésnek a drónokkal megvalósított tömeges szállítási feladatok esetében. Másfelől amennyiben az előző kérdésre igennel tudunk válaszolni, akkor célul tűzzük ki, hogy felkutassunk olyan lehetséges algoritmizálható forgalomszervezési modelleket, amelyekkel támogathatjuk a drónokkal megvalósított rajszerű mozgásokon alapuló tömeges áruszállítást.

A vizsgálatok során nem megkerülhetők a drónok alkalmazásával kapcsolatos jogszabályi kérdések sem. Fontos azonban megjegyezni, hogy a jelenleg ismert jogszabályi környezet a jelenlegi állapot tekintetében ad keretet a működésnek, és nem tudhatjuk, hogy néhány év, vagy évtized múlva ennek milyen lesz az aktuális állapota. Feltételezzük, hogy az idő előrehaladtával, a technológiai feltételek változásával, annak fejlődésével a jogszabályi környezet is előnyösen (a drónok alkalmazását támogató módon) fog változni. Emiatt a jelenlegi vizsgálataink során az aktuális szabályozásokat bár elemezzük, de a fejlesztési lehetőségek meghatározása során azoktól részint eltekintünk, és feltételezünk egy olyan környezetet, ahol minden jogi körülmény adott ahhoz, hogy a drónok a megfelelő műveleteket akár autonóm módon is elvégezhessék.

Dolgozatunkban megvizsgáljuk tehát, hogy jelenleg milyen jogi szabályozások vannak érvényben, hol használták eddig a drónokat a logisztikában, milyen modellek és gondolatok születtek ezzel kapcsolatban, illetve az előbb említett rajrepülés témakörét is körbejárjuk. Végül pedig megfogalmazzunk olyan szervezési stratégiákat, modelleket, illetve legfőképp az ezekkel kapcsolatos kihívásokat, melyek megalapozhatják a drónokkal történő tömeges áruszállítás lehetőségét.

2. A drónok logisztikai alkalmazásának jelenlegi helyzete

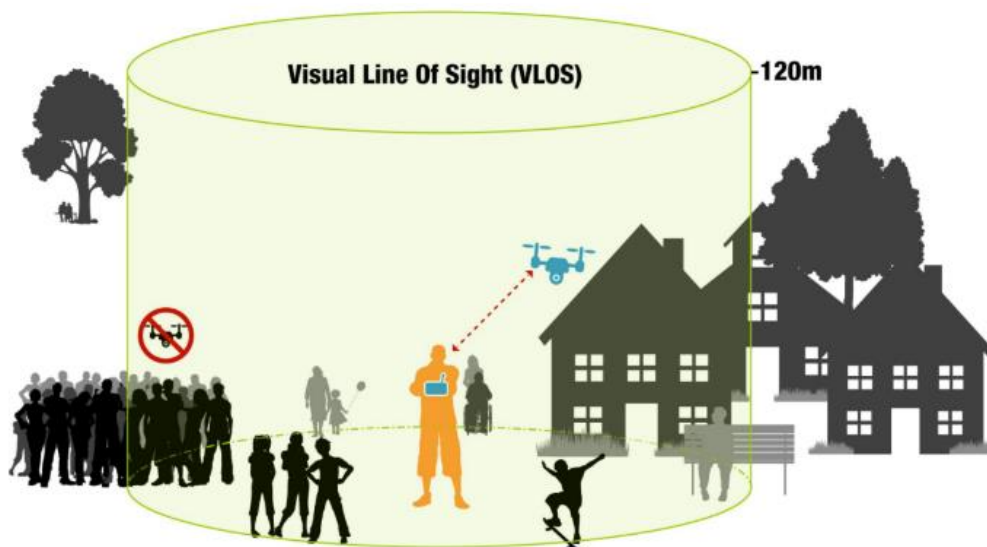
2.1. A logisztikai operációt befolyásoló jogi szabályozások [1]

Bevezetőnkben kifejtettük, hogy miért lenne jó drónokat alkalmazni a kisebb csomagok szállításánál. Ehhez viszont fontos megvizsgálnunk, hogy jelenleg milyen jogi szabályozások vannak érvényben, amik esetleg gátat szabnak vagy segítenek egy biztonságos mederben tartani későbbi elképzeléseinket.

Mindenekelőtt fontos tisztázni, hogy drón törvény önmagában nem létezik, az ezzel kapcsolatos szabályokat a légi közlekedésről szóló törvény tartalmazza. Az EU rendeletei keretet adtak a drónokkal kapcsolatos műveletek szabályozásának kidolgozásához, melyeknél a tagállamok szigorúbb szabályokat is bevezethetnek. A szabályokkal egyértelműen a biztonságos drónhasználatot szeretné a jogalkotó biztosítani. Napjainkban a „drón” kifejezést használjuk, ám a hivatalos elnevezése ezeknek a szerkezeteknek UAV (Unmanned Aerial Vehicle), azaz pilóta nélküli légi jármű. Az UAV egy EU-s rendelet meghatározása alapján bármely olyan légi jármű, amely a fedélzetén tartózkodó pilóta nélkül üzemel, vagy amelyet ilyen üzemmódra terveztek, emellett önálló vagy távirányítással történő üzemelésre képes. Ezek alapján drónnak minősülnek a multitoros és merevszárnyú távvezérlésű eszközök, a helyből felszálló drónok, de a nagyon kisméretű, kamera nélküli játékok is.

2.1.1. A drónokkal végzett műveletek kategóriái

Annak függvényében, hogy a drónt alkalmazó felhasználó milyen típusú drónt, hol és milyen feladatra szeretne alkalmazni, eltérő szabályok vonatkoznak az operációra. A jogszabály három kategóriát különböztet meg: nyílt (1. ábra), speciális és engedélyköteles (1. táblázat).



1. ábra: A nyílt kategória feltételei vizuálisan szemléltetve [2]

1. táblázat: A drónokkal végzett műveleti kategóriák

| Kategória neve | Kategória feltételei |
|-----------------|--|
| Nyílt | <ul style="list-style-type: none"> • a drón legfeljebb 120 méterre távolodhat el a föld legközelebbi pontjától • az irányítónak segédeszköz nélkül folyamatosan látástávolságon belül kell tartania a drónt (VLOS¹ repülés) • embertömeg felett tilos repülni • No Drone Zone (drónmentes) légterek elkerülése |
| Speciális | <ul style="list-style-type: none"> • a drón 25 kg-nál nagyobb • speciális célfeladatok végrehajtása (pl. vonalas létesítmény felmérése), tehát nem látható szabad szemmel a drón az egész művelet során (BVLOS² repülés) • speciális művelethez tartozó repülési engedély beszerzése • kockázatelemzés szükséges az üzemeltető részéről |
| Engedélyköteles | <ul style="list-style-type: none"> • embertömeg feletti repülés • veszélyes áru vagy személyszállítás • egyedi eljárások kidolgozása • mély elméleti és gyakorlati ismeretek elsajátítása szükséges • a drónt hatósági tanúsítás alá kell vetni |

Összességében úgy gondoljuk, hogy a **speciális** és az **engedélyköteles** kategóriák szabályrendszerét **ötvözve** lehetne egy új kategóriát megalkotni, ami ellenőrzi mind a drón, mind a szállítási operáció paramétereit, illetve menetét. Ügyelve arra, hogy az engedélykérek folyamata is gördülékenyen tudjon működni viszonylag rövid idő alatt, továbbá az operációk lebonyolításának ellenőrzése is biztosított legyen, amelynek alapfeltétele egy korrekt **forgalomszervezés** és **forgalomirányítás** megléte.

¹ VLOS = Visual Line Of Sight

² BVLOS = Beyond Visual Line Of Sight

2.1.2. A légtérhasználat szabályai

Sokan nem gondolnák, de már akkor is légtérhasználatról beszélünk, ha 1 méteres magasságba emelkedik fel a drón. Lakott területen belül csak **eseti légtér foglalása** esetén lehet drónnal repülési műveletet végezni. Lakott területen kívül nem kötelező eseti légtér igénylése a műveletekhez, azonban figyelni kell, mert vannak olyan légtérrészek, ahol tilos a drónhasználat, ezek a „**No Drone Zone**” légterek. Fontos továbbá betartani, hogy a drónt működtető távpilótának **elsőbbiséget kell adnia** minden légi jármű számára és biztosítani kell a megfelelő elkülönítést. A „No Drone Zone” légtereknek két fajtája van, az egyik esetében **mindig tilos** a drónokkal történő repülési művelet végzése (kivéve eseti légtér engedély esetén). Ilyen korlátozás van például kiemelten fontos létesítmények közvetlen közelében. A másik eset, amikor csak egy **bizonyos időszakban korlátozott** a légtérhasználat, például baleset vagy rendezvény esetén. Ezen korlátozások ellenőrzésére Magyarországon a drónpilóták segítségével van egy **applikáció** [3], melynek letöltése egyúttal kötelező is. Az applikáción keresztül be tudja jelenteni a drónpilóta a tevékenységet, ezzel is bizonyítva, hogy ellenőrizte a légtérhasználat lehetőségét.

2.1.3. Eseti légtér igénylése

A légtérhasználat szabályainál megemlítettük, hogy a lakott területen belüli drónhasználatához eseti légtér igénylése szükséges. Az eseti légtér Magyarországon **legfeljebb 7 napra** igényelhető, valamint nyilatkozni kell a **művelet típusáról** is. Érdekesség azonban, hogy nincs szabályozás arra, hogy egymás után közvetlenül hány alkalommal lehet légtér igényelni. Tehát a felhasználók nyugodtan igényelhetnek 7 napos periódusokban folyamatosan légtér igénylést. Az eseti légtér igénylése esetében alkalmazható **prioritás**, melynél elsőbbiséget élvez valamely állami szerv feladatának végrehajtása, ezt követi a gazdasági célú, végül a szabadidős célú felhasználás. Ezt az igényt **30 nappal a légtér igénybevétele előtt** kell benyújtani a Honvédelmi Minisztérium Állami Légügyi Főosztálya számára. Világosan látszódik, hogy ebben a formában ezek a szabályok is **jelentős korlátozó feltételeket jelenthetnek** a drónokkal történő áruszállítási műveletek megvalósítása során.

2.1.4. Egyéb jogi szabályozások

A legfontosabb szabályozásokra már kitértünk, azonban mielőtt egy drónnal repülési műveleteket hajtana végre egy felhasználó, számos megelőző intézkedést kell végrehajtani. A drónok használatának ugyanis nem csak annyi feltétele van, hogy a felhasználó tartsa be a rá vonatkozó kategória szabályait, hanem minden **nem játéknak minősülő drónt regisztrálni kell**. Sőt, nem csak az eszközt kell regisztrálni, hanem minden olyan **magán- vagy jogi**

személynek regisztrálnia kell magát, aki játéktól eltérő eszközt működtet. Játéknak minősül az a pilóta nélküli légitánc, melynek tömege nem haladja meg a 120 grammot, nem rendelkezik adatrögzítővel, valamint a távpilótától legfeljebb 100 méterre képes eltávolodni. Fontos kiemelni, hogy az alábbi négy szempont közül elég csak az egyiket megsérteni ahhoz, hogy regisztráció kötelező legyen a drón használata.

A nyílt kategórián belül **A1**, **A2** és **A3** alkategóriát különböztetünk meg a drón osztályától függően. Emellett a tömegük alapján további alkategóriákba sorolhatóak a drónok (2. ábra).



2. ábra: Az egyes alkategóriák a nyílt kategórián belül [4]

A drón regisztrálása, a megfelelő kategóriába sorolás és a szükséges engedély megszerzése után további feladatok vannak hátra a szabályos drónhasználathoz. Elsőre úgy tűnhet, hogy egy „hobby drónt” nem nehéz irányítani, azonban komoly ismeretek szükségesek, ha szabályosan szeretnénk eljárni a használat során. Ehhez egy **online képzés** elvégzése szükséges, amely **vizsgával** [5] zárul. Többek között repülésbiztonságból, légtérkorlátozásokból, légiközlekedés szabályozásából kell számot adniuk a vizsgázóknak. Emellett bármennyire is sajátította el valaki kívülről belülről a vizsga anyagát, bármikor történhetnek balesetek, ezért a drónos műveletekhez **felelősségbiztosítással** kell rendelkezni, amely a **drón tömegéhez kötött**, ám 250 gramm alatti drónok esetében nem kötelező. A drón maximális felszállótömege alapján vannak meghatározva a különböző biztosítási kategóriák.

2.2. Drónok jelenlegi logisztikai alkalmazása

2.2.1. Lehetőségek a last mile szállításban

Az e-kereskedelem fellendülésével egyre összetettebb kérdéskör lett a last mile (utolsó mérföldes) szállítási tranzakciók megoldása. Ezen a területen nagy lehetőségek mutatkoznak a

pilóta nélküli járművek alkalmazásával kapcsolatban, hiszen hatékonyságuk mellett egy fenntarthatóbb, zöldebb lehetőséget kínálnak. A csomagok feladótól címzettig (azaz a feladóhelyekről a leadóhelyekre) való szállítása során sokféle járművet vehetnek igénybe az operátorok. Az e-kereskedelem meglehetősen nagyméretű logisztikai hálózatok működtetését igényli, hiszen a web-alapú értékesítésnek köszönhetően a világ legtávolabbi pontjain elhelyezkedő kereskedőktől is képesek vagyunk termékeket rendelni. Emiatt a hálózatok vertikális és horizontális kiterjedése nagy kihívást jelent a hálózati csomópontok közötti szállítási kapcsolatok realizálása tekintetében. Ezen kihívások kezelése érdekében tengeren például különböző hajókat, a levegőben repülőgépeket, szárazföldön pedig a vasúti, illetve közúti járműveket alkalmaznak. A végpontok közelébe érve az utolsó mérföldes szállítási műveleteket többnyire közúti járművekkel oldják meg az operátorok. Jellegéből adódóan a last mile szállítások alapvetően a városokhoz köthetők, így a city logisztikában jelentenek komoly kihívást. Ezzel kapcsolatban azonban merülnek fel akadályok, korlátok. Például bizonyos vidéki régiókban előfordulhatnak nehezen elérhető helyek, forgalmi dugók miatt jelentős késéssel kell számolni és nem elhanyagolható a üzemanyag fogyasztás sem, ami a levegő szennyezéséhez vezet. Mindemellett a rakodási műveletek megvalósítása során a városokban parkolóhelyeket és egyéb területeket (akár konkrét forgalmi sávokat) foglalnak el hosszabb-rövidebb időre a járművek, ami a forgalom akadályozását is eredményezheti.

Az operátorok az elmúlt években különféle tesztek és vizsgálatok eredményei alapján úgy ítélték meg, hogy a kihívások kezelésében reális alternatívának tűnhetnek a drónok. Gyorsaságuk, sebességük egyértelmű előnyként jelentkezik, egyúttal rövidebb utakat megtéve képesek eljutni a célpontokra a közúti járművekkel szemben. A drónok segítségével a csomaglogisztikával foglalkozó vállalatok így több szállítási tranzakciót lehetnek képesek végrehajtani, ezáltal bevétel növekedésre számíthatnak. Azonban a pilóta nélküli járművek alkalmazása is számos kihívással jár, ilyen például többek között a drónos szállításra alkalmas csomagok megválasztása, alkalmas csomagolótechnológiai megoldások fejlesztése, a megfelelő drón és a ráhelyezhető tárolókonténer kiválasztása, a forgalomszervezés, az útvonaltervezés és depók elhelyezése, a depók logisztikai technológiája stb.

2.2.2. Működő dróntechnológiai megoldások az utolsó mérföldes szállításban

Az elmúlt években számos, addig csak tesztelt rendszer bevezetésre került néhány ország életében. Ezek a logisztikai, áruszállítási megoldások működőképeseek, rendelkeznek az adott helyen szükséges engedélyekkel és használják a mindennapokban. Sok esetben vidéki környezetben alkalmazzák, azonban néhány megoldás már nagyvárosban is bizonyított.

Az eddigi jelentősebb koncepciókat egy táblázatban foglaltuk össze (1. melléklet), amiben összegyűjtöttük a rendszerekről ismert legfontosabb információkat [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16]. A szállított anyagok jellegét tekintve négy kategóriát hozhatunk létre. Számos esetben csak élelmiszer kiszállítására alkalmazzák, ez teljes mértékben helyettesítheti a hagyományos ételszállítási megoldásokat. A drónok kiválóan alkalmazhatóak gyógyszerek, és egyéb egészségügyi termékek kiszállítására, hiszen sürgős esetekben gyorsabb és precízebb szolgáltatást tud nyújtani. Az előbb említett két termék kategória kombinálható, több rendszer élelmiszer és gyógyszer szállításra is alkalmas.

A később bemutatásra kerülő forgalomszervezési modellünk tekintetében az eddigi próbálkozásokból a DHL és az EHang közös munkájaként létrejött megoldást mindenképpen érdemes kiemelni. A drónokkal támogatott kiszállításhoz egy olyan csomagautomatát fejlesztettek ki (3. ábra), ami a csomagok szortírozására, azonosítására és tárolására is alkalmas, illetve arcfelismerésre is képes. A feladó a vonalkóddal ellátott csomagot beszkeneli, azonosítja magát, majd kinyílik egy fiók, ahova beteheti a csomagot. Becsukja az ajtót, ezután a csomag a megfelelő időben a megfelelő helyre kerül az automata belső elosztási rendszerének segítségével, ahonnan a drón kiemeli és eljuttatja a célhelyre.



3. ábra: A DHL és az EHang csomagautomatája [17]

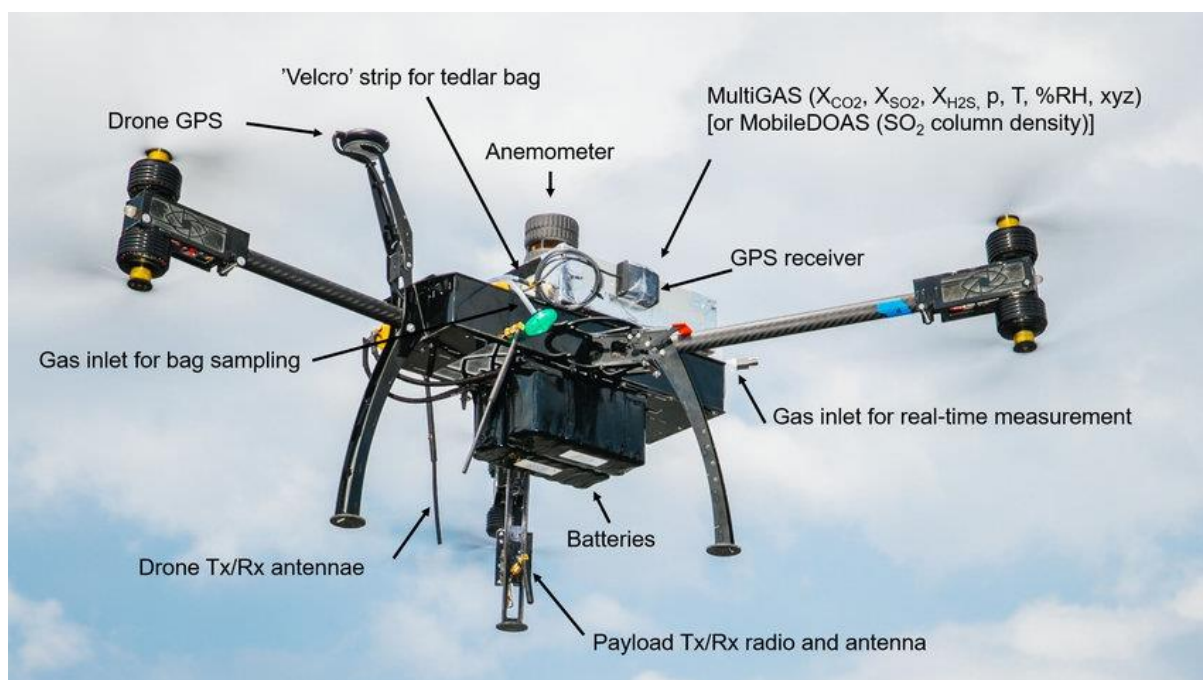
Szeretnénk kiemelni, hogy az összegyűjtött koncepciók mindegyike egyedileg kezeli a szállítást végző drónokat, azokat külön-külön entitásként irányítják, még több (párhuzamosan, vagy egymás után) megvalósítandó szállítási tranzakció esetén is. A vizsgálataink alapján úgy

tűnik tehát, hogy nem született olyan elgondolás, nem építettek olyan koncepciót, ami a drónokat rajokban kezelné ilyen esetekben.

2.3. A drónok technológiai jellemzői [18]





Egy drón felhasználási lehetőségeit nagyban befolyásolja a kialakítása, a használt szenzorok és egyéb kiegészítők. Fontos tehát, hogy a kívánt feladathoz megfelelően legyen az alkalmazott szerkezet kialakítva, ezért elengedhetetlenek a technológiai ismeretek. Napjainkra a dróntechnológia („köszönhetően” elsősorban a drónok harcászati felhasználásának) igen fejletté vált, így számos megoldással találkozhatunk a gyakorlatban.

A drónokat hivatalosan (ahogy fentebb már említésre került) pilóta nélküli légi járműnek nevezzük, tehát lényegében egy olyan repülő robot, amely távirányítással vagy önállóan működhet szoftvervezérlés segítségével. A drón, mint repülő szerkezet a jellemzően kompozit anyagokból készült vázszerkezettel, a (jellemzően elektromos meghajtású) motorokkal, az azokat meghajtásához szükséges erőforrással (jellemzően akkumulátorral), a merev, vagy forgósárnyakkal, a repülést irányító fedélzeti számítógéppel, az ahhoz integrált érzékelőkkel, valamint a navigációs rendszerrel alkot egy komplex rendszert, amelyhez számos kiegészítő eszköz, ún. „payload” illeszthető (4. ábra). Ilyen „payload” lehet egy kamera és a hozzá tartozó adatrögzítő eszközök, akár egy hangszóró, egy permetező eszköz és a tartálya, egy erős fényforrás (reflektor), vagy akár az általunk is vizsgált áruszállító drónok esetében a csomagok tárolására alkalmas konténer szerkezet is.



4. ábra: UAV szerkezetére szerelhető kiegészítő eszközök [19]

2. táblázat: A drónok megjelenési forma szerinti csoportosítása

| Szárnytípus | Előny | Hátrány |
|---|--|---|
| <p>Több rotoros drón</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • könnyen lebeg • függőleges fel- és leszállás • kisebb méret, könnyű irányíthatóság • kedvező ár | <ul style="list-style-type: none"> • akkumulátor rövid üzemideje • kisebb és könnyebb rakományok szállítása • korlátozottabb lehetőségek |
| <p>Merevszárnyú drón</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • nagy repülési sebesség • hosszú repülési idő • nehezebb rakomány szállítása is lehetséges | <ul style="list-style-type: none"> • körülményes fel- és leszállás • nagy helyigény a fel- és leszálláshoz • nem képes lebegni • korlátozott felhasználás |
| <p>Egyrotoros helikopter drón</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • nagyobb rakományok szállítása • lebegés, függőleges fel- és leszállás • hosszú repülési idő a gázmotor miatt | <ul style="list-style-type: none"> • drága • működtetése eléggé körülményes |
| <p>Fix szárnyú hibrid VTOL drón</p>  | <ul style="list-style-type: none"> • lebegés, függőleges fel- és leszállás • nagy hatótávolság, hosszú repülési idő • ötvözi a merev- és a forgószárnyú drónok előnyeit | <ul style="list-style-type: none"> • drága |

A fenti megoldások közül az áruszállítás esetében már számos megoldásban gondolkoztak, de a működő rendszerek leginkább a **forgószárnyú** és újabban a **hibrid** megoldásokat részesítették előnyben.

2.3.2. Egyéb csoportosítások

A drónok **össztömegüket tekintve** alig 11 grammosak, de akár több száz kg-osak is lehetnek. Hasznos teherbírásuk a néhány grammtól több mint 1000 kg-ig is terjedhet. Ezen paraméterek alapján megkülönböztethetünk pehelysúlyú, könnyű, közepsúlyú és nehéz emelésű drónokat.

A **maximális repülési idő** és **repülési hatótávolság** is lehet egy-egy csoportosítási szempont. Ezek a tényezők értelemszerűen szoros összefüggésben vannak egyéb tényezőkkel,

melyek közül talán a legfontosabb a drón meghajtására alkalmazott energiaforrás, valamint a fentebb már bemutatott összetömeg.

Az **energiaforrást** tekintve beszélhetünk elektromos meghajtású drónokról, ahol az áramforrás egy vagy több akkumulátor lehet. Az akkumulátorok (különösen a manapság egyre gyakrabban használt LiPo, azaz Lítium-Polimer akkumulátorok) relatíve könnyűek és képesek a megfelelő energia tárolására, de élettartamuk rövid és tűzveszélyesek lehetnek (különösen a töltésük során). A belsőégésű motoros drónok esetében más üzemanyagra van szükség a motorok meghajtására. Ebben az esetben is már többféle megoldást teszteltek és használnak fel a gyakorlatban. Gyakoriak a benzin és a gázüzemű szerkezetek. Ezt a meghajtási módot jellemzően nagyobb méretű eszközökhöz használják, ami optimálisnak tűnik a kedvező ár, a nagy repülési sebesség és a hosszabb repülési idő miatt, azonban több zajjal jár, mint egy akkumulátorral működő drón és szintén tűzveszélyes lehet. Az újabb próbálkozások tekintetében a hidrogén üzemanyagcellás drónok korszerűek, megújulóak és nagy a cellák energiasűrűsége, viszont még nem eléggé hatékony ez a megoldás. Már napelemmel működő drónok is elérhetőek, ami alacsony működési költséggel jár, viszont korlátozott a repülési idejük, mivel csak megfelelő napsütés mellett képesek stabil működésre.

2.3.3. Az alkalmazott szenzorok [20]

A szárnytípus, az össztömeg, a maximális repülési idő, a repülési hatótávolság és az energiaellátás mind-mind fontos szempont, azonban a **szenzorok** nélkül nem lenne elképzelhető a drónok biztonságos felhasználása, különös tekintettel a különböző összetett repülési műveletek esetében (mint pl. az áruszállítás). A drónok egyedi vagy tömeges, független vagy rajba szerveződött mozgásakor a leglényegesebb szempont tehát a repülésbiztonság. Fontos, hogy a légtérben tartózkodó objektumok, az ember és a tulajdon kockázatát nélkül legyenek képesek tevékenységük elvégzésére akkor is, ha környezetük folyamatosan változik. Manapság már rengeteg típusú érzékelővel és egyéb kiegészítővel lehet felszerelni a drónokat. A 3. táblázatban csupán az áruszállítási operáció szempontjából fontos, a témához szorosan kapcsolódó technológiai megoldásokat szeretnénk megemlíteni. Az áruszállítási tranzakciók lebonyolítása során számos olyan állapotot lehet definiálni, ahol szenzorok nélkül az operációt nem is lehetne megvalósítani. Ilyen lehet a fel- és leszállás, a gép-gép, vagy ember-gép interakciók támogatása, a repülés közbeni stabilizáció stb.

3. táblázat: A drónok környezeti érzékeléshez szükséges szenzorjai

| | Részei | Működési elv | Mire alkalmas? | Elhelyezkedés a drónon |
|------------------------------------|---|--|--|-------------------------------|
| Optikai szenzorok | két egymáshoz képest ismert pozíciójú érzékelő (digitális kamera) | 2D képből nyert információkból 3D leképezése matematikai transzformációk segítségével | környezet feltérképezése | elöl, hátul |
| Infravörös érzékelők | IR adó és vevő | az IR fény akadályokról való visszaverődése és érzékelése | oldalirányú akadályok felderítése | oldalt |
| Ultrahang szenzorok | adó és vevő | a kisugárzott nagyfrekvenciás hangimpulzus visszaverődési idejéből az ultrahang terjedési sebességének ismeretében határozza meg a távolságokat | talaj feletti magasság meghatározása, a közelben lévő objektumok távolságának érzékelése | alul |
| Repülési idő érzékelő (ToF) | a kamera egy lencséből, egy integrált fényforrásból és egy szenzorból áll | minden képpontra képes a mélység és intenzitás információk rögzítésére a forrás folyamatos vagy impulzusszerű fényvel megvilágítja az előtte lévő térrészt, majd az objektumról visszaverődő fény tulajdonságait vizsgálja → "3D mélységtartomány térkép" létrehozása | az egymást követő képeken bekövetkező változások alapján leköveti a környezeti változásokat és módosítani képes a repülési pályáját, akadályok észlelése | elöl, oldalt |
| Lézerradar (LIDAR) | lézeres fényforrás, tükör | kiszámítja a távolságokat és érzékeli a tárgyakat azáltal, hogy megméri azt az időt, amely alatt egy rövid lézerrimpulzus eljut az érzékelőtől a tárgyig és vissza, és kiszámítja a távolságot az ismert fénysebességtől | ütközés elkerülése | felül |

2.4. Az UTM rendszerek [21]

Világosan látszódik, hogy a drónokkal támogatott operációk számának növekedése előbb-utóbb kikényszeríti a **drón-forgalom konszolidációját**, annak optimalizált szervezését és irányítását. Ez nem valósulhat meg egy megfelelő forgalom menedzser nélkül, akinek a feladata a szabályok definiálásán és betartatásán túl a forgalom ellenőrzött lebonyolítása is. Jelenleg (a fentebb már részint ismertetett módon) **három művelet típusra** oszthatjuk a műveleteket: a látástávolságon belüli (VLOS³), a bővített látástávolságon belüli (EVLOS⁴) és látástávolságon kívüli (BVLOS⁵) operációkra. Természetesen a forgalomirányítás a tranzakciók számának növekedésével mindegyik esetben fontos szerepet játszik, de kétségtelen, hogy a legfontosabb szerepe a BVLOS esetben lesz.

Az **UTM** (UAS⁶ Traffic Management) rendszerek a pilóta nélküli légijárművek forgalmi menedzsmentjét biztosító rendszerek. Az UTM megoldások kialakítása során figyelembe kell venni, hogy a rendszernek kompatibilisnek kell lennie a hobbicélú operációk irányításától kezdve egészen a fejlett, kereskedelmi felhasználású operációk irányításáig. A drónok repülési magassága jellemzően relatíve alacsony, így fennáll a veszély, hogy **konfliktushelyzetbe** kerülnek más légi járművekkel, akár egy repülőtérre érkező vagy állami feladatot ellátó légi járművel. Ahhoz, hogy a különböző **légi járműveket közötti távolságokat** biztosítani lehessen, nem csak a pontos pozícióra és a tervezett útvonalra van szükség. Ismernünk kell a légi jármű repülési paramétereit és teljesítményeit, továbbá, hogy milyen kommunikációs lehetőségek állnak rendelkezésünkre, illetve vonatkoznak-e speciális szabályok az adott járműre (például megnövelt elkülönítés szükséges).

A jogi szabályozásoknál már volt szó **ellenőrzött és nem ellenőrzött** légterekről, de érdemes az UTM rendszerek szempontjából is megvizsgálni a helyzetet. Ellenőrzött légterek esetében az előbb említett adatok az irányítók számára központilag ismertek kell legyenek, mivel a kiadott engedélyek és utasítások révén ők a felelősek az elkülönítés megvalósításáért. A nem ellenőrzött légterekben rádióforgalmazás útján osztják meg egymással az információkat a felhasználók, ami alapján ők alakítják úgy útjukat, hogy a megfelelő elkülönítés létrejöjjön. Az UTM **két fő komponensből** épül fel, egyik a műszaki infrastruktúra elemek, a másik az operatív működést támogató rendszerek. A műszaki infrastruktúra elemek olyan komponensek, melyek az UTM funkciók elérhetőségét biztosítják. Ilyenek a kommunikációs-, navigációs-,

³ VLOS = Visual Line Of Sight

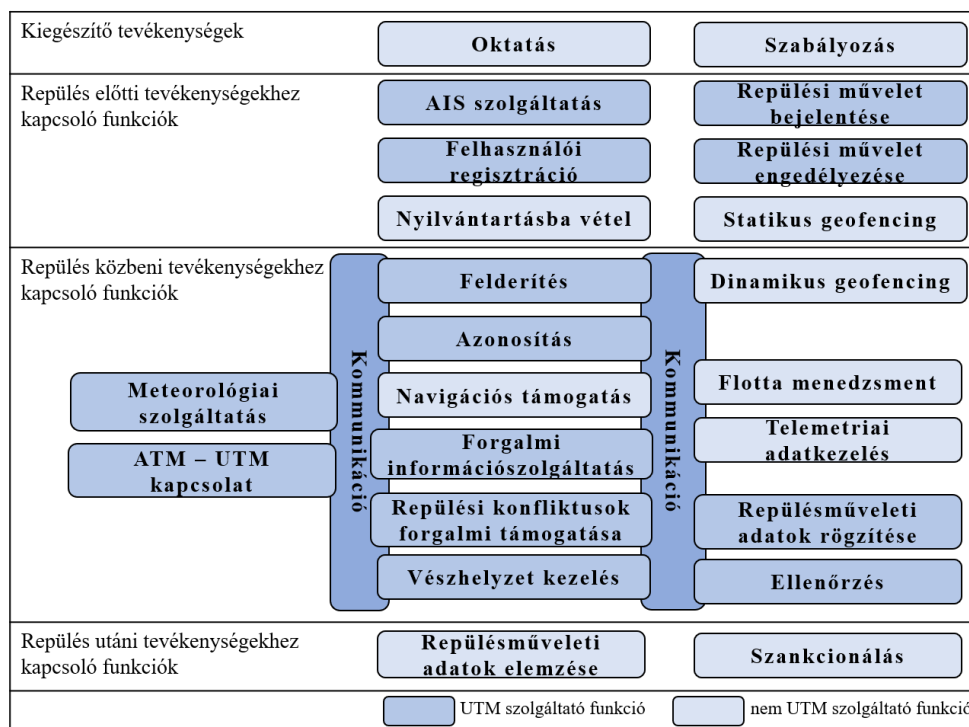
⁴ EVLOS = Extended Visual Line Of Sight

⁵ BVLOS = Beyond Visual Line Of Sight

⁶ UAS = Unmanned Aircraft System

felderítést biztosító-, AIS⁷-, meteorológiai infrastruktúra, illetve az ATM⁸ kapcsolat. Az operatív működést támogató rendszerek tartalmazzák a humán interfész komponenseket. Ezek a pilóta nélküli légi jármű rendszer, forgalmi menedzsmentet biztosító rendszer, hatósági/állami információs rendszer és nyilvántartási rendszer, ami tartalmazza a felhasználói és légi jármű adatokat.

Megkülönböztethetünk **UTM funkciókat** a repülési művelet időbeliségétől függően is. Ezek a repülés előtti, alatti és utáni tevékenységek, továbbá vannak kiegészítő tevékenységek is. Mindegyik csoporthoz kapcsolódnak olyan funkciók is, melyeket mégsem UTM feladatként definiálunk, ilyen például a nyilvántartásba vétel. Egy UTM rendszer funkcionális felépítését szemlélteti az 5. ábra. Az UTM szolgáltatásokat aszerint is csoportosíthatjuk, hogy mennyire szorosan kapcsolódik a szolgáltatás minőségéhez. **Alapvető** funkció, ami a szolgáltatás nyújtásához feltétlenül szükséges, az UTM által feltétlenül le kell fedni. **Opcionális** funkcióról akkor beszélünk, ha nem feltétlenül szükséges a rendszer működéséhez, de segítségével a szolgáltatás színvonala növelhető. **Támogató** funkcióknak nevezzük az UTM-től független funkciókat, amik az UTM funkciókat és annak felhasználóit támogatják.



5. ábra: Egy UTM rendszer funkcionális felépítése ([22] alapján saját szerkesztés)

⁷ AIS = Aeronautical Information Service

⁸ ATM = Air Traffic Management

3. Rajszerű mozgások elemzése terén elért eddigi kutatási eredmények

Bevezetőnkben említettük, hogy feltételezéseink szerint a tömeges csomagszállítási feladatok hatékony koordinálásának egyik lehetséges módja, ha a drónok képesek együtt mozogni **rajokba rendeződve**. Ennek egyik legfőbb oka a konszolidált és rendezett mozgás lehetősége, ami feltételezéseink szerint rendszer szinten könnyebb irányíthatóságot és ebből is következően lényegesen nagyobb megbízhatóságot és biztonságot eredményezhet, nem is beszélve a benne rejlő optimalizálási lehetőségekről. A drónok lehetséges rajszerű mozgásainak kialakításához kézenfekvő kiindulási pontnak tűnik a madarak rajrepülése, így a következő bekezdésekben azt vizsgáljuk, hogy az élővilágban a rajban történő mozgások hogyan működnek. Emellett megfogalmazunk olyan kihívásokat is, melyek a drónokkal megvalósított áruszállítás közben merülhetnek fel.

3.1. Mozgás rajokban az élővilágban [23] [24] [25]

A csoportos mozgást a mindennapjainkban leginkább a madaraktól láthatunk, de a különböző halrajokról sem lehet elfeledkezni, amiknek a látványos mozgásáról leginkább dokumentumfilmekből kaphatunk képet. Sokáig homály fedte a kérdést, hogy miként tudnak ezek az állatok kollektív, összehangolt viselkedést mutatni. A természetben számos jelzés van, mellyel kommunikálni tudnak az élőlények egymással, legyen az valamilyen hangjelzés vagy szárnyrebegtetés. Ezt a jelzést minden egyed továbbítja, hogy a raj minden pontjára eljusson az információ.

A kutatók már hosszú évek óta tanulmányozzák a seregélyek jellegzetes formációját, hogy hogyan működik ez a kívülről érthetetlennek, de mégis jól szervezettnek tűnő rendszer. A madárrajok mozgását magyarul **murmuráció**nak nevezzük, ami a seregélyek, és feltehetően több madárfaj esetében egy ösztönös mechanizmus, nem egy tanult képesség. **Két lehetséges elmélet** született a rajrepülés megértésére. Az egyik **kisebb csoportok** esetén működik, eszerint az összes egyed látja egymást a rajban, figyelik egymás mozgását, így képesek reagálni az irányváltásokra. A másik elmélet **nagyobb rajokra** vonatkozik, ahol elképzelhetetlen lenne az összes egyed szemmel tartása. Egy kutatás során arra jutottak, hogy egy madár mozgása csak a hozzá legközelebb eső **hét** madarat érinti és ezt teszi lehetővé, hogy a seregély 270 fokos látótérrel rendelkezik. Tehát egy rajon belül egy egyed mindig hét madarat figyel és a mozgásukra reagálva (mint egyfajta üzenetre) vált irányt. Mindez nagyon gyorsan történik összeütközés nélkül, összehasonlításként egy **focipálya méretű rajnak** mindössze **1 másodperc** is elég lehet az üzenet átadásához. A seregélyek esetében a rajba

szerveződés egyértelműen a ragadozók elleni hatékonyabb védekezés miatt van, mivel a magányos madaraknak sokkal kisebb esélyük van a menekülésre. A jellegzetes hullámszerű mozgások megzavarják a ragadozót, így csak kis eséllyel sikerül kiemelni egy egyedet a rajból.

A madarak egy másik jellegzetes, rajnak minősíthető formája a „**V**” **alakban** repülés. Ezt az alakzatot főleg a **vándormadarak**, például a vadludak alkalmazzák, amikor nagy távolságokat kell megtenniük. Minden madár a test méreteitől és sebességétől függően úgynevezett **légörvény zónát** hagy a szárnyai után. Ez az örvény felhajtóerőt eredményez, amit kihasznál a többi madár, így **kevesebb energiába** kerül a repülés. Egyes kutatások szerint a magányos repüléshez képest **12-20%-os energiamegtakarítás** is elérhető, valamint nagyobb sebesség valósítható meg így, mintha egyedül repülnének. A „V” alakban az élen haladó egyedek időnként leváltják, hogy pihenhessen, ilyenkor egy, az addig pihenő mögötte repülő egyed veszi át a helyét.

Nemcsak a levegőben, hanem a vízben is találhatunk rajban mozgó fajokat. Számos **halfaj** ritmusosan, egymáshoz szorosan elhelyezkedve, de nem összeütközve csoportokban úszik. Az egy irányba mozgó, körbe-körbe kavargó halraj összezavarja a rájuk táplálékként tekintő más fajokat, ezen kívül a táplálék keresésében és a párkeresésben is sikeresebbek. A kutatók megfejtették, hogy a halak testén úgynevezett **neuromasztok** találhatóak. Ezek az érzékelő sejtek figyelmeztetik a halakat a rezgésekre, hőmérséklet- és nyomásváltozásra, valamint a közeli vízmozgásokra. Feltehetően ezeknek a sejteknek köszönhetően érzékelik a körülöttük lévő halak mozgását és ezekből az információkból tudják, hogy melyik irányba kell haladni.

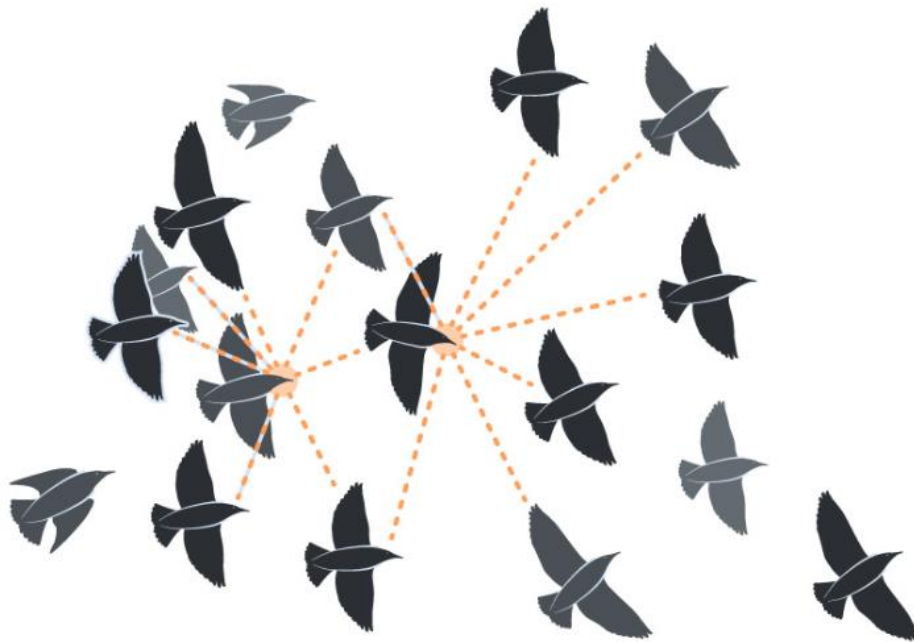
Az előzők alapján megállapíthatjuk, hogy a rajban létrejövő változások általában a **szűk környezetükből érkező információk** alapján következnek be, tehát lokálisak. Ugyanakkor globális viselkedést eredményeznek, hiszen kihat az egész rajra.

A drón rajok esetében az ilyen jellegű jelzések ugyanúgy hatékonyak lehetnek és az ütközések elkerülhetőek lennének, azonban egy-egy kibocsátott jel nem oldja meg a teljes helyzetet, hiszen nemcsak a drón-drón közti biztonságra kell törekednünk, hanem minden légi felhasználóra ki kell terjednie a kommunikációnak. De vajon van-e olyan alternatíva, ahol nem kell kimondottan jelzést közvetítenie a rajban haladó drónnak?

3.2. A rajszerű mozgások modellezése

A közelmúltban Vicsek Tamás és kutatócsapata tett közzé egy matematikai modellt [26] a rajszerű mozgásokról, ami leírta az élővilág csoportos mozgásait. A Vicsek-modellben **nem kell feltétlenül jelzést kapniuk a raj tagjainak**, hogy irányt változtassanak, elég körbe nézniük az

egyedeknek és érzékelni az **átlagos haladási irányt**, majd lekövetni azt. Ez a kutatások alapján elegendő lehet ahhoz, hogy az egész raj szinkronban tudjon mozogni.

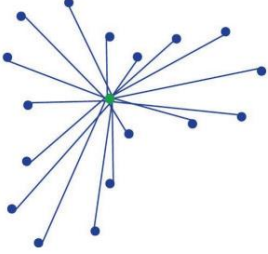
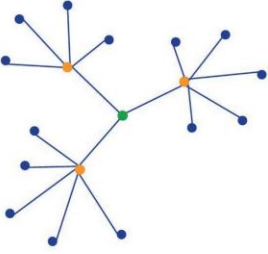
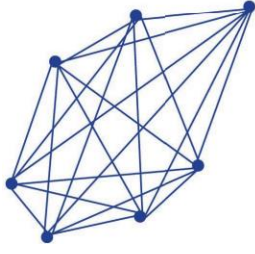
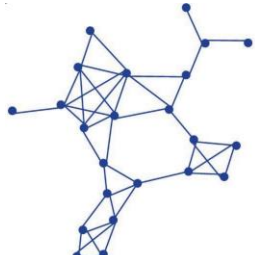


6. ábra: A madarak közötti érzékelés a rajrepülés közben [27]

Ez a rajmozgás irányítási stratégia ígéretesnek hangzik, de a drónrajok forgalmának szervezése szempontjából nem feltétlenül optimális, és tovább gondolandó, hiszen számos olyan helyzet lehet, ahol az átlagos haladási irány követése nem feltétlen opció. Természetesen a rajok mozgásvezérlésének nem csak ez az egy módja létezik. Megkülönböztetünk centralizált, hierarchikus, decentralizált, valamint együttműködés alapú összehangolt vezérlést. Ezek tipikus jellemzőit, előnyeit és hátrányait foglalja össze a következő oldalon található 4. táblázat.

Csomagszállítás szempontjából mindegyik rajmozgás vezérlési típusnál lehet találni olyan jellemzőt, ami miatt ígéretes lehet a raj-alapú áruszállítás adott szakaszában. A centralizált vezérlésben előnyös lehet, hogy valójában elég egy drónt irányítanunk és a raj többi tagja őt követi. Azonban nagy kockázatot jelent, hogy az irányított drón meghibása esetén a raj elveszhet. Decentralizált vezérlés esetén a legkedvezőbb jellemző, hogy szabadon vonhatóak be és ki az egyedek, hiszen egy drónraj úticélja csak egy bizonyos pontig egyezik meg, utána szét kell válniuk és egyénileg (vagy kisebb rajokban) kell eljutniuk az igénypontra. Az együttműködési modell esetén csomagszállítás szempontjából a hosszabb reakcióidő nem kedvező, azonban, ha erre van szükség ahhoz, hogy az egyedek ne tudjanak elveszni és nem kézbesíteni a csomagot, akkor ez egy jó megoldás lehet.

4. táblázat: Vezérlési típusok jellemzői [20]

| Vezérlési típus | Működése | Előny | Hátrány |
|--|--|--|--|
| <p>Centralizált</p>  | <p>Kinevezésre kerül egy központi egyed. Számára a többi egyed biztosít információkat, melyeket értékkel és ez alapján ad feladatot minden egyednek.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • alacsony reakcióidő • dinamikusan változó környezethez is gyorsan alkalmazkodik az egész raj | <ul style="list-style-type: none"> • központi egyed kiesése esetén, akár az egész raj elveszhet |
| <p>Hierarchikus</p>  | <p>Kisebb csoportokban repülnek az egyedek, köztük alá- vagy fölérendeltségi viszonyok vannak. Különböző képességű egyedek végzik az alárendelt egyedek vezetését.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • megegyeznek a centralizált vezérlés előnyeivel és hátrányaival, de árnyaltabban jelentkeznek | |
| <p>Együttműködés alapú</p>  | <p>Minden egyed kommunikál az összes többi egyeddel, melyek hatótávolságon belül találhatóak. A döntéshozatal „szavazási” vagy „versengési” eljárás alapján történik.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • erősebb rajimmunitás | <ul style="list-style-type: none"> • raj reakcióideje megnövekszik |
| <p>Decentralizált</p>  | <p>Az egyedek mindig a hozzájuk térben közeli, saját munkájuk szempontjából releváns egyedekkel kommunikálnak, amíg erre szükség van. Minden egyed csak a közvetlen környezetét figyeli, a feladatának elvégzéséhez szükséges információkhoz a többiekkel folytatott kommunikáció során fér hozzá.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • egy egyed meghibásodása nem terjed ki az egész rajra • a hálózatba szabadon illeszthetők be, illetve vonhatóak ki egyedek | |

3.3. Kihívások a rajszerű mozgásokkal kapcsolatban

A fenti felvázolt összes esetben találhatunk jó kiindulási pontot, amit rá lehetne vetíteni a drónok rajba szerveződésére. Az egyik nagy kérdés, hogy vajon mekkora drónrajt tudunk kezelni, van-e lehetőség arra, hogy az összes drón érzékelje a körülötte repülőket? Elméletben, amíg biztonság-technikailag minden szükséges feltétel teljesül, addig szinte korlátlanul növelhető a drónfelhő mérete. Fontos megállapítani azt is, hogy a drónoknak egymástól mekkora távolságot kell tartaniuk repülés közben. Több tényezőt is vizsgálnunk kell ebben a kérdéskörben, az egyik az említett átlagos repülési magasság, ami a madárfajok többségénél 200 méter alatt van. Ennek ismeretében az emberek számára még elviselhető zajszint megállapítása szükséges az adott magasságban. Egy drón által kibocsátott zaj a választott típustól függ. Repülés közben a szárnytípustól függően a drón körül légmozgás jön létre, emiatt két egymáshoz közel elhelyezkedő eszköz esetében erős hanghatásra számíthatunk, azonban távolabb helyezve csillapodik a zaj. Ezért az egy rajba szervezhető drónok száma korlátolt, a zajszint vizsgálása szükséges lehet.

A drónt fel tudjuk szerelni „szemekkel”, ami esetükben szenzorokat, kamerákat jelent, ezek segítségével képesek érzékelni („látni”) a közelben repülő drónokat és a különböző akadályokat is. Amennyiben nagyobb rajról beszélünk, ahol képtelenség, hogy az összes eszköz érzékelje egymást, elképzelhető a seregélyek modellje. Azaz mivel a drón képes „látni”, különböző technológiai megoldások segítségével akár döntéshelyzeteket is képes lehet megoldani.

A repülési útvonal kapcsán nem feledkezhetünk meg arról a problémáról sem, hogy míg az élővilágban közel azonos az úticél, addig a csomagszállításnál általában nem. Emellett azt is meg kell vizsgálni, hogy ahogy a különböző futárszolgálatoknál is választani lehet a házhozszállítás és a csomagpontra kézbesítés között, vajon drónokkal is ugyanez működne-e. Mivel célunk, hogy minél tovább rajként tudjuk kezelni a drónokat, így kisebb az esélye a házhozszállítás lehetőségének.

A kézbesítés kapcsán nehézséget jelenthet a rajból való kiválás, amikor el kell kezdeni a leszállást egy-egy kézbesítés teljesítéséhez. Továbbá vizsgálandó az is, hogy okozna-e pillanatnyi zavart a közvetlen közelben lévő eszközöknél a kiválás, különösen, ha olyan helyzet adódik, hogy kevés drón repül éppen a rajban?

Repülésbiztonság tekintetében az ütközések elkerülése az egyik legfontosabb megoldásra váró kérdés. Technológiailag fejlettebb drónok már képesek érzékelni, ha ütközés várható és megállnak, azonban minél nagyobb a drón sebessége, annál nagyobb a „fékútja” is. Emiatt egy fix helyű objektum esetében meg tudja akadályozni az ütközést, de egy hirtelen elé repülő

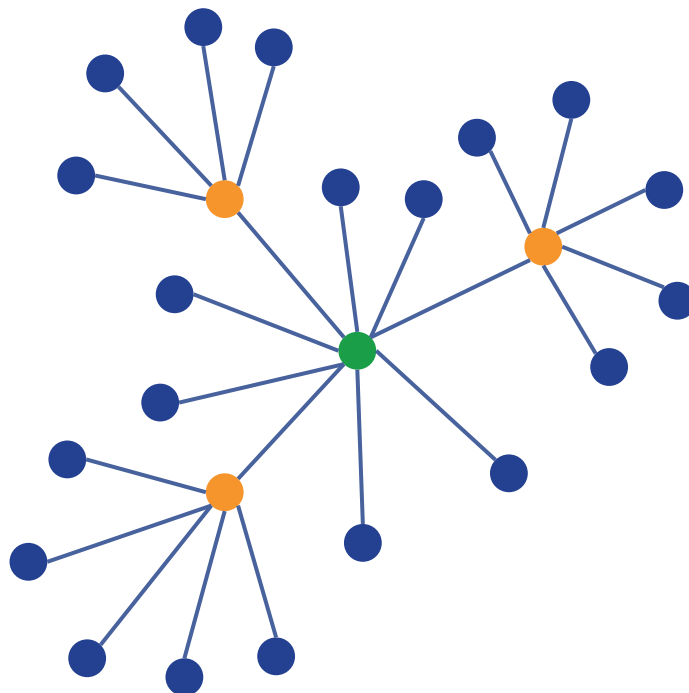
madárral már nem biztos, hogy képes megbirkózni. Vajon elkülöníthetjük térben, esetleg időben is a drónos operációkat az élővilágtól?

Mindenképpen fontos kérdés lesz az időbeli és térbeli elkülönítés kérdésköre is az egyes drónrajok mozgását illetően. Ez különösen fontos abból a szempontból is, hogy jellemzően több raj koordinált mozgását kell megvalósítani az operáció során. Figyelembe kell venni továbbá olyan tényezőket is mint a légteret használó élőlények (madarak) mozgása, akikkel az ütközés esélyét a „méret” szempontjából növeli, de egyben bizonyos értelemben csökkenti is, hogy több drón együttesen mozog. Emellett természetesen a más repülő objektumoktól való elkülönítés kérdése is rendkívül fontos. Ezeknek a kihívásoknak a kezelése feltétlenül egy későbbi UTM hatáskörbe helyezendő feladat lehet.

A fenti kihívások mind alátámasztják, hogy hiába tudjuk már rajként mozgatni a drónokat például egy fényjáték során, ilyen jellegű komplex operációk terén még rengeteg megválaszolatlan kérdés van és ilyen megközelítésből még senki sem vizsgálta ezt a témakört.

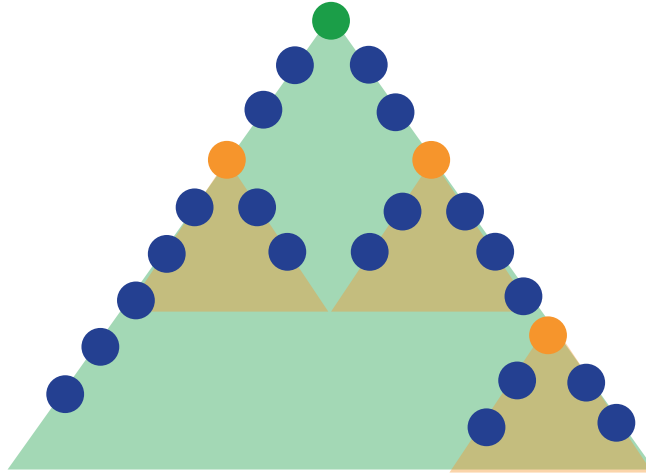
3.4. Drónrajok mozgásszervezése egy lehetséges áruszállítási operáció során

Bár számos elvi megoldás szóba jöhet, de a további vizsgálataink során, illetve az alábbiakban bemutatásra kerülő forgalomszervezési scenárióban egy **hierarchikus** drónraj modellben gondolkozunk, ahogy egy **vezérdrón** fogja a raj mozgásvezérlési feladatait ellátni (7. ábra). A vezérdrón egy olyan UAV, aminek áruszállításra nem kell alkalmasnak lennie, feladata kimondottan a rá bízott raj mozgásának irányítása.



7. ábra: Hierarchikus mozgásvezérlés

A 8. ábra „V” alakzatán a középpontban lévő **zöld** csomópont jelöli a **vezérdrónt**, a többi kisebb csoport azokat a minirajokat reprezentálja, amelyek a raj szétválási pontján (lásd később) közösen, egy célpont irányába kell, hogy tovább haladjanak. Ezekben a minirajokban a vezérdrón szerepét egy, az ábrán **sárgával** jelölt áruszállító drón fogja betölteni.



8. ábra: „V” alakú drónraj topológia

Bár a raj feltételezéseink szerint a mozgásirányítás szempontjából hierarchikusan szerveződik, a repülés során javasoljuk a „V” **alakban** repülés megvalósítását, ami azért is tűnik egy jó iránynak, mivel kritikus probléma, hogy a drónok jelenleg egy akkumulátor töltéssel rövid ideig, és csak kisebb hatótávolságra képesek repülni. További vizsgálatokat igényel, hogy vajon a drónrajok esetében is igaz-e az a jelenség, hogy a „V” alakban repüléssel energiát lehet megtakarítani. Azonban, ha ez igaz, akkor egy akkumulátor töltéssel nagyobb hatótávolság is elérhető. Emellett a „V” alak, egy konszolidált raj topológia kialakítását is lehetővé teszi, és további optimalizálási lehetőségeket is rejt magában (lásd később).

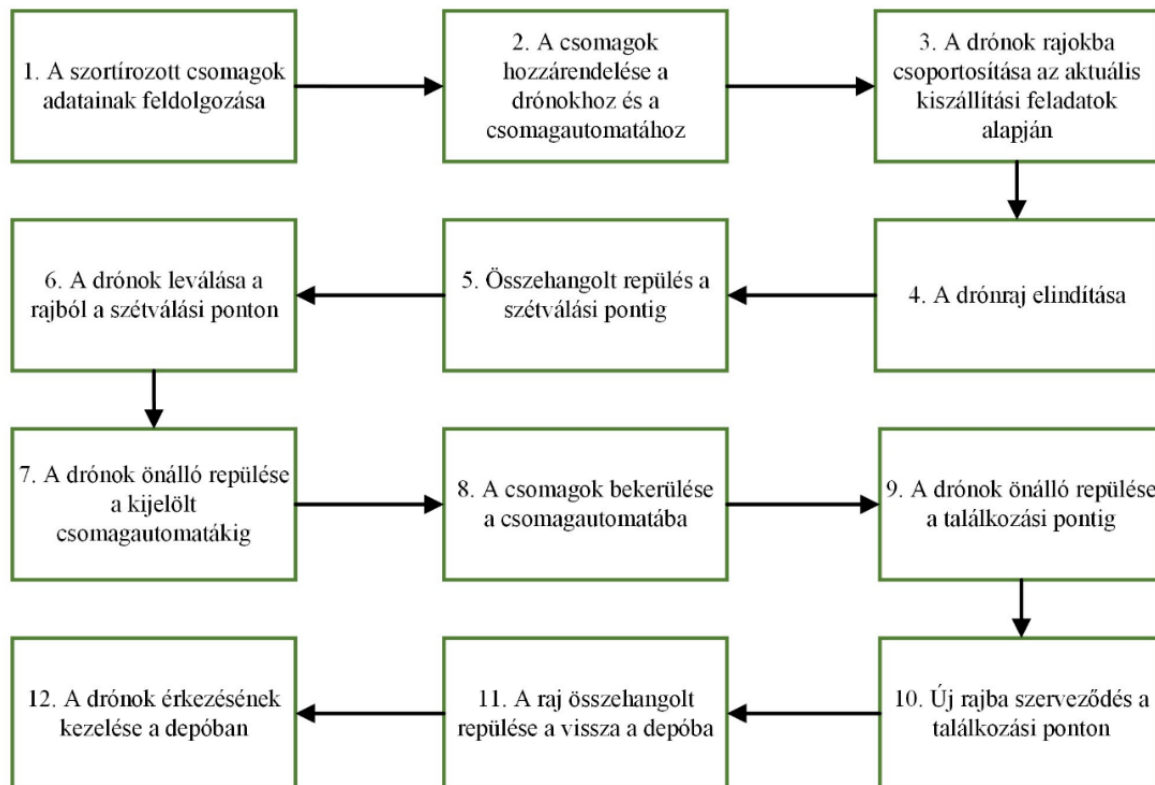
A környezetérzékelés és a kommunikáció természetesen alapvető fontosságú bármilyen mozgásszervezés és topológia esetében, hiszen biztonságos repülés nehezen képzelhető el ezek nélkül, különösen egy raj koordinált mozgása esetében. Így tehát biztosan erre alkalmas szenzorokra van szükség, amik komplexen képesek mérni és értékelni a folyamatosan változó környezetet. Ez alapján képes lehet a raj együtt mozogni figyelembe véve, hogy szükség van legalább egy vezérdrónra, amit külső irányítás alá kell helyezni.

4. Egy rajszerű elven működő forgalomszervezési modell

4.1. Működési peremfeltételek és az elképzelt munkafolyamat

Az általunk elképzelt forgalomszervezési modell megalkotása során kulcsfontosságú szerepet játszott, hogy rajban való repüléssel szeretnénk megvalósítani a csomagszállítást. Ehhez arra van szükség, hogy a raj egyazon helyről induljon el és tagjai a lehető legtávolabb tudjanak együtt haladni. A csomagszállítás megvalósításához elektromos meghajtású (akkumulátorral felszerelt), speciális áruszállító drónokat használunk, melyeken a csomagok egy speciális konténerben helyezkednek el. A csomagszállítás végpontjai a már fentebb is említett olyan csomagpontokon elhelyezett, innovatív megoldásokkal felszerelt csomagautomaták, amelyek a drónok fogadására, dokkolására és automatikus csomagkezelésre képesek. A hagyományos közúti csomagszállítást vizsgálva arra jutottunk, hogy az ilyen elven működő drónos csomagszállítás megvalósításához, vélhetően erre szakosodott logisztikai szolgáltatók (operátorok) által működtetett speciális depók telepítésére lesz szükség. Ezekben a depókban az operátorok jellemzően olyan csomagokat kezelnek, melyek megfelelnek a drónnal való szállítás kritériumainak, de a hálózatba telepíthetők „hibrid üzemmódban” üzemeltetett depók is, ahonnan a drónokkal történő kiszállítást kiegészítendő, akár közúton történő kiszállítás is megvalósítható. Az ilyen képességekkel rendelkező depók különösen hasznosak lehetnek különböző vis-major helyzetek esetén. A több telephelyes architektúra amiatt szükséges, mert a drónok akkumulátor kapacitása jelenleg még a repülési időt és ezáltal a hatótávolságot erősen korlátozza, így egy-egy nagyobb terület teljes lefedése egy depóból nem megvalósítható. Minden depóhoz egy előre kijelölt körzetet tartozik a területi lefedettség szempontjából. Ez azt jelenti, hogy területi szempontból egy adott körzetbe tartozó, drónokat fogadni képes csomagautomaták mindig a hozzájuk tartozó depóból kerülnek kiszolgálásra. A kialakított forgalomszervezési logika egy további fontos sajátossága, hogy egy-egy nagyobb területet lefedő körzet, a csomagszállítási igények megjelenési helyétől függően további részkörzetekre kerül felosztásra, melyet egy-egy drónraj szolgál ki. A részkörzeteken belül meghatározott szétválási pontokig a drónrajok együtt repülnek, ezen a ponton feloszlanak, és innen szétválva (egyedileg, vagy „minirajokban”) indulnak el a végpontok irányába. A drónok visszatérése a depóba hasonló módon történik a feladatok elvégzése után. Egy-egy előre definiált találkozási ponton újra rajok képződnek és indulnak a depó irányába visszafelé. A drónok a visszafelé úton keveredhetnek más rajok drónjaival, és a repülési céldepó sem feltétlen ugyanaz, mint ahonnan el lett indítva a tranzakció. A találkozási ponton megvalósuló rajképzés

után a raj tagjaiból létrejövő drónfelhő közösen repül vissza a számukra kijelölt depóba. A modell működési logikáját a 9. ábra szemlélteti.



9. ábra: A rajszerű forgalomszervezési modell működési logikája

4.2. A forgalom szervezésének egyes lépései

4.2.1. A szortírozott csomagok adatainak feldolgozása

A csomagok adatkezelésénél a három legfontosabb adat a csomag tömege, befoglaló méretei (valamint az ebből számítható térfogat) és a szállítási hely. Az adatok beolvasása után minden adat bekerül egy adatbázisba, amelyből később kinyerjük a rajképzéshez szükséges információkat.

Döntési probléma

? *Milyen csomagok alkalmasak drónokkal történő kiszállításra?*

Egy online rendelés esetén jelenleg lehetőségünk van kiválasztani a szállítás módját. Amint a drónos kiszállítás is lehetővé válik, elképzelésünk szerint csak a kiszállítási tranzakció végpontját adó csomagautomata kiválasztása lesz opció, az nem, hogy drónnal vagy tehergépjárművel teljesítse-e a kiszállítást végző operátor a tranzakciót. Ebből adódóan a drónnal is kiszállítható csomagok kiválogatása a lehetséges kiszállítási feladatok közül tehát vélhetően feladatként fog jelentkezni, mivel nem feltétlen lehet bármelyik csomagot ezzel a szállítási móddal kiszállítani.

Elsődleges szempont a csomag tömege lehet. A választott eszköz típusától függ a maximális kapacitás, de fontos a befoglaló méret is. A legjobb megoldás a csomagok drónnal történő mozgatására az eddigi tapasztalatok alapján [17] [28] egy fix méretű, kis tömegű tárolókonténer, ami a drón méretéhez igazodik figyelembe véve az aerodinamikai tényezőket, egyúttal alkalmas lehet a csomagautomatákkal történő gép-gép interakció során a csomagok automatizált átadására is. A konténer mérete korlátozza a belehelyezhető csomagok nagyságát, azaz a tömegén kívül a befoglaló méret a legmeghatározóbb korlátozó tényező. Megállapíthatjuk, hogy a csomagok kiválogatásánál egy maximális tömeg és befoglaló méret értéket kell megadnunk és egy potenciális jelöltnek mindkét feltételt teljesítenie kell. Ezen a két tényezőn kívül még számos szempontot figyelembe vehetünk, például sérülékeny csomagokat érdemes lehet inkább drónnal szállítani, mivel a közúton nagyobb igénybevételnek lehetnek kitéve. Fontos lehet figyelni a kapacitáskihasználást is, túl kicsi és könnyű csomagot nem feltétlenül éri meg drónnal kiszállítani, amennyiben egy drónhoz csak egy csomagot rendelnénk hozzá. Azonban gazdaságilag valószínűleg előnyösebb, ha egy konténerbe több kisebb méretű és tömegű csomag is kerülhet, amelyet azonos végpontra kell szállítani. Az egy tárolókonténerben szállítandó csomagok számától függetlenül is fontos rögzíteni, hogy egy szállítási tranzakció keretei között a vizsgált modellünkben a drón egy csomagautomatát látogat meg.

A megvizsgálandó szempontok felhasználásával célszerű multikritériumos eljárást alkalmazni és ez alapján eldönteni, hogy egy adott csomag kiszállítható-e drónnal. Például az AHP módszer [29], mint egy több kritériumot is kezelni képes minősítő módszer alkalmas lehet arra, hogy a drónos szállításra való alkalmasságot egy 0% és 100% közötti értékkel minősítse. A minősítő értékek alapján készíthetünk egy sorrendet és kiválaszthatjuk a szállításra leginkább alkalmas csomagokat. Lehetnek olyan csomagok is, amik elvileg alkalmasak lennének drónos kiszállításra, de az eljárás során a kapott érték alapján például gazdaságilag nem érné meg ezt az opciót választani. Ezeket, és a drónos szállításra kevésbé alkalmas csomagokat hagyományosan, pl. közúton lehetne kiszállítani a csomagautomatákba. A cél olyan rendszer kialakítása, amiben a lehető legtöbb csomagot képesek vagyunk légi úton kiszállítani a drónflotta kapacitásait és a rendelkezésre álló időt minél jobban kihasználva.

4.2.2. A csomagok hozzárendelése a drónokhoz és a csomagautomatákhoz

Az adatfeldolgozás után meg kell határoznunk, hogy melyik csomagot melyik drón hova szállítja. Ehhez minden drónt és csomagot egyedi azonosítóval kell ellátnunk. Ezután minden

drónhoz hozzá kell rendelnünk egy, vagy több csomagot. Több csomag csak abban az esetben rendelhető hozzá egy drónhoz, amennyiben a kiszállítás végpontja ugyanaz az automata.

Döntési problémák

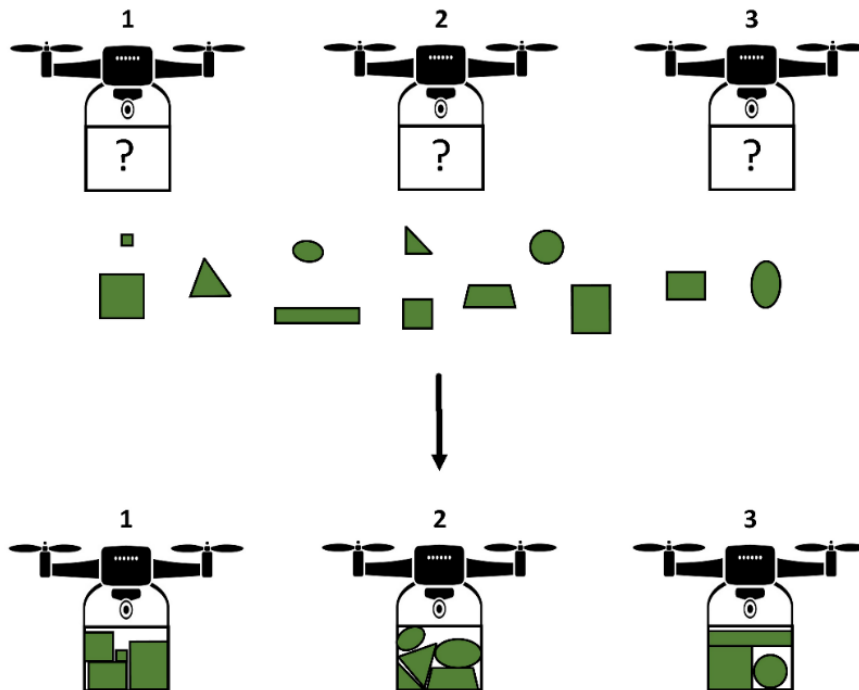
? *Egyfajta drónt használjuk vagy többfélét?*

Jelenleg egyfajta drónnal képzeljük el a csomagszállítást, ebből következik, hogy a teherbírásuk is megegyezik. Azonban érdemes megvizsgálni, hogy jobban megérné-e, ha kifejezetten könnyű tömegű csomagokhoz egy kisebb teherbírású dróntípust alkalmaznánk. Azaz kérdés, hogy homogén vagy inhomogén drónflottát alkalmazzunk. Homogén alatt azt értjük, hogy a rajokat jellemzően azonos típusú drónokkal, ugyanolyan méretű és teherbírású konténerekkel működtetjük. Inhomogén flottáról beszélünk akkor, ha az előbb említett technológiai paraméterek és/vagy az alkalmazott dróntípusok különbözőek. A drónok esetében az alkalmazást tekintve a teherbírás és az akkumulátor kapacitása lényeges szempont, de fontos lehet még az operáció során elérhető sebesség, a gyorsulási paraméterek, de egyéb fontos technikai paraméterek is (pl. milyen extra képességekkel rendelkezik a szerkezet). Azonban nem csak ebben az értelemben lehet inhomogén egy drónflotta, ugyanis az eszközökre felhelyezhető tárolókonténerek is lehetnek eltérő méretűek, ami befolyásolhatja a bele rakható csomag méretét, tömegét, térfogatát és alakját is. Ezek kombinációja is előfordulhat, tehát a különböző típusú drónokat különböző tulajdonságokkal rendelkező tárolókonténerekkel is kombinálhatjuk. Bizonyos szempontokból előnyös lehet az inhomogén drónflotta választása, egyúttal ez feleslegesen túlbonyolíthatja a rendszer operatív működtetését, működőképességének fenntartását, továbbá bonyolulttá teheti a különböző folyamatlépéseket és az optimalizálási feladatok megvalósítását is. Emiatt vélhetően érdemes lehet homogén flottával megvalósítani egy drónokat nagy számban alkalmazó tervezett áruszállítási rendszert.

? *Hogyan rendeljük hozzá a csomagokat (szállítási feladatokat) a drónokhoz?*

Egy összetett kérdésről van szó, hiszen sok különböző tömegű, térfogatú és befoglaló méretű csomagot szükséges adott teherbírású, térfogatú és befoglaló méretű tárolókonténerekhez hozzárendelni. Egy többkritériumos, több hátizsákos típusú döntési problémaként írhatjuk le a feladatot, hiszen az adott „n” számú különböző tulajdonságú csomagot „m” számú tárolókonténerhez kell rendelnünk úgy, hogy egy konténerbe több csomag is kerülhet és a csomagok célpontja azonos. A csomagok összesített tömege nem lépheti át a konténer teherbírás korlátját, ugyanez igaz a befoglaló méretre és a térfogatra is (10. ábra). Ezen kívül figyelembe vehető még számos szempont, például a csomagok egyenletes elosztása egy tárolókonténeren belül, vagy a teljes drónflottára nézve, hogy az akkumulátor kapacitás

optimálisan legyen kiterhelve, egyúttal a lehető legkevesebb drónnal legyünk képesek a szállítási feladatokat megoldani, de fontos lehet pl. az ideális összesített tömegközéppont kérdésköre is.



10. ábra: Hátizsákos probléma a csomagok drónokhoz rendelésére

Bonyolultabbá teszi a problémát, ha különböző méretű és kapacitású tárolókonténereket alkalmazunk, azaz inhomogén a drónflottánk. Ekkor nemcsak több, de egyúttal többféle típusú hátizsákot is kell kezelnünk a probléma megoldása során. A feladatot még tovább bonyolíthatja, ha az alkalmazott drónok is különbözőek, hiszen ekkor változhat a teherbírás korlát értéke is.

Technológiai problémák

[?] Mekkora teherbírású drónnal érné meg a csomagszállítás?

A csomagok tömege egészen széles tartományban ingadozhat. Lesznek könnyebb csomagok, és lesznek olyanok is, amik közelítenek a drón maximális teherbírásához. Mivel alapvetően egyfajta drónnal képzeljük el a szállítási folyamatok megvalósítását, ezért optimalizálni célszerű. Nem biztos, hogy megéri nagy teherbírású drónokat alkalmazni, ha nem tudjuk jól kihasználni a szerkezetet. A drón optimális teherbírásának és a ráhelyezhető tárolókonténer méreteinek megállapításához jó kiindulás lehet, ha adatelemzéses technológiák segítségével megvizsgáljuk, hogy a csomagok nagy része milyen tömegtartományban mozog. Ezután könnyedén meg tudjuk mondani, hogy mekkora teherbírású drónt mekkora tárolókonténerrel érdemes megválasztani, ami a drón szempontjából és a szállítandó csomagok szempontjából is a legjobb megoldást jelentheti. Bonyolultabb a helyzet akkor, ha inhomogén

flottában gondolkozunk, hiszen abban az esetben több optimális méretű konténert és optimális teherbírású drónt kell választanunk.

? *A kisebb teherbírás kisebb akkumulátor kapacitással is jár?*

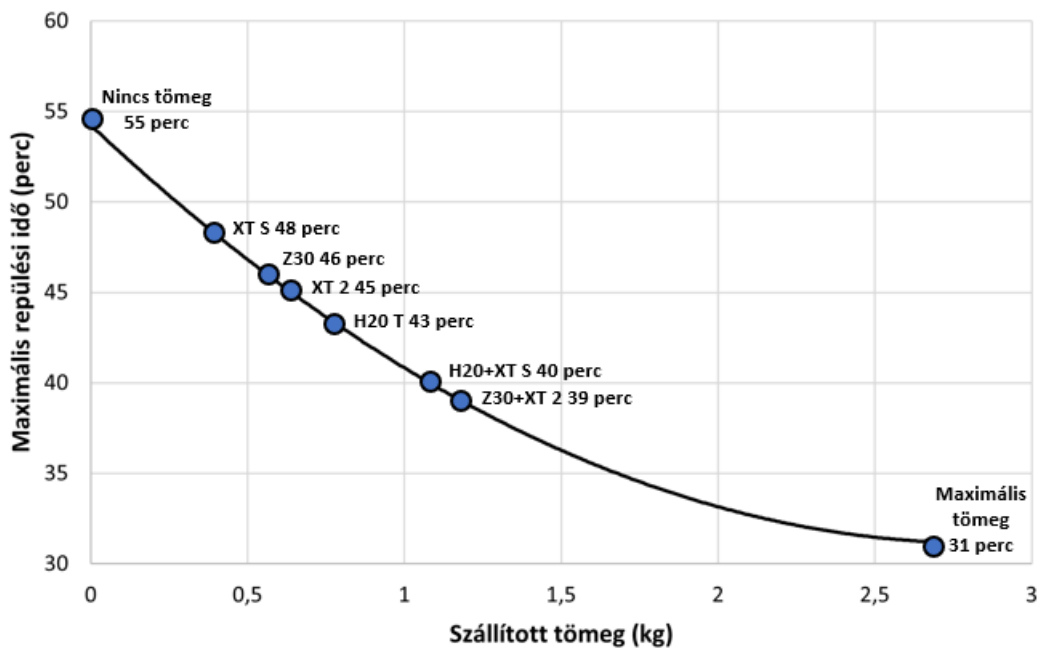
Kétségtelen, hogy sajnos van némi összefüggés a két tényező között, bár ez a kapcsolat nem feltétlen szükségszerű. Az azonban kijelenthető, hogy a nagyobb kapacitású akkumulátorok jellemzően nagyobb méretűek és nehezebbek is, így nagyobbak az azokat használó drónok is, emiatt valószínűsíthető, hogy ezeknek az eszközöknek a teherbírása is nagyobb (értve ez alatt a drón által kezelt payload⁹ lehetséges nagyságát). A reláció sajnos fordítva is igaz lehet. Így a kihasználtsági mutatók szempontjából bár lehet, hogy jobban megérne kisebb kapacitású drónokat is alkalmazni, sajnos, ha ezzel nagy mértékben csökken az egyébként is alacsony hatótávolság, akkor maradni kell a nagyobb teherbírású drónok használatánál. Erről készítettünk egy összehasonlítást, melyet az 5. táblázat tartalmaz. Emellett a 11. ábra szemlélteti, hogy DJI Matrice típusú drón repülési idejét hogyan befolyásolja a szállított tömeg.

Érdemes megvizsgálni, hogy az alacsonyabb hatótávolság miben befolyásolhatja a rendszer működését. A depók szükséges számának és térbeli elhelyezkedésének meghatározásához ismernünk kell a hatótávolságot. Minél rövidebb utat képes megtenni a drón egy akkumulátor töltéssel, annál több depó kialakítására van szükségünk. Bár ebben a dolgozatban nem célunk ezt vizsgálni, de világos, hogy ennek hatása a beruházási és a működtetési költségek terén is jelentkezni fog. Egy megfelelő matematikai modell építésével több scenárió is megvizsgálható és meghatározható lenne egyfajta ideális állapot, vagyis kiszámolhatjuk, hogy nagyobb hatótávolságú drónokat érdemes használni kevesebb depóval (és akár kevesebb drónnal), vagy kisebb drónokat válasszunk több depó építésével (és várhatóan több drónnal). Látható tehát, hogy már egy teherbírás paraméter (és az ezzel vélhetően összefüggésben lévő akkumulátor kapacitás) optimális megválasztásának kérdésköre is milyen összetett probléma.

5. táblázat: Különböző dróntípusok paramétereinek összehasonlítása [30] [31] [32]

| Dróntípus neve | Teherbírás | Akkumulátor kapacitás | Maximális repülési idő (szél nélkül, teher nélkül) | Maximális hatótávolság |
|-------------------------|-------------------|------------------------------|---|-------------------------------|
| DJI Mavic 3T Enterprise | 1.05 kg | 5000 mAh | 45 perc | 32 km |
| DJI Matrice M200 | 2.34 kg | 4280 mAh | 27 perc | 37 km |
| DJI FlyCart 30 | 30 kg | N/A | 31 perc | 28 km |

⁹ payload = a drónra felszerelhető tartozékok, egyéb eszközök és az azok által befoglalt dolgok összömege



11. ábra: DJI Matrice 300 RTK repülési ideje a szállított tömeg függvényében [33]

Az 5. táblázatban vizsgált drónok közül a FlyCart típusú drón kifejezetten csomagszállításra lett kifejlesztve, emiatt is nagy a teherbírása, azonban maximális terhelés mellett csupán 16 km-t tud repülni. Mivel jelenleg abban gondolkodunk, hogy egy drón egy csomagautomatát szolgál ki, továbbá a kicsomag szállításban jellemzően megjelenő méretek és tömegek sem indokolják azt, így csekély az esély arra, hogy több mint 20 kg árut kell egy drónnak szállítania. Továbbá mivel a hatótávolsága teher nélkül sem a legjobb, ebben az összehasonlításban nem tűnik jó megoldásnak egy ilyen teherszállító drón használata. A másik érdekesség, hogy például egy DJI Matrice 300 RTK típusú drón esetében a teher nélküli repüléshez képest, a maximális teherrel való repülés esetén a repülési idő majdnem a felére csökken (bár kétségtelen, hogy még ebben az esetben is 31 perc). Azonban ebből is látható, hogy az akkumulátor mindenképpen kritikus pontja jelenleg ezeknek a rendszereknek, így az akkumulátortechnológia fejlődése komoly lendületet adhatna ezeknek a megoldásoknak.

4.2.3. A drónok rajokba csoportosítása az aktuális kiszállítási feladatok alapján

Ha adott egy depó struktúra, azaz adott a depók száma és térbeli elhelyezkedése, és egy körzetezési rend, azaz minden kiszolgált csomagautomata egy meghatározott depóhoz van hozzárendelve, akkor egy előre meghatározott körzeten belül a mindenkor aktuális kiszállítási feladatok alapján olyan részkörzeteket célszerű létrehozni, amit egy-egy drónraj fog kiszolgálni. Ez azt jelenti, hogy egy körzeten belül nem biztos, hogy egy adott időszávon belül minden csomagautomatánál jelentkezik kiszállítási igény, tehát az igénypontokat mindig az aktuális állapotnak megfelelően kell újraklasztoznunk, egy előre meghatározott

szempontrendszer alapján. A körzeten belüli részkörzetek száma tehát a drónrajok számával lesz egyenlő. Fontos kérdés, ha adottak egy adott idősávhoz tartozó aktuális kiszállítási feladatok, akkor hány csoportba, azaz részkörzetbe (azaz rajba) érdemes bontani azokat. Ennek megállapítása során is számos kritérium jöhet elő, amit kezelni kell (pl. egyszerre kezelhető rajok maximális száma, egy rajban kezelhető drónok maximális száma, biztonsági kritériumok, költségek, egyéb befolyásoló tényezők). Egyúttal elképzeléseink szerint minden részkörzeten belül meg kell határozni azt a szétválási pontot, ahonnan a részkörzethez rendelt rajba sorolt drónok már egyedül, vagy minirajban¹⁰ folytatják útjukat a megfelelő csomagautomatáig. A szétválási pont meghatározására, és a részkörzetek létrehozására bemutatunk egy lehetséges módszert a stratégia leírása után.

Technológiai probléma

? *Hány drónt csoportosíthatunk egy rajba?*

Amennyiben ismerjük, hogy milyen típusú drónnal kívánjuk végrehajtani a tranzakciót, a korábbiakban már ismertetett szempontok (pl. zajsztint, mozgás közbeni szárny által okozott légmozgás) alapján megállapíthatjuk a drónrajok maximális méretet, vagyis hogy maximum hány drón alkothat egy rajt. Így egyszerűen kiszámolhatnánk, hogy adott számú aktuális igénypontot hány rajjal kell kiszolgálnunk. Egy automatához több drón is szállhat, ezt a rajszervezés során figyelembe kell vennünk.

4.2.4. A drónraj elindítása

A feladatok csoportosítása, vagyis a részkörzetek és a szétválási pont meghatározása, valamint a drónok rajokba szervezése után már egyértelművé válnak a rajok úticéljai és a tervezett útvonalak a depó → szétválási pont (rajban), valamint a szétválási pont → csomagautomata (egyedileg, vagy minirajban) viszonylatokban, melyeket a megfelelő légtér kezelő szerv engedélyezni tud, illetve kiadhatja rá a repülési engedélyt egy előre meghatározott időkeretben, mivel a tranzakciók hozzávetőleges időszükséglete is becsülhető. Az ezt követő feladat a rajképzés, vagyis a drónok felreptetése és az összekapcsolódásuk rajba.

Döntési problémák

? *Hány drónrajt indíthatunk egyszerre maximálisan egy depóból?*

A körzetben aktuálisan felmerülő igényeket a klaszterezés során egyszerre kezeljük, ezért logikus lenne egyszerre indítani a részkörzetekhez tartozó drónrajokat. Azonban a depóknak vélhetően korlátozott nagyságú terület fog rendelkezésükre állni a felszállás (és landolás)

¹⁰ miniraj = abban az esetben, ha egy csomagautomatához több drónnak is van szállítási feladata

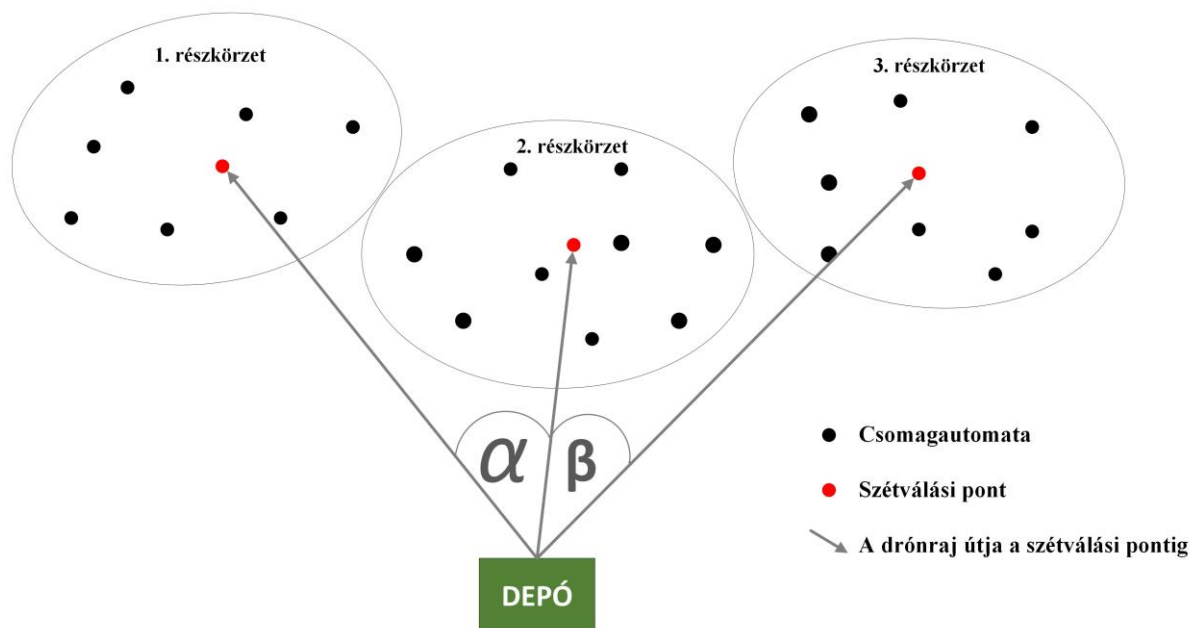
megvalósítására, ezért kevés az esély az egyszerre történő startolás megvalósítására is. Felmerülhetnek ezzel kapcsolatban továbbá terület kihasználtsági, de egyúttal technológiai kérdések is. Ezért fontos a depókhöz tartozó felszállásra (és landolásra) alkalmas területek nagyságát úgy meghatározni, hogy az minél jobb kihasználtságot eredményezzen, de a rajok indítása (és később fogadása) is kellő gyorsasággal és biztonságosan megtörténhessen.

? *Milyen sorrendben kellene a rajokat elindítani?*

Érdekes probléma a rajok indítási sorrendjének meghatározása. Egyik szempont lehetne, hogy a szétválási pontok depótól való távolságát vesszük alapul. Tehát minél távolabb van az adott részkörzet szétválási pontja a depótól, annál hamarabb indítjuk el az oda tartó rajt a feladatok végrehajtásának vélhetően nagyobb időszükséglete miatt. A másik szempont ennek a fordítottja, hogy a depóhoz legközelebbi szétválási pontú részkörzetbe indítjuk a rajokat korábban, hiszen minél hamarabb ellátják a feladatot és visszatérnek a depóba, annál hamarabb kaphatnak új feladatot. Fontos lehet továbbá az is, hogy a rajok útvonalai a szétválási pontokig mennyire vannak „közel” egymáshoz, azaz mennyire zavarhatják meg egymást, így az indítás sorrendje egy biztonságtechnikai kérdéskör is.

? *Milyen gyakorisággal lehet rajt elindítani?*

Ez a kérdés az előző kérdéssel szorosan összefüggő kérdés, hiszen meg kell vizsgálni, hogy az egymás után indítani kívánt rajok útvonala mennyire hasonló, azaz mennyire vannak „közel” egymáshoz (lásd fentebb). Abban az esetben, ha két rajnak közel azonos irányba kell elindulnia, valószínűleg többet kell várni az új raj elindításával a távortartási kritériumok betartása céljából.

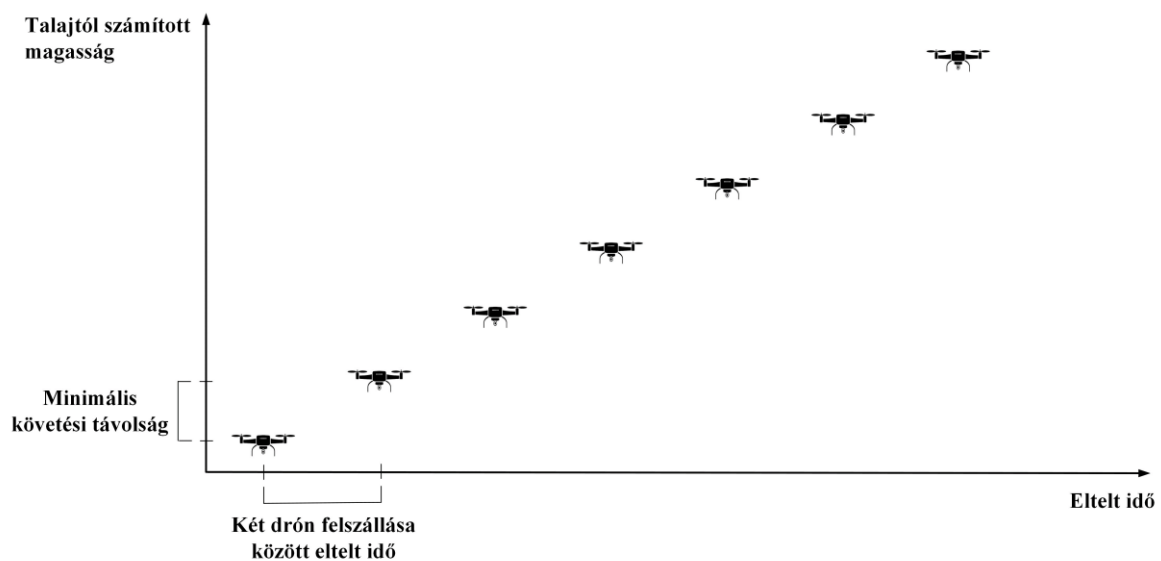


12. ábra: Két raj irányának különbözősége irányszöggel meghatározva

Azonban, ha a két raj iránya teljesen „különböző” (ahol a különbözőség és a közelség mértékét objektív módon definiálni szükséges pl. egy irányszög segítségével (12. ábra), akkor a várakozási idő egészen lecsökkenhet az átállási időre, azaz a rajok lényegében egymás után közvetlenül elindíthatóak. A sorrendet és a kapcsolódó indítási gyakoriságot tehát úgy lenne célszerű meghatározni, hogy az említett kritériumok figyelembevételével a lehető legkisebb legyen a startolás összesített átfutási ideje.

? *Egyszerre száll fel a raj minden tagja vagy egymás után?*

Könnyen megállapítható, hogy idő és erőforrás szempontjából egyszerűbb és hatékonyabb lenne, ha már a talajon tartózkodás pillanatában összekapcsolódna a raj és egy csoportként, egyszerre szállnának fel a rajba sorolt drónok. Azonban ehhez (az egy rajba sorolt drónok számától függően) jelentős méretű helyre lehet szükség. Ha nem lehetséges a depó mellett elegendő területet biztosítani, mindenképpen részekre (szakaszokra) kell bontani a felszállást. Amennyiben működik, hogy több drón egyszerre startol, akkor könnyebb dolgunk van, hiszen annyi szakaszra bontjuk a rajt, amennyi elfér a felszálló területen, mivel vélhetően kedvezőbb, ha két, vagy több részletben száll fel valamennyi drón, mintha egyesével indítanánk el azokat. Ha nem oldható meg az egyszerre történő felszállás és minden drónt egyénileg kell felreptetni, akkor azzal csökken a helyigény, azonban a raj elindításának időszükséglete sokszorosára nőhet, az előző megoldáshoz képest. Amennyiben egyesével reptetjük fel a drónokat, az először felszálló eszköz után a követési távolságot megtartva indulhat csak a következő (13. ábra). Egy depóhoz nem csupán egy fel- és leszállásra alkalmas terület tartozhat, ezért elképzelhető az is, hogy egy depón belül mindkét felszállási stratégia előfordul. Fontos tehát látni, hogy a depó elrendezése, kialakítása, layoutja is jelentős mértékben befolyásolhatja a hatékonyságot.



13. ábra: A drónraj tagjainak egyenkénti felszállása

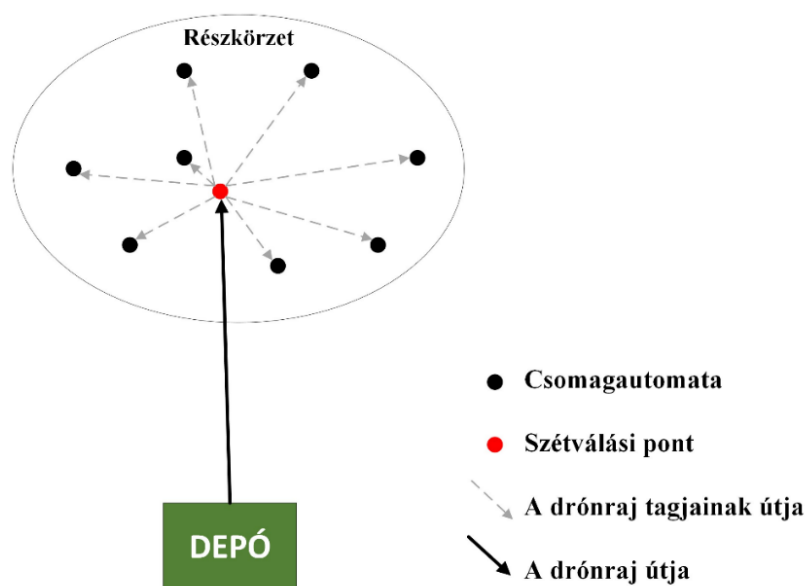
Technológiai probléma

? *Milyen hatással lesz a szállítási teljesítményre, ha egymás után reptetjük fel a drónokat?*

Bár még nem ismert, hogy pontosan hány drón képezhet egy rajt, mindenképpen fontos kiemelni, hogy ha a rajképzés egyenkénti startolással történik, akkor az elsőnek felküldött drónoknak lebegő pozícióban kell várakozniuk egy biztonságos pozícióban mindaddig, amíg a raj összes tagja fel el nem startolt. Ezzel sajnos használják az akkumulátorkapacitást, így a hatótávolság csökkenésével is számolni kell. Ezért is nagyon fontos kérdés a rajba rendeződés időszükségletének csökkentése, de a rajreptetés során minden olyan későbbiekben felmerülő addicionális időszükséglet, ami veszteségnek tekinthető, vagy szükséges, de nem értékteremtő a szállítási feladatok teljesítése tekintetében. A rajba rendeződés időszükséglete tipikusan a szükséges, de nem értékteremtő időszükséglet kategóriájába sorolható.

4.2.5. Összehangolt repülés a szétválási pontig

A rajba sorolt drónok a startolás, majd a rajképzés után a vezérdrónt követve végig haladnak a kijelölt és engedélyezett útvonalon a szétválási pontig (14. ábra). Fontos, hogy a technológia ezen fejlettségi szintjén a repülés már nem látótávolságon belül történik (BVLOS), továbbá ez a (jelenlegi) szabályozások alapján speciális kategóriájú műveletnek számít. A vezérdrónnak igen fontos szerepe van a műveletben, ugyanis a rajba sorolt drónok a repülés során lényegében a vezérdrón utasításait követik. A vezérdrón, technikai képességeiben az áruszállító drónoktól eltérő repülő szerkezet, hiszen nem célunk vele szállítási feladatokat ellátni, viszont alapfeladatuk a drónrajok mozgását koordinálni, így jellemzően a méreteit tekintve egy lényegesen kisebb, azonban tudását tekintve intelligensebb repülő szerkezet lehet.



14. ábra: A raj útja a szétválási pontig és a raj feloszlása

Döntési problémák

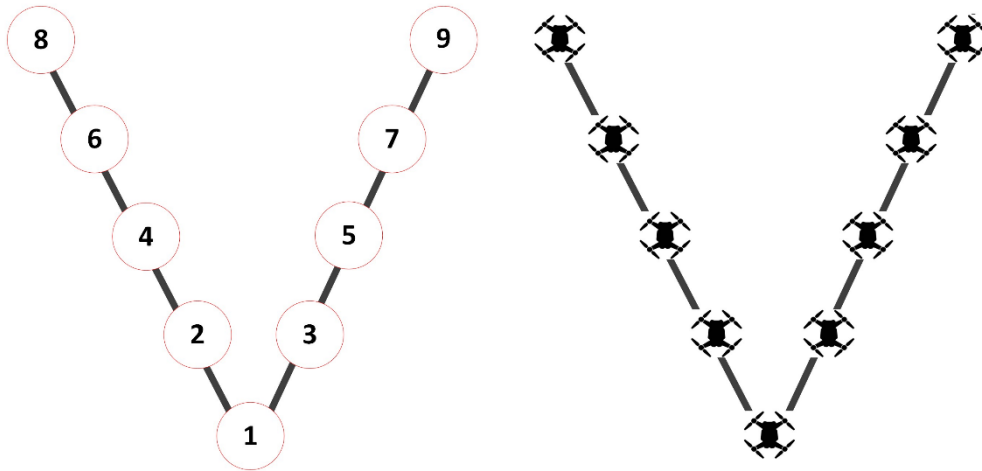
? *A vezérdrónt távpilóta segítségével irányítsuk, vagy autonóm módon repüljön?*

A fentieknek megfelelően tehát a vezérdrón határozza meg a raj útvonalát és körülötte helyezkedik el a raj többi tagja, melyek az elképzések alapján autonóm üzemmódban követik a vezérdrónt. A depóban a vezérdrón útja digitálisan követhető nyomon egy térképen, de a raj többi tagja egyenként nem feltétlen látszódik a könnyebb átláthatóság érdekében. Jó megoldás lehet, ha csak a raj körvonala látható a vezérdrónt jelölő pont körül, vagyis csak egy drónfelhőt jelenik meg vizuálisan. Két módon is elképzhető a vezérdrón irányítása, az egyik esetben humán erőforrásra is szükségünk van, azaz távpilóta segítségével irányítjuk a vezérdrónt. Előnye, hogy bizonyos problémák esetén gyorsabb beavatkozás érhető el, azonban fennáll az emberi hibázás lehetősége. Hátránya továbbá, hogy külön képzést szükséges biztosítani az irányítási tevékenységhez és bérköltséggel is számolni kell. A másik esetben teljesen autonóm módon, előre meghatározott paraméterek beállításával, de hasonlóképpen koordináltan történik a vezérdrón reptetése egészen a szétválási pontig. Előnye, hogy minimalizálható a humán erőforrás, bár kontroll alatt kell tartani, de nem szükséges folyamatosan követni a vezérdrón (és így a raj) útját. Hátránya viszont, hogy lényegesen körülményesebb lehet beavatkozni az esetlegesen felmerülő problémák esetén. Továbbá teljesen világos, hogy egy ilyen fokú automatizáció igen komoly technikai kérdéseket vet fel.

? *Milyen alakzatban repüljön a raj?*

Az élővilágból ismert „V” alakban repülés előnye, hogy a hátul repülő drónok elvileg kevesebb energiabefektetéssel tudnak repülni. Érdemes megvizsgálni, hogy a drónok tudják-e egymást segíteni ilyen téren. A nehezebb csomagot szállító drónok esetében az akkumulátor szempontjából mindenképpen kézenfekvő lenne, hogy ők ezekben az energiatakarékos pozíciókban tudjanak repülni. Egy másik szempont lehet, hogy a szétválás utáni úticél szabja meg a rajban elfoglalt helyet, hogy a szétválást követően ne keresztezzék egymás útvonalát a drónok. Vagyis a rajban elfoglalt optimális pozíció keresése fontos feladat, ahol több kritérium is figyelembe vehető. Ez a probléma egy klasszikus elrendezés tervezési problémához hasonlítható, ahol adott telepítési pontokra kell elhelyezni adott objektumokat, adott célkritériumoknak megfelelően. A drónok esetében amennyiben ismerünk egy jól működő alakzatot, amin belül adottak a lehetséges drón pozíciók, akkor egy megfelelő kvadratikus elrendezéstervezési modellt alkalmazva a drónokat az elhelyezendő objektumoknak tekinthetjük, vagyis csupán a fenti szempontokat integráló célkritériumokat kell matematikai formában megfogalmazni, és optimalizálhatóvá válik a drónok elhelyezkedése a rajban (15.

ábra). Ez a kérdéskör egyébiránt a fentebb már megfogalmazott rajképzéssel kapcsolatos kérdéseket is befolyásolja, ugyanis a megfelelő alakzatot és az ezen belül elfoglalt pozíciót a rajképzés során kell felvennie a drónoknak.



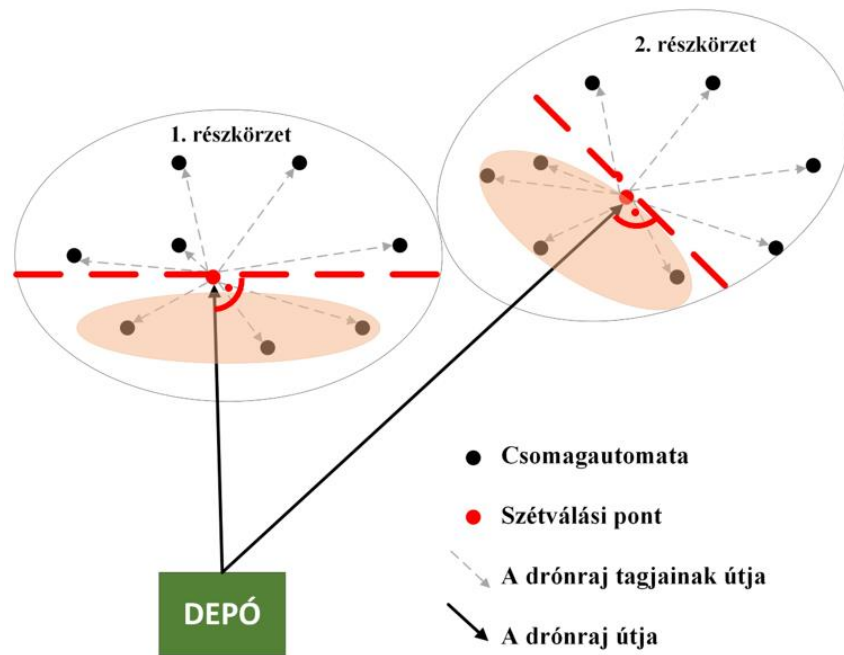
15. ábra: „V” alakban lehetséges elfoglalt pozíciók

[?] *Beavatkozás esetén mi történik?*

Bármikor előfordulhat, hogy a légtér egy másik felhasználója miatt, egy, vagy több drón meghibásodása miatt, vagy bármely más okból kifolyólag az operátornak be kell avatkoznia a folyamatba. Mivel ezek az esetek jellemzően vis-major szituációk kapcsán jelentkeznek, így ezeket a helyzeteket alaposan elemezni kell és végig kell gondolni a kezelés lehetőségét. Itt csak néhány ezzel kapcsolatos ötletet vezetünk fel. Úgy gondoljuk, hogy ilyen szituációkban az első lépés a raj megállítása lehet, majd a tagok lebegő pozícióban tartása. Amennyiben az egész rajt érintő a szükséges beavatkozás, egyszerűbb a helyzet, mert a vezérdrónon keresztül vélhetően kezelni lehet a problémát, hiszen a raj tagjai a vezérdrón utasításait követik. Viszont, ha csak egy (vagy néhány) drónt érintő a beavatkozás szükségessége, akkor valószínűleg lényegesen bonyolultabb a helyzet. Itt felmerülhet a problémás drónok rajról való leválasztása, a raj újrastrukturálása, de akár a raj teljes felbontásának opciója is. Mindegyik esetben fontos kérdés, hogy a problémás tagokkal mi történjen, milyen stratégiával lehet a legkisebb veszteséggel megoldani a felmerülő feladatokat.

[?] *Megéri-e elrepülni a rajnak a szétválási pontig, ha útba esik a szétválási pont eléréséig egy-egy kiszolgált csomagautomata?*

Mivel a rajok szétválási pontjai jellemzően a részkörzetek valamilyen szempontból kiszámolt súlypontjai (lásd később), így felmerülhet a kérdés, hogy az aktuális feladatok alapján meghatározott szétválási pontig megéri-e elrepülnie a rajhoz tartozó összes drónnak (16. ábra).



16. ábra: Példa egy lehetséges korábbi leválásra

Tegyük fel, hogy a fenti ábrán látható módon helyezkednek el a csomagautomaták egy körzeten belül. A rajképzés során megállapítottuk, hogy a szürke vonalon belüli pontokat szeretnénk kiszolgálni egy drónrajjal, és ehhez meghatároztunk egy szétválasztási pontot egy megfelelően paraméterezett súlypontszámítás segítségével. Az ábrán látható, hogy a depóból a szétválasztási pontba tartó irányvektor hatásvonalára a szétválasztási pontban merőlegest húzva több olyan igénypont is van, amikhez a raj az útja során nagyon közel repül el, vagy akár felette halad el. Felmerül a kérdés, hogy ilyenkor az ezekhez tartozó tranzakciókat elvégző drónok hamarabb is leválhatnak a rajról. Amennyiben a korábbi leválás mellett döntünk, akkor már a raj elindításakor „tudnia kell” a vezérdrónnak, hogy a rajt meg kell állítani az igénypont közelében, hogy a rajból biztonságosan kirepülhessen(ek) az eszköz(ök), ezzel csökkentve a megteendő távolságot, és spórolva az akkumulátor kapacitással. Másfelől ez a lehetőség összességében további megválaszolandó kérdéseket hoz elő. Alapvető kérdés, hogy egy adott körzet esetében hány esetben kellene megállnia a rajnak egy-egy korábbi szétválás miatt. Nem kerülne-e összességében több energia- és időfelhasználásba több ponton megállítani a rajt ezekben az esetekben, mintha egy ponton végezzük el ezeket a feladatokat? Meg kell-e állnia egyáltalán a rajnak egy-egy célzott kiválás során, vagy a kiválás elképzelhető technológiai szempontból a raj megállása nélkül is, egy lassítás, majd újra gyorsítás segítségével? Az egyszerűség kedvéért egyelőre azzal a stratégiával gondolkozunk tovább, hogy egy szétválasztási pontot határozunk meg minden raj esetében, mert ez a forgalomszervezés szempontjából, illetve a repülési feladatok koordinációja szempontjából is lényegesen egyszerűbb megoldásnak tűnik.

4.2.6. A drónok leválása a rajból a szétválási ponton

Az előre kijelölt szétválási pontot a vezérdrón érzékeli és rövid időre megállítja a rajt. A lebegő pozíció után a drónfelhő a rajképzés fordított sorrendjében feloszlik, a drónok megszakítják egymással a kapcsolatot és így megtörténik a szétválás. Előfordulhat, hogy egy rajon belül egy csomagautomatához több drónnak is el kell repülnie, ezért minirajok válhatnak le az eredeti rajból. Amelyik automatánál csak egy feladatot kell elvégezni, ahhoz értelemszerűen a kijelölt drón egyedül, önállóan fog elrepülni.

Döntési probléma

? *Mi történjen a vezérdrónnal a szétválást követően?*

A legegyszerűbb megoldás az lenne, hogy amint végez a feladatával a vezérdrón, repüljön vissza a depóba. Azonban átgondolva a problémát, a vezérdrón által megtett veszteségnek tekinthető felesleges utak minimalizálása érdekében előkerül egy olyan elképzelés, hogy a vezérdrón ne repüljön feleslegesen vissza, hanem a szétválási ponton adjunk számára új feladatot. Az, hogy pontosan hova kerüljön az eszköz a szétválást követően, attól függ, hogy ismerjük-e az egyes rajokba besorolt csomagszállító drónok tranzakció teljesítéseinek pontos időpontjait. Két verzió lehetséges, az egyik szerint lebegő pozícióban várakozik a vezérdrón a szétválási ponton (közben merítve az akkumulátort), a másik lehetőség, hogy elindul egy következő rajképzési találkozási pontra. Ez a kérdéskör szorosan összefügg a visszaút szervezésének problémájával, ezért ezt részletesebben a 4.2.9. pontban fejtjük ki.

4.2.7. A drónok önálló repülése a kijelölt csomagautomatákig

A szétválást követően a drónok a vezérdrónt maguk mögött hagyva egyedileg, önállóan indulnak el a csomagautomatákig automata repülési üzemmódba kapcsolva egy célrepülési feladatot teljesítve. Előfordulhat, hogy egy csomagautomatához több drón is hozzá lett rendelve, ekkor ezek az eszközök egymást követve indulnak el, amit egyfajta minirajként képzelhetünk el.

Döntési problémák

? *Mi történjen, ha egyszerre több drónt kellene fogadnia egy csomagautomatának, amelyek egy rajból váltak ki?*

A jelenlegi kísérleti üzemmódban működő csomagautomata megoldások csupán egy drón dokkolására alkalmasak, ezért amikor egy miniraj megérkezik a csomagautomatához, mindenképpen sorállás következik be a repülés közben felvett alakzattól függetlenül. Ez természetesen minden olyan további esetben is előfordulhat, ha a csomagautomatába integrált dokkoló helyek száma kisebb, mint a minirajban megérkező drónok száma. Ebben az esetben a

csomagautomatáknál egyfajta várakozó sor fog képződni. A sor hosszát meghatározza, hogy hány drónnak kell az adott célponton feladatot teljesíteni, továbbá az is, hogy hány kiszolgáló csatorna (azaz dokkoló állomás) van a csomagautomatába integrálva, valamint milyen gép-gép interakciós (kiszolgálási) időkkal kell számolni az automatáknál. A sorállás elképzeléseink szerint szintén egy lebegő pozícióban képzelhető el, ahol a drónok a célpont felett, megfelelő magasságban, egymástól repüléstechnikai szempontból megfelelő távolságra várakoznak a célpontra való rárepülésig. Sorálláskor bizonyos szempontokat mérlegelve eldöntjük, hogy milyen sorrendben szolgálják ki a drónokat a csomagautomaták, amíg az egyik elvégzi a csomagleadást, addig a többi lebegő pozícióban várakozik, majd a lebegésre kényszerülő drónok is szépen sorban dokkolnak és megtörténik a csomagkezelés. Érdekes kérdés, hogy egy-egy csomagautomatás hány dokkoló állomással érdemes a későbbiek során felszerelni. Ez a probléma szintén egy olyan méretezési feladat, ahol a tömegkiszolgálási rendszerek modellezésében és méretezésében is alkalmazható sorbanállási modelleket lehet alkalmazni a kiszolgálási szempontból, illetve a drónok várakoztatása szempontjából optimális dokkoló helyek számának meghatározásában.

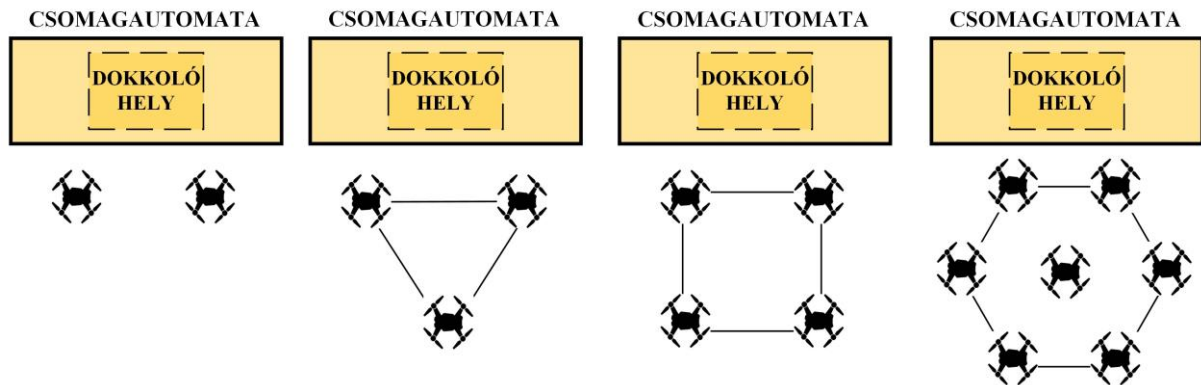
? *Egy minirajon belül melyik drón szálljon le először a csomagautomatához?*

Az akkumulátor szűkös kapacitását tekintve elsődleges szempont, hogy a drónoknak minél kevesebbet kelljen várniuk, azaz ne legyen felesleges energiahasználat. Számít, hogy a minirajon belül hogyan helyezkedtek el a drónok, észszerűnek tűnik, hogy az a drón szálljon le először, amelyik a leghamarabb éri el a csomagautomatát. Az eszközök valószínűleg más és más tömegű csomagokat szállítanak, a nagyobb tömegű teher pedig nagyobb mértékben terheli az akkumulátor kapacitását. Emiatt fontos figyelembe venni ezt is, a kiszolgálási sorrend (és a drónok minirajon belüli elhelyezkedésének) kialakításakor, vagyis vélhetően a nagyobb tömegű csomagokat kell előnyben részesíteni és minél hamarabb a célállomásra juttatni.

? *A minirajon belüli sorállás vízszintesen vagy függőlegesen történjen?*

Amennyiben „vízszintes” sorállást képzelünk el, fontos, hogy a minirajon belüli tagoknak ne pontosan ugyanazt a koordinátát adjuk meg a várakoztatás helyeként az ütközés elkerülésének érdekében. Az előírt minimális követési távolsággal számolva érdemes meghatározni a pontos helyet és magasságot, ahol majd az első drónt kivéve az eszközök lebegő pozícióban fognak várakozni. Érdekes kérdéskör lehet a várakozási alakzatok meghatározása, melynek célja, hogy minél kisebb területen, minél több drónt lehessen várakoztatni biztonságosan, elkerülve az ütközést. Így a különféle várakozó drónszámok esetén különféle várakozási alakzatok jöhetnek szóba. Két drón esetén a drónok várakozhatnak egymás mellett,

három drón esetén egyenlő oldalú háromszög, négy drón esetén négyzet alakzatban. Négynél több drón esetében pedig különféle csomópontokból álló „drónháló” rajzolhatók fel. Pl. hét várakozó drón esetén egy egyenlő oldalú háromszögekből kialakított hatszögháló (a három várakozó drón esetét mintázva), melynek a geometriai középpontjában is várakozhat egy drón (17. ábra).



17. ábra: Várakozási alakzatok a drónok számától függően

Szintén fontos kérdés lehet, hogy a várakozási alakzaton belül melyik drónt melyik pozícióban várakoztassuk. Ezt a kérdést a megállapított kiszolgálási sorrend is nagyban befolyásolhatja. Azonban „vízszintes” sorállás nagy előnye, hogy a drónok a várakozó pozícióikból közvetlen (egyenes úton) tudnak a dokkoló állomáshoz repülni a kiszolgálási sorrendtől függetlenül.

Elviekben a „függőleges” sorbanállás esete is elképzelhető. Ilyen esetben a vízszintes sorállási layoutokat függőleges irányúvá kell konvertálni. Fontos azonban látni, hogy ilyen esetekben felértékelődik a kiszolgálási sorrend kérdésköre, hiszen mindenképpen az elsőként kiszolgálandó drónoknak kell az alsóbb pozíciókban elhelyezkedni, hogy biztosítható legyen a dokkolókhoz való egyenes vonalú célra repülés. Minden egyéb esetben plusz járulékos manőverek végrehajtására van szükség a dokkolóhoz való eljutás megvalósításához.

Technológiai probléma

[?] A miniraj és az önálló drónok hogyan jutnak el a szétválási ponttól célhelyig?

A szétválási pont érzékelése és a szétválásra jeladás után a továbbiakban önállóan repülő drónokat automata repülési módba szükséges kapcsolni, mivel ezen a szakaszon a vezérdrónra már nem számíthatnak. Az önálló repülést automata (de természetesen kontrollált) módon a legcélszerűbb kivitelezni, hiszen így minimalizálható a humán erőforrás és az emberi hibalehetőség. Az önállóan feladatot teljesítő drónok esetében egyszerűbb a feladat, hiszen elegendő beállítani a csomagautomata koordinátáit és a dokkolás tervezett magasságát, és az

eszköz gond nélkül képes elvégezni a célra való rárepülést. Egy minirajon belül az elsőként kiszolgált drón ugyanúgy viselkedik, mint egy önállóan a feladatát teljesítő drón (lásd fentebb). A többi drón esetében azonban az első célrepülési feladat a várakozó pozícióig való repülés végrehajtása. Ennek a feladatnak az esetében definiálni kell, hogy milyen magasságban, milyen várakozó alakzatban, és ezen belül melyik drón milyen pozícióban várakozzon lebegő helyzetben. Amikor az első drón végzett a tranzakcióval, akkor megfelelő időrendben egy újabb automata repülési szakasszal kezelhető a többi drón dokkolóhoz való eljuttatása, így esetükben a szétválási ponttól a csomagautomatáig tartó szakasz két egymás utáni automata repüléssel (és közte egy várakoztatással) oldható meg.

4.2.8. A csomagok bekerülése a csomagautomatába

A csomagautomata technikai kialakítása tekintetében a 2.2.2. pontban bemutatott, már létező megoldás tűnik alkalmazhatónak, ami egy dokkoló állomáson keresztül képes a drónok fogadására és a csomagok automatikus kezelésére a csomagautomatán belül, a megfelelő csomagazonosítás megléte esetén. Az automata érzékeli a drón megérkezését a dokkolóra, a csomagot az automata tetején keresztül a konténerből az eszközbe juttatjuk, ami a megfelelő átdó fiókhoz (rekeszhez) juttatja el a csomagot a csomagazonosító leolvasása után. Innentől kezdve a csomag átvételre kész állapotba kerül. Bár rendkívül érdekes kérdés, de az automata belső felépítésével, az itt alkalmazott technológiával ennek a dolgotnak nem célja foglalkozni.

Döntési probléma

? *Mi történjen a drónnal közvetlenül a tranzakció elvégzése után?*

A feladat teljesítését követően a drónoknak valahogyan vissza kell jutni a depóba. Ez többféleképpen is elképzelhető, itt szeretnénk visszautalni a 6-os pontra. Ezen kérdéskör is attól függ, hogy mennyire lehetséges relatíve pontosan kiszámítani a drónok tranzakció teljesítéseinek várható időpontjait. Amennyiben igen, akkor lényegében előre tudjuk tervezni a visszaút szervezését is (lásd: 4.2.9. pont), azaz az ideális találkozási pontot korábban meg lehet határozni és a drónokat azonnal elindíthatjuk erre a pontra. A valószínűbb eset azonban az, amikor nem tudjuk pontosan kiszámolni a külső körülmények miatt a tranzakciók teljesítésének pontos időpontját, annak csak a várható értékét tudjuk becsülni. Ekkor valójában csak a teljesítések után vagyunk képesek megállapítani a találkozási hely ideális koordinátáját, azaz a drónnak a gép-gép interakció után a csomagautomata „közelében” célszerű várakoznia lebegő pozícióban addig, amíg megkapja az utasítást, hogy mikor és hová (milyen találkozási pontra) kell tovább repülnie, vagy ha erre lehetőség van és nem tartja fel a további tranzakciók

kezelését, akkor az automatán dokkolva kell a drónnak ezt az időpontot megvárni, amely idő alatt akár az akkumulátor töltése is elképzelhető. Amennyiben lebegő állapotban kell várakoztatni a szerkezet(ek)e(t) (akár több drónt is), akkor erre ugyanazok a stratégiák és alakzatok képzelhetők el, mint a kiszolgálás előtti várakoztatás esetében.

4.2.9. A drónok önálló repülése a találkozási pontig

A tranzakciók sikeres teljesítése után a drónok a választott visszatérési stratégia alapján indulnak el a találkozási pontra.

Döntési probléma

? *Hol legyen a találkozási pont? Mikor tudjuk meghatározni ezt koordinátát?*

A problémát a már korábban említett kérdés felől közelítjük meg, azaz, hogy ismerjük-e a drónok tranzakció teljesítéseinek relatíve pontos időpontjait. Amikor egy vezérdrón a hozzá tartozó rajt elvezeti a szétválási pontig, majd szétválnak, a vezérdrónnak új feladatot célszerű adnunk a veszteségek csökkentése érdekében. Ideális esetben pontosan ki lehet számolni, hogy egy adott depóból indított raj egy kiválasztott drónja mikor teljesíti a feladatát, azaz melyik időpillanatban hagyja el a csomagautomatát. Ez szerencsés helyzet lenne, hiszen ekkor már a raj elindítása előtt ki lehetne számolni a találkozási pont helyét. Amint felszabadul egy vezérdrón (teljesítette a feladatát a szétválási ponton), összegyűjti azokat a drónokat, amelyek körülbelül egy időpontban és nagyjából hasonló helyen teljesítették a kiszállítási tranzakciókat. Mivel már előre kiszámítható, hogy mikor végeznek az eszközök, ezért már az indítás előtt meg határozható, hogy a vezérdrón mely további drónokkal alkotja majd az új rajt a hazaútra, tehát a szétválási pontról már azonnal repülhet tovább a találkozási pontra (ahol lehet, hogy várakoznia kell majd). Emiatt a szétválási pont meghatározásánál használt modellezési eszközrendszer alkalmazásával az ideális találkozási pont(ok) (több vezérdrón együttes alkalmazása esetén) is meghatározhatók, viszont ebben az esetben már a csomagok tömegével nem kell számolni, tehát elvileg egy egyszerű koordináta alapú területi súlypont számítást célszerű elvégeznünk. Amit viszont figyelembe vehetünk, az a drónok fennmaradó akkumulátor kapacitása, tehát úgy határozzuk meg a találkozási pontot, hogy a legkevesebb energiával rendelkező drónnak kelljen a legkevesebbet repülnie összesen. Számolhatunk például a tranzakció elvégzésekor mért akkumulátor kapacitással úgy, hogy súlyozzuk a pontokat a fennmaradó kapacitás százalékos értékének reciprokával. Azonban számos tényező befolyásolhatja a kapacitást, emiatt a fennmaradó akkumulátor kapacitás becslésére, azaz az energiafelhasználás becslésére olyan matematikai megoldásra lenne szükség, amely minden olyan tényezőt figyelembe tud venni, melyek erőteljesebb hatást gyakorolhatnak az

akkumulátor töltöttségi szintjére. A tényezők, melyeket mindenképpen figyelembe kell vennie egy ilyen matematikai megoldásnak: a *drón mozgását* leíró paraméterek (megkülönböztetve a vízszintes, függőleges és lebegő mozgást); a *tömeg* (ami a drón teljes tömegét és a szállított hasznos terhet jelenti); az *időjárási körülményeket* leíró paraméterek (különös tekintettel a szélre, hiszen a szél egyaránt gyakorolhat pozitív és negatív hatást is); valamint a *repülési magasságot*. Ilyen energiafogyasztási modell megalkotására már voltak kísérletek, ahol az előbb felsorolt tényezők hatását vizsgálták különböző dróntípusokon. A kísérlet eredményeképpen megállapították, hogy emelkedésnél az energiafogyasztás növekszik és a függőleges mozgásoknál nagyobb a teljesítményingadozás, mint vízszintes mozgás esetében. A vizsgált dróntípus esetében az energiafogyasztás lineárisan növekedett a szállított teher tömegével. Bár meglepőnek tűnhet, de a szembeszéllal való repülés kisebb energiafogyasztással járt egészen addig, amíg a szél sebessége el nem ért egy bizonyos értéket. [34]

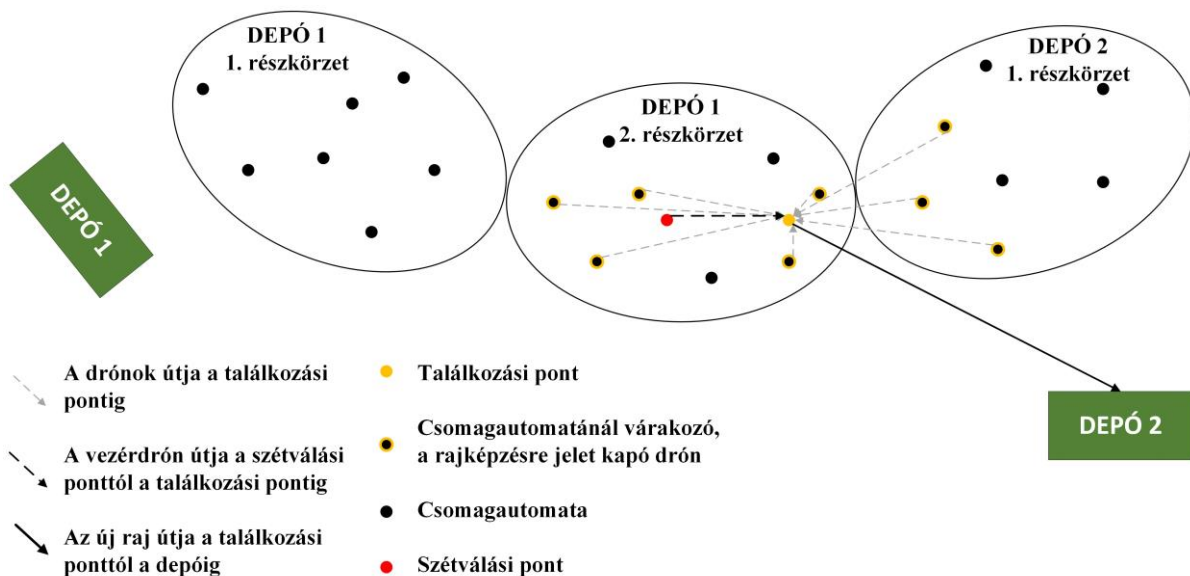
Árnyaltabb a szituáció akkor, ha nem tudjuk előre megjósolni a tranzakciók teljesítésének pontos időpontját. Sajnos ez a valószínűbb, mivel számos tényező közbeszólhat. Például a különböző légmozgások, a szél kiszámíthatatlan körülmény, vagy előfordulhat, hogy valamilyen akadállyal találkozik a raj (pl. madár), amely helyzetet kezelni kell. Ezért amikor a tranzakciók teljesülnek a csomagautomatánál, a drónokat valószínűleg várakoztatni kell a rajképzésig, de fentétlenül az a cél, hogy minél előbb el tudjanak indulni, hogy az akkumulátor minél kevésbé merüljön és vissza tudjanak jutni a depóba. A valós teljesítési időpontokról pontos információi vannak az irányítóközpontnak, így az elhelyezkedés alapján megtörténhet a találkozási helyek (azaz a rajképzési pontok) kiszámítása, szintén az előbb említett centrumkeresési modell alkalmazásával. Érdekes kérdés lehet azonban annak az ideális időablaknak a megtalálása, ami meghatározhatja, hogy milyen időközönként érdemes a pozíció adatok alapján a visszatéréshez új rajokat képezni. Ehhez a feladatteljesítések várható időpontjaira nézve feltétlenül érdemes előzetes becsléseket létrehozni még abban az esetben is, ha ezek nem teljesen pontosak, és több tényező befolyásolhatja az értéküket, hiszen a vezérdrónoknak minél hamarabb meg kell határozni, hogy hol lesz a találkozási pont, hogy minél hamarabb el tudjanak indulni a rajképzés helyére. Ellenkező esetben előfordulhat, hogy a vezérdrónokat célszerűbb (és biztonságosabb) a depóba visszahívni a szétválási pontokról.

A rajok megszervezését követően elsőként a vezérdrónoknak kell továbbítani a megfelelő koordinátákat, hiszen elvárható, hogy a találkozási pontra elsőként a vezérdrón érkezen meg. Ezt követően a vezérdrón utasítására, továbbá a találkozási helyet meghatározó pozícióadat megfelelő drónoknak történő továbbítása után elkezdődik a rajok képzése a visszatéréshez. A

lebegő pozíciók megszűnnek és a drónok célrepülést hajtanak végre a találkozási pontig, ahol megtörténhet a rajképzés.

Fent bemutatott megoldások mind „szép” alapelvek, azonban van egy mindent felülíró, és jelenleg a leginkább kritikus pont a rendszerben, ez pedig az akkumulátor. A kritikus akkumulátor töltöttségi szint számos helyen befolyásolhatja az egyes forgalomszervezési lépéseket. Alacsony töltöttségi szint esetén ugyanis a drónoknak (legyen az akár vezérdrón, akár egy csomagszállító drón) egy megfelelő vészhelyzeti scenáriót kiválasztva mihamarabb vissza kell térnie a depóba. Ez természetesen eredményezhet olyan helyzeteket, amikor a repülő szerkezet az eredeti forgalomszervezési metódusoktól eltérő mozgással fog visszajutni a depóba.

Fentiek miatt fontos tehát hangsúlyozni, hogy a depó felé irányuló visszaút már nem feltétlenül ugyanazon összetételű rajokkal valósul meg, mint a depókból a célpontok irányába tartó út. Megtörténhet, hogy több részkörzet drónjaiból fog összeállni egy újabb (18. ábra) a depó felé tartó útra.



18. ábra: A visszatérési stratégia útvonalai

4.2.10. Új rajba szerveződés a találkozási ponton

A találkozási pont elérésekor a valószínűleg új összetételű raj drónjai megkeresik a rajban elfoglalt helyüket. Néhány másodpercre megállnak lebegő pozícióban, és ezután indulnak el vissza a depóba. Az alkalmazott alakzatok meghatározása, továbbá a felvett alakzaton belüli pozíciók kiosztása hasonló módon működhet, mint a kezdeti rajképzés során az odafelé tartó út előtt. Ennél a pontnál a drónok között különbséget lehet tenni a fennmaradó akkumulátorkapacitás alapján, mert az eszközök más és más állótávolságot tettek meg, és más

és más tömegeket mozgattak. Az alakzat felvételekor úgy érdemes elhelyezni a drónokat, hogy a kevesebb energiával rendelkezők kerüljenek olyan pozícióba, hogy a legkorábban tudjanak majd leszállni, illetve a legkisebb becsült energiafelhasználással tudjanak eljutni a depóig.

4.2.11. A raj összehangolt repülése vissza a depóba

A vezérdrón irányításával a drónfelhő elindul a találkozási ponttól a depó felé egy célrepülési feladatot teljesítve, és a depónál egy kijelölt pozícióra és magasságban érkezik meg. A depóban (a már fentebb a felszállításnál is tárgyalt okokból kifolyólag) valószínűleg nem elég egyetlen egy leszálló helyet biztosítani, ezért több opció is lehetséges a repülés befejezésének pontos helyére nézve. De talán elsőként ennél is fontosabb kérdés, hogy a találkozási pontról melyik depót célozza meg a vezérdrón.

Döntési probléma

? *Melyik depó felé irányítsuk a drónfelhőt a vezérdrón segítségével?*

Kézenfekvő, hogy figyelembe kell venni, hogy melyik depó esik közelebb a találkozási ponthoz, de más szempontok is befolyásolhatják a döntést. Ilyen lehet pl. hogy milyen leszállási operációs időkkal lehet számolni, hány raj vette eddig célba az adott depót, van-e megfelelő kapacitás a drónok kezelésére, nem lesz-e egyenlőtlen a drónok elosztása, az új feladatok tervezése szempontjából stb. Figyelembe kell venni továbbá a céldepókból kifelé irányuló (azaz a felszállási) forgalmat is. Fontos végig gondolni például, hogy hogyan lehet a fel- és a leszállási forgalmat megfelelő módon (térben és/vagy időben) elkülöníteni egymástól, ami további igen komoly forgalomszervezési problémákat eredményezhet és szintén hatással lehet a céldepó megválasztására. Ebből a néhány gondolatból is látszódik, hogy milyen összetett kérdéssel állunk tehát szemben.

? *Hogyan szervezzük az érkező raj kiszolgálását és drónok leszállásai folyamatát?*

Nem elhanyagolható körülmény tehát, hogy egyszerre több raj is repülhet a depó felé, miközben egy raj éppen landolni készül. Emiatt ennél a kérdésnél a repülési és a leszállási időket feltétlenül prognosztizálni kell annak megtervezése érdekében, hogy milyen landolási stratégiát célszerű követni. A leszállási feladatok szervezése során hasonló problémával szembesülhetünk, mint a felszállási feladatok szervezése esetén (lásd 4.2.4. pont). A leszállási idő értéke a leszállás módjától függ, azaz, hogy egyesével, vagy egyszerre szállnak-e le a szerkezetek. Amennyiben egyesével, vagy kisebb csoportokban, akkor a rajhoz tartozó drónok száma alapvető, hiszen minél több drónból áll egy felhő, annál több időt vesz igénybe a leszállás. Nem kérdés továbbá, hogy a rajban a drónok leszállási sorrendjét jelentős mértékben

befolyásolhatja a fennmaradó akkumulátor kapacitás is. Ebbe a sorrend képzésbe értelemszerűen bele kell érteni a vezérdrónt is. Bár normál esetben alapvetően a vezérdrón landol utoljára, azonban ezt befolyásolhatja a vezérdrón fennmaradó akkumulátor kapacitása is. Egyszerűbb a helyzet, ha a leszállóhely kialakítása olyan, hogy a rajba tartozó drónok akár egyszerre is képesek lehetnek leszállni. Értelemszerűen ez eredményezheti a legkisebb kiszolgálási időszükségletet. Elengedhetetlen a leszállás helyes ütemezése, viszont még ebben az esetben is előfordulhat, hogy egy rajnak várakoznia kell a leszállás megkezdése előtt. Ebben az esetben ugyanazok a várakoztatási stratégiák képzelhetők el, mint a célpontok esetében, viszont itt a várakozó drónok száma jóval nagyobb, így különösen fontos szerepe van az orientáció (vízszintes vs. függőleges) és a helyes alakzat megkeresésének. A várakozás ismét sorállást eredményez, aminek alapos vizsgálata, és a probléma tömegkiszolgáló rendszerként történő modellezése alapján méretezhető a drón depó kiszolgálási kapacitása is, így például a leszállóhelyek száma, földi kiszolgáló gépek száma, vagy a humán erőforrás nagysága.

Techológiai probléma

? *Milyen legyen a depó kialakítása?*

A depók kialakítása tekintetében is több variáció képzelhető el, azonban érdemes mérlegelni, hogy a többféle depó kialakítás (kapacitás, le- és felszállító helyek architektúrája stb.) akár a céldepó kiválasztása során is szempont lehet, hiszen ebben az esetben eltérő tulajdonságokkal fog rendelkezni az adott infrastruktúra, ami természetesen bonyolítja a céldepó kiválasztását is, de akár a kiszolgálási feladatok szervezésére is hatást gyakorolhat. Ezek miatt érdemes lehet hasonló kialakítású drón depókat létrehozni. Ez a kérdéskör értelemszerűen a felszállási folyamatok szervezésére is jelentős hatást gyakorol.

4.2.12. A drónok érkezésének kezelése a depóban

Függetlenül attól, hogy a drónok egyszerre vagy egyesével szállnak le, mindenképp szükség van valamilyen földi kiszolgálásra. A legegyszerűbb verzió valamilyen humán erőforrás által támogatott intralogisztikai rendszer kialakítása, tehát a drónok megérkezésekor egy vagy több operátor, illetve valamilyen gépesített anyagmozgató eszköz segítségével történhet meg a drónok összegyűjtése.

Egyenkénti, vagy kisebb csoportokban történő landolás és kiszolgálás esetében ennek a begyűjtési feladatnak a szervezése kisebb probléma. Ha viszont egyszerre több drónt kell begyűjteni a landolás után, akár viszonylag nagyobb területről, akkor érdemes lehet egy előre meghatározott, legrövidebb utat, illetve a legrövidebb begyűjtési időt eredményező útvonalon haladnia a földi kiszolgálónak, hogy a következő raj minél hamarabb megkezdhesse a leszállást.

Az egyenkénti, vagy a kisebb csoportokban történő leszállás esetén a minimális követési távolság, illetve landolási időköz megállapításakor tehát figyelembe kell venni a drónok összegyűjtéséhez szükséges földi kiszolgálási operációs időt, ami szorosan összefügg a többi drón várakoztatási idejével a levegőben. Minél gyorsabb földi kiszolgálást vagyunk képesek megvalósítani, annál kevesebbet kell várakozniuk a drónoknak a levegőben.

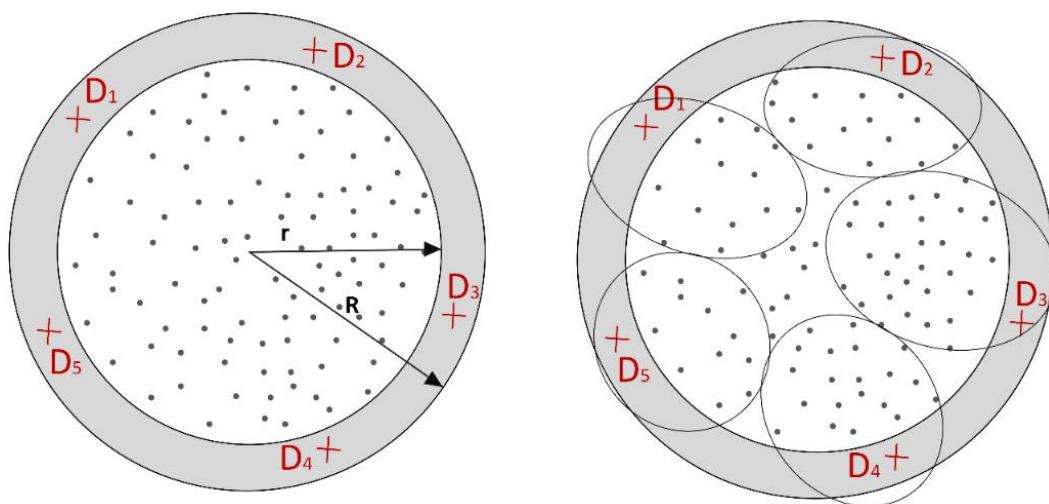
Mindemellett érdemes megemlíteni, hogy ezen a technikai fejlettségi szinten természetesen az is elvárható lehet, hogy ezeket a begyűjtéssel kapcsolatos intralogisztikai feladatokat valamilyen automatizált anyagmozgató rendszer segítségével támogassuk. Ebben az esetben szóba jöhet akár szakaszos, akár folyamatos működésű gépekből álló szállítórendszer is, hiszen akár egy szállítópálya rendszer, de akár AMR-ek segítségével is elképzelhető a drónok mozgatása a leszálló pozíciók és a drón depó belső területei között. Automata rendszerek alkalmazása esetén a fentebb definiált kiszolgálás szervezési problémák hasonlóképpen megoldásra várnak.

4.3. Lehetséges döntéstámogató modellek a felmerülő problémákra (példák)

4.3.1. A depók elhelyezése és a körzetek kialakítása

A rendszer kialakításának egyik legfontosabb része, ami a későbbiekben az egész stratégia szervezésére kihat, az a depók optimális elhelyezése. A problémát egy speciális többkörzetes centrumkeresési problémaként képzelhetjük el, ahol a depók helye részben kötött. Egy nagyjából kör alakú városszerkezetet tekintve (pl. Budapest) a depókat minden bizonnyal nem érdemes a város forgalmasabb részein kialakítani. Abból a feltételezésből indulunk ki, hogy valószínűleg egy körgyűrűhöz hasonló területre telepíthetjük a depókat, ami a város szélén helyezkedik el. Ezért beszélhetünk részben kötött telepítési problémáról, mivel adott egy terület, ahova telepíthetjük a létesítményeket, ezen kívül elhelyezkedő telepítési pozíciók nem elképzelhetők. A valóságban természetesen ennyire nem egyszerű a helyzet, mivel előfordulhatnak olyan szabad telepítési helyek a város széle felé haladva, ahol még akad szabad, alkalmas, megfelelő méretű hely. Többkörzetes a probléma azért, mert a kiszolgálandó területet a fentebb már bemutatott repülési hatótávolság problémái miatt minden bizonnyal körzetekre kell osztanunk, ahol az eljárás minden körzethez keres egy, a feltételeinket kielégítő optimális centrumpontot. Ezeken a helyeken lesz célszerű a depókat kialakítani. Feladatunk tehát meghatározni a szükséges depók számát, ami függ például a depók tervezett kapacitásától, az igények és tranzakciók várható számától és tulajdonságaitól (pl. mozgatott tömegek), a csomagautomaták pontos elhelyezkedésétől, a depók lehetséges helyeitől, valamint a drónok akkumulátor kapacitásából is adódó repülési hatótávolságtól.

Szemléltetésképpen a 19. ábrán látható módon képzelhetjük el a problémát. Keresünk egy olyan „ r ” és „ R ” sugár méretet, amelyek által meghatározott körgyűrűben szeretnénk elhelyezni a depókat. Az igénypontok, azaz a csomagautomaták tervezett helyei adottak. Adott vizsgálni tervezett depószám esetében egy centrumkeresési feladatot szükséges megoldanunk, amivel kialakulnak a körzetek és a depók javasolható telepítési helyei. Kialakul egy körzetezési rend, vagyis a csomagautomaták így egyértelműen besorolásra kerülnek egy-egy depóhoz, a hozzájuk tartozó tranzakciókat végző drónok tehát mindig abból a depóból lesznek elindítva a csomagautomaták felé, ahová az automaták tartoznak. A depóstruktúra tervezése során értelemszerűen több scenáriót érdemes vizsgálni, melyeknek alapvető változója lehet az eltérő depószám. A depók számának növekedésével a körzetek vélhetően egyre kisebbek lesznek, és egyre nagyobb az esély arra, hogy minél több csomagautomata egyértelműen besorolható legyen egy-egy depóhoz (azaz körzethez). A drónok repülési hatótávolságától függően azonban sajnos előfordulhat, hogy a körzetbe sorolásból néhány csomagautomata kimarad, mert a depóból elindulva feltételezhetően nem jutna el odáig és vissza a drón. A kimaradó automatákat magába foglaló terület valószínűleg a kiszolgált terület közepén lesz (19. ábra jobb oldal). Erre az elsődleges megoldás lehet a drónok akkumulátorának fejlesztése a nagyobb hatótávolság elérése érdekében, vagy ha erre van mód (bár valószínűleg kisebb az esélye), akkor egy centrális depó létrehozása új utakat nyithat meg.



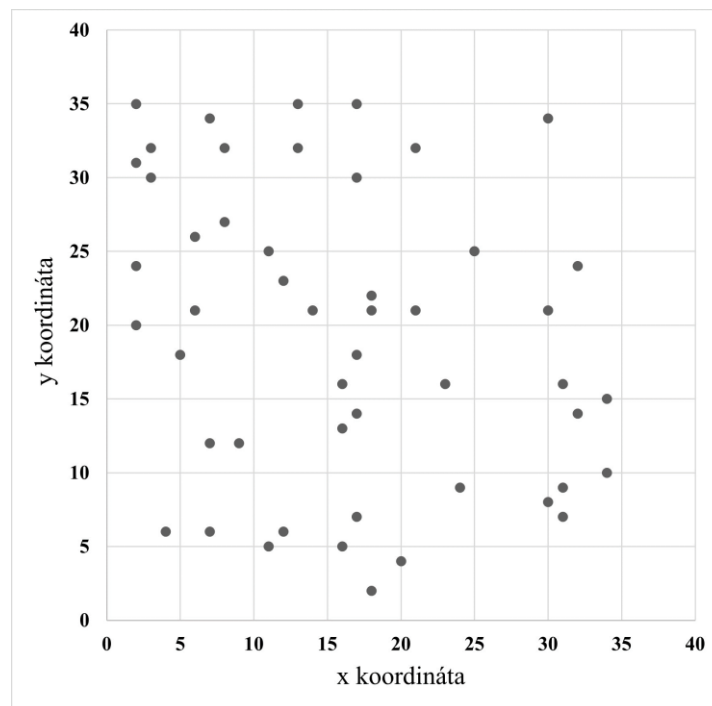
19. ábra: Depók elhelyezése centrumkereséssel és az így kialakult körzetek

A körzetek felülvizsgálatára időnként figyelmet kell fordítani, ugyanis a csomagszállítási igények, és így a tranzakciók számának növekedésével növekedhet a kiszolgált csomagautomaták száma is. Emiatt szükség lehet a depók kapacitásnak bővítésére, esetleg teljesen új depók létrehozására is a meglévők mellett, ami a körzetezés teljes újragondolását eredményezheti.

4.3.2. A drónrajok létrehozásának támogatása az aktuális kiszállítási feladatok alapján

A bemutatott modellben feltételezzük, hogy a depók pontos helyei adottak, a csomagautomaták koordinátái is ismertek. Egy körzetet (illetve az abba sorolt csomagautomatákat) mindig az előre hozzárendelt depóból szolgálunk ki, azaz, ha már besoroltunk egy csomagautomatát egy körzetbe, mindig ugyanabból a depóból szolgáljuk ki azt, tehát a csomagautomaták körzetbe sorolása ennél a pontnál nem feladatunk. A kérdés tehát, hogy egy körzeten belül a csomagautomaták felé aktuálisan felmerülő kiszállítási igényeket hogyan csoportosítsuk, feltételezve, hogy az egy klaszterbe sorolt igénypontok kiszolgálásához szükséges drónok elindíthatóak egy rajként.

A cél, hogy a drónok minél kevesebb idő alatt végezzék el a tranzakciókat, hiszen a szűkös akkumulátor kapacitást kell elsősorban szem előtt tartanunk. Kijelenthetjük, hogy az eszközök energiafelhasználásának minimalizálására törekedve szükséges optimalizálnunk a drónok repülési feladatait a felszállástól kezdve a leszállásig, mivel jelenleg az akkumulátor kapacitása a legkritikusabb korlátozó tényező. Mivel a drón energiafelhasználását adott szállítási távolság esetén leginkább az általa szállított csomagok összes tömege fogja befolyásolni, így a modellezési feladat megoldása során azt az alapelvet követjük, hogy nagyobb tömeg szállítása egy adott távolságban lévő csomagautomatához több energiát fogyaszt, mint egy kisebb távolságban lévő automatához való szállítás. Emiatt súlyozó tényezőként egy adott tranzakció esetében a szállított tömeget alkalmazzuk.

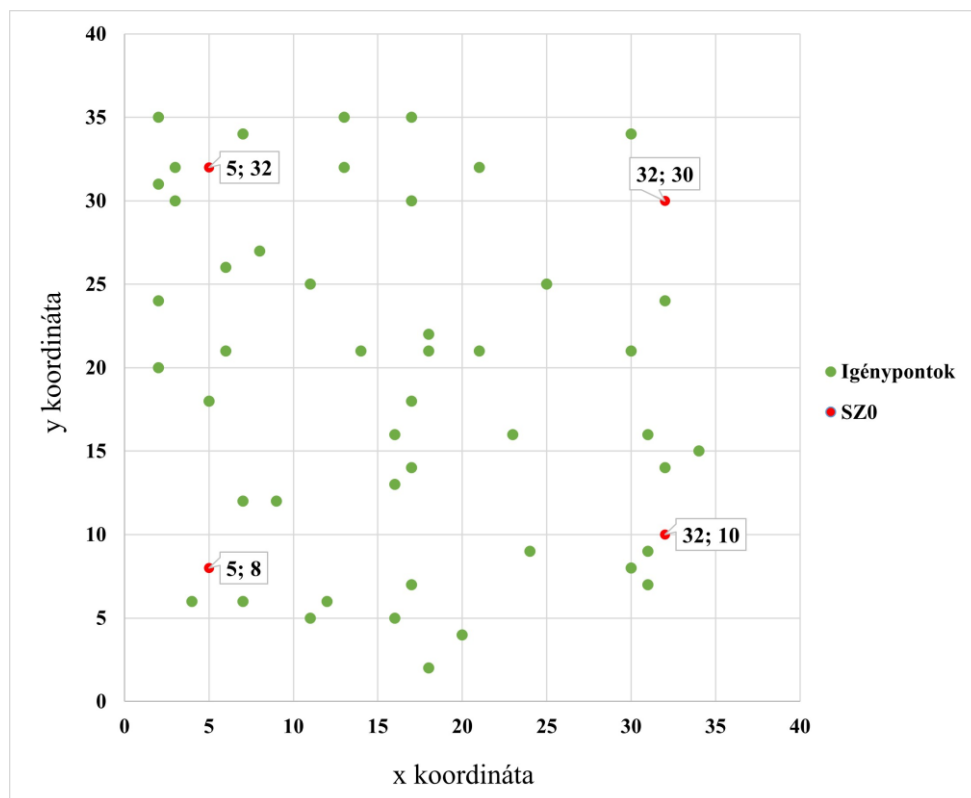


20. ábra: Igénypontok elhelyezkedése

A példánkban véletlenszerűen helyezünk el 70 igénypontot, azaz csomagautomatát, amiknek ismerjük a koordinátáit. Ezek a pontok egy olyan körzetben találhatóak, amiket mindig ugyanabból, a már korábban hozzárendelt depóból szolgálunk ki (20. ábra). Vagyis feltételezzük, hogy az összes csomagautomata előzetesen úgy került besorolásra az adott depóhoz a depóstruktúra optimalizálása során, hogy az oda repülő drón akkumulátorának kapacitása elegendő legyen az oda- és visszaútra is.

Az igénypontok klaszterezését egy távolságalapú algoritmussal, a K-közép módszerrel végeztük el. Az algoritmus minden igénypontot ahhoz a klaszterhez sorol, amelyiknek a középpontja a legközelebb esik az adott ponthoz. A modellben példaképpen most négy részkörzetre szeretnénk osztani a körzetet, azaz négy drónra fogja kiszolgálni a csomagautomatákat, ezért négy középpontot (és az ezekhez tartozó részkörzeteket) kell meghatározni, ami ebben az esetben szétválási pontként fog funkcionálni.

Kezdeként a négy részkörzet középpontot (SZ0) véletlenszerűen helyeztük el az aktuálisan kiszolgálandó igénypontok között. Fontos tehát, hogy nem feltétlenül jelentkezik kiszállítási igény mindig minden csomagautomatánál, ezért a részkörzetek meghatározásához használt modell bemutatása során sem az összes igénypontra keresünk optimális klaszterezést. Jelenleg, a példában bemutatott esetben a 70 csomagautomatát reprezentáló pontból csak 50 igénypont szerepel a csoportosításban (21. ábra).



21. ábra: Az aktuálisan kiszolgálandó igénypontok és a kezdeti szétválási pontok

Az algoritmusban minden iterációs lépést egy távolságszámítással kezdünk, melynek során kiszámoljuk az összes igénypontnak az összes részkörzet kezdeti középponttól való légvonalbeli távolságát Pitagorasz tételének segítségével (6. táblázat).

6. táblázat: Az igénypontok részkörzetektől való távolsága (részlet)

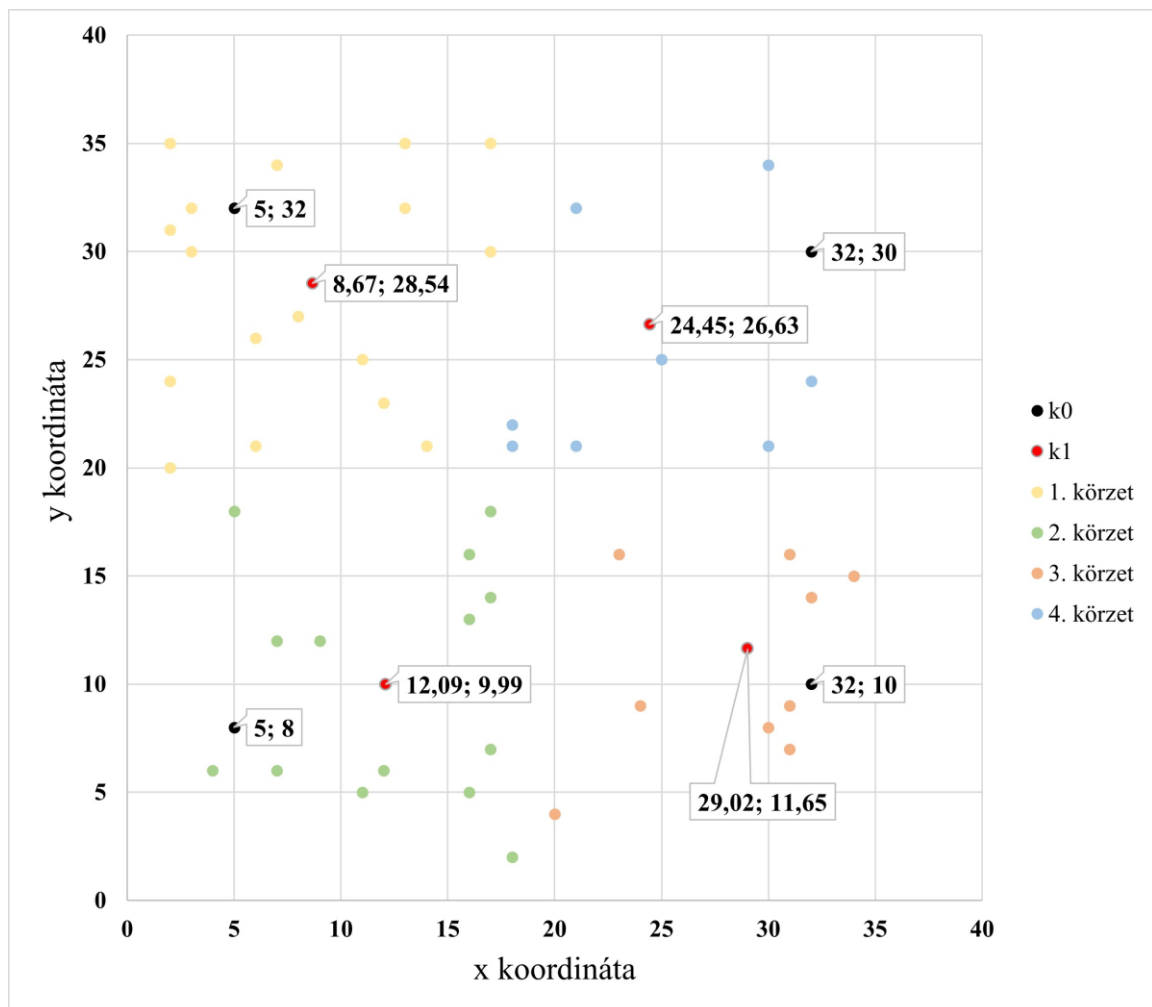
| | | Körzettől mért távolság (egység) | | | | Összes szállított tömeg (gramm) |
|-------------|----|-------------------------------------|-------|-------|-------|------------------------------------|
| | | 1. | 2. | 3. | 4. | |
| Igénypontok | 1 | 4,24 | 27,17 | 39,05 | 30,41 | 456 |
| | 2 | 30,53 | 27,20 | 6,08 | 14,04 | 1192 |
| | 3 | 20,40 | 5,66 | 23,09 | 29,21 | 1318 |
| | 4 | 34,71 | 26,02 | 1,41 | 21,02 | 361 |
| | 5 | 18,44 | 15,62 | 17,00 | 19,21 | 926 |
| | 6 | 31,76 | 15,52 | 13,42 | 28,64 | 746 |
| | 7 | 36,40 | 29,07 | 2,00 | 20,10 | 779 |
| | 8 | 5,83 | 19,24 | 29,41 | 24,19 | 1216 |
| | 9 | 21,63 | 13,42 | 15,52 | 21,93 | 1196 |
| | 10 | 16,40 | 19,10 | 18,44 | 16,12 | 444 |

Minden igényponthoz kiválasztjuk azt a részkörzetet, aminek a középpontjához a legközelebb van, így kialakul a négy klaszter. Az eljárás következő lépéseként új középpontokat számolunk a kialakult részkörzeteket reprezentáló klasztereken belül. Ezek lesznek esetünkben a tervezhető szétválási pontok. Mint említettük, nagyobb össztömegű csomag szállítása nagyobb energiafelhasználást jelenthet, ezért az középpontok „x” és „y” koordinátáinak számolásához az adott körzethez tartozó igénypontok koordinátáit a szállított összes tömeggel súlyozva vesszük figyelembe, és így számolunk új súlypontot:

$$x_{új} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i * m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad \text{és} \quad y_{új} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i * m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

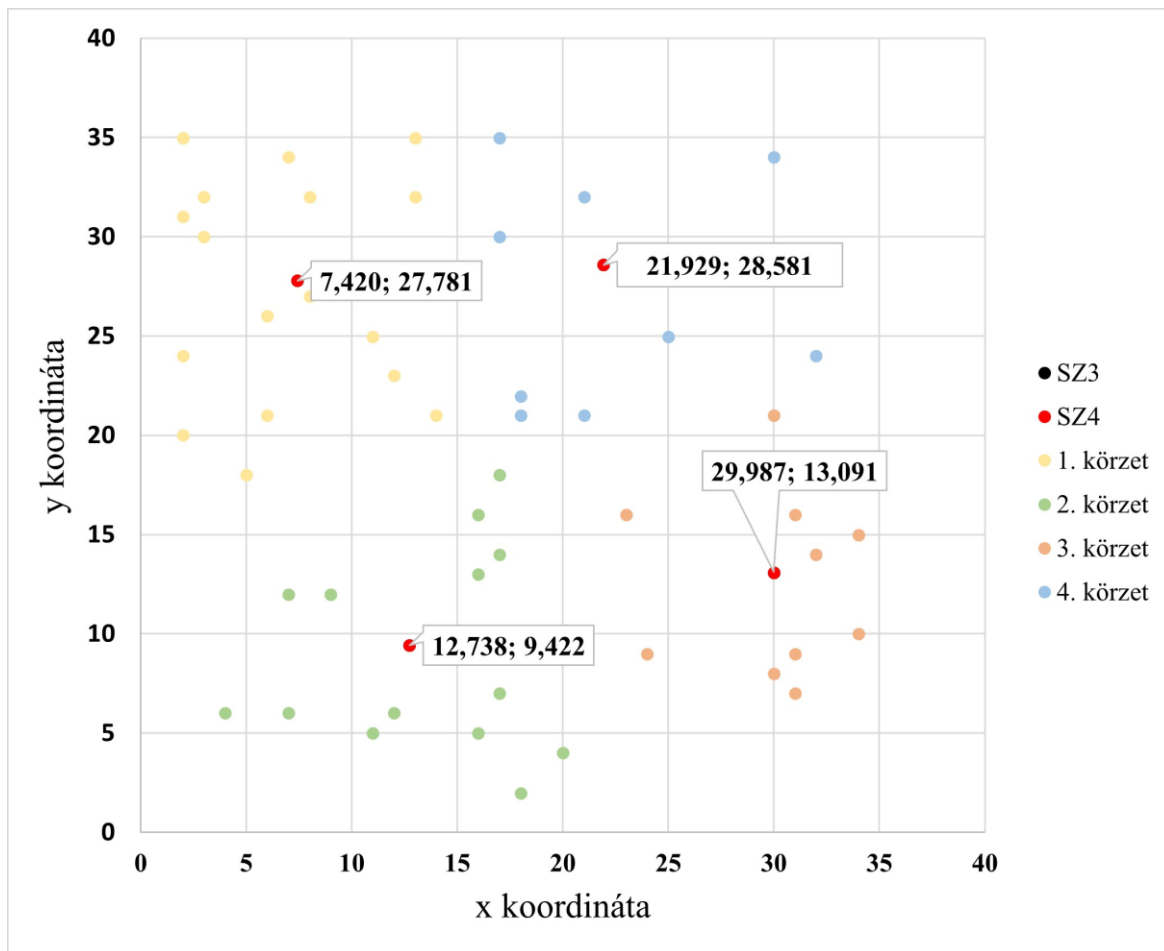
ahol „ $x_{új}$ ” és „ $y_{új}$ ” a részkörzetek súlyozott súlypontjának koordinátái, „n” az adott részkörzetbe tartozó igénypontok száma, „ m_i ” az i-edik igényponthoz szállítandó csomagok összesített tömege, „ x_i ” az i-edik igénypont „x” koordinátája, „ y_i ” az i-edik igénypont „y” koordinátája.

Az 1. iterációban kapott új szétválási pontok koordinátáit és a kialakult részkörzeteket a 22. ábra szemlélteti. Észrevehetjük, hogy az új szétválási pontok ránézésre is jobb pozícióban helyezkednek el, mint az eredetileg megválasztott kiinduló pontok.



22. ábra: Az 1. iteráció eredménye

Az iterációkat addig folytatjuk, amíg az igénypontok klaszterekbe való besorolása nem, a kiszámolt szétválási pontok koordinátái pedig csak kis mértékben változnak. Ebben a példában 4 iterációs lépésre volt szükség, a végleges részkörzeteket és szétválási pontokat a 23. ábra szemlélteti. Fontos megjegyezni, hogy az algoritmus más kezdő középpontok megadásával másik optimális eredményt is adhat. Emiatt a fenti megoldás csupán egy lehetséges csoportosítás, létezhetnek alternatív (egyenértékű) optimális klaszterezési megoldások is. Megjegyezzük továbbá, hogy ez az egyszerű algoritmus nem veszi figyelembe a depó és a szétválási pontok közötti távolságot, hiszen az eljárás a távolságok szállítási tömeggel súlyozott minimalizálására van érzékenyítve.



23. ábra: A 4. iterációs lépés eredménye

4.3.3. Várakozási idők csökkentése sorállás esetén

A drónok útja során az első sorállás bekövetkezése a csomagautomatánál, a gép-gép interakció során történhet, amennyiben egy miniraj érkezik oda¹¹. Célunk, hogy a sorban álló drónoknak a lehető legkevesebbet kelljen várakozniuk és ezáltal a lehető legkevesebb energiát használják fel a lebegésre, azaz a veszteséget szeretnénk minimalizálni.

Ezt a szituációt **egy egygépes termelésütemezési problémához** hasonlíthatjuk, ahol egy erőforrásra szeretnénk adott sorrendben ütemezni több feladatot. Ebben az esetben a várakozási időket szeretnénk minimalizálni a szállított tömeg figyelembevételével, ezért az SWPT¹² szabályt fogjuk alkalmazni. A módszertan első lépése egy mutatószám kiszámítása, amely az összes idő és a szállított tömeg hányadosa, melyet monoton növekvő sorrendbe kell állítanunk, ez egyúttal azt is jelenti, hogy ebben a sorrendben kell leszállniuk a drónoknak az automatához.

¹¹ Ez az az eset, amikor adott csomagautomatához több csomagot kell szállítani, de annak megvalósításához egy drón szállítási kapacitása nem elégséges, így több drónt kell hozzá alkalmazni, amiből egy miniraj képződik.

¹² SWPT = Shortest Weighted Processing Time

Az így kialakult sorrend alapján kiszámoljuk, hogy az adott drónnak mennyit kell pontosan várakoznia, azaz lebegő pozícióban töltenie, illetve mennyi időt vesz igénybe összesen a tranzakció végrehajtása. Egy drón lebegő pozícióban töltött ideje az őt megelőző drónok kiszolgálásának összes időszükséglete, melyhez hozzáadva az adott drón feladatának megvalósításához szükséges időt megkapjuk az adott drónhoz tartozó összesített kiszolgálási időszükségletet (lásd 7. táblázat).

Egy adott drónhoz tartozó tranzakció elvégzéséhez szükséges idő nagysága (azaz a kiszolgálási idő) főként attól függ, hogy mekkora a rárepülés időszükséglete, a drónnak hány csomagot kell átadnia a csomagautomatának, illetve mekkora a ledokkolás és eltávolodás időszükséglete az újra várakozó pozícióba álláshoz. A pontos adat hiányában az egyszerűség kedvéért 45 sec/csomag átadási idővel számolunk, plusz drónonként a landoláshoz, a dokkoláshoz és a csomagautomatától való felszálláshoz szükséges idővel. Az utóbbi műveletekhez szükséges időt is csak becsülni tudjuk, így a landolás és a dokkolás 25 sec ideig, az automata elhagyása pedig 10 sec ideig tart. Az alábbi példában egy 6 drónból álló miniraj összesített várakozási idejét szeretnénk minimalizálni.

7. táblázat: A szállítási feladatok paraméterei

| | Szállított csomagok száma | Szállított csomagok tömege (kg) | Csomagátadási idő (sec) | Leszállás (sec) | Felszállás (sec) | Összes idő t (sec) |
|----------|----------------------------------|--|--------------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|
| A | 2 | 4 | 90 | 25 | 10 | 125 |
| B | 1 | 1,5 | 45 | 25 | 10 | 80 |
| C | 4 | 8 | 180 | 25 | 10 | 215 |
| D | 3 | 6 | 135 | 25 | 10 | 170 |
| E | 2 | 3 | 90 | 25 | 10 | 125 |
| F | 3 | 10 | 135 | 25 | 10 | 170 |

A módszertan első lépése egy mutatószám kiszámítása, amely az összes idő és a szállított tömeg hányadosa, melyet monoton növekvő sorrendbe kell állítanunk, ez egyúttal azt is jelenti, hogy ebben a sorrendben kell leszállniuk a drónoknak az automatához (lásd **8. táblázat**).

8. táblázat: A drónok javasolt dokkolási sorrendje a modell alapján

| | Összes idő (sec) Csomagok tömege (kg) |
|----------|--|
| F | 17 |
| C | 26,875 |
| D | 28,33 |
| A | 31,25 |
| E | 41,67 |
| B | 53,33 |

9. táblázat: A kiszolgálás kumulált időszükséglete

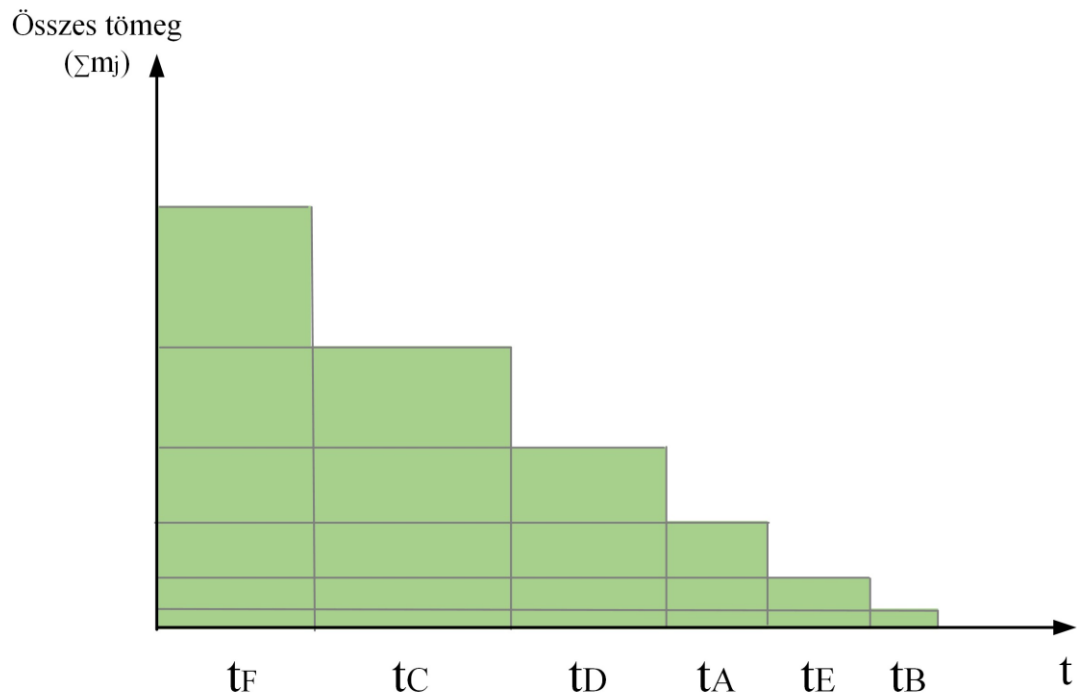
| | Lebegő pozícióban töltött idő (sec) | Csomagkézbesítés összes ideje (sec) |
|----------|--|--|
| F | 0 | 170 |
| C | 170 | 385 |
| D | 385 | 555 |
| A | 555 | 680 |
| E | 680 | 805 |
| B | 805 | 885 |

Az így kialakult sorrend alapján kiszámoljuk, hogy az adott drónnak mennyit kell pontosan várakoznia, azaz lebegő pozícióban töltenie, illetve mennyi időt vesz igénybe összesen a tranzakció végrehajtása. Egy drón lebegő pozícióban töltött idejét, azaz a várakozási időket a tranzakció elvégzéséhez szükséges összes idők kumulálásával kapjuk meg (lásd 10. táblázat).

10. táblázat: A várakozási idők kiszámítása

| | Összes idő (sec) | Lebegő pozícióban töltött idő | Csomag tömege (kg) |
|----------|-------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| F | 170 | 0 | 10 |
| C | 215 | 170 | 8 |
| D | 170 | 385 | 6 |
| A | 125 | 555 | 4 |
| E | 125 | 680 | 3 |
| B | 80 | 805 | 1,5 |

A fenti táblázat alapján létrehozhatunk egy diagramot, amelyen ábrázolhatjuk a miniraj által kezelt összesített szállított tömeget a tranzakciók megvalósításához szükséges idő függvényében (24. ábra).



24. ábra: A tranzakciók megvalósításához szükséges összesített idő

5. Kitekintés és összegzés

5.1 A modell megvalósításához szükséges fejlesztési területek

Az általunk megfogalmazott raj-alapú forgalomszervezési stratégia modellje ígéretesnek tűnik, de számos helyzetben talákoztunk olyan korlátozó tényezőkkel, amelyek a jelenlegi, még nem kiforrott technológiai és jogi körülményekből adódnak. Ismereteink szerint áruszállító drónok rajokba szervezését még nem vizsgálták a kiscsomagok szállításában rejlő lehetőségeket tekintve, emiatt több területen fellelhetőek a megvalósítást egyelőre megnehezítő körülmények, amelyek fejlesztésre szorulnak.

A legkritikusabb korlátozó tényező az alacsony akkumulátor kapacitás, amely a modell több pontján is megjelent, mint optimalizálandó probléma egyik fő komponense. Az operációk szervezését nagyban megnehezíti az alacsony hatótávolság és felmerül a kérdés, hogy néhány kilométeres hatótávolság esetén milyen mértékben lehet hatékonyan és gazdaságilag is előnyösen működtetni a rendszert például egy nagyváros esetén. Egy kiscsomag szállításra alkalmas drón típushoz olyan energiasűrűségű és térfogatú akkumulátort kell tervezni és megvalósítani, hogy a tervezett operációk elvégzését a lehető legkevésbé akadályozza, tehát képesek legyünk szinte teljes mértékben garantálni például egy adott útvonal biztonságos megtételét és egy tranzakció elvégzését. Ezen a területen abszolút látható a fejlődés, bizonyos mértékig reális az akkumulátorok kapacitásának növelése, amellyel már könnyebbé válhat, vagy legalábbis nem olyan nagy mértékben korlátozott az útvonaltervezés. Természetesen a nagyobb hatótávolság elérése kihatással van számos más kihívásra is, ezért továbbra is alapvető figyelembe veendő tényező a különböző problémák megoldása során.

Elképzeléseink kapcsán kitértünk arra is, hogy a jelenlegi csomagautomata megoldások csupán egy drón fogadására és jellemzően egyszerre egy csomag kezelésére alkalmasak, ami szintén egy korlátozó tényezőt jelent. A rendszer hatékonyabb működése érdekében érdemes lenne olyan automatákat tervezni, amelyek egyszerre akár több drónt is (de minimum kettőt) képesek kiszolgálni, hiszen így csökkennének a sorállásból adódó várakozási idők, ezáltal egy drónnak a teljes útjának megtételéhez kevesebb időre és energiára lenne szükség.

Jelenleg komoly fejlesztésre szoruló terület a drónok közti kommunikáció. Ennek abban van fontos szerepe, hogy egy drónraj tagjait hogyan lehet együtt, a kiválasztott hierarchikus (vagy egyéb más) mozgáskoordinációs megoldásnak megfelelő módon egységes drónfelhőként kezelni, valamint, hogy a vezérdrón hogyan kommunikál a drónfelhővel. Ezen a területen az elmúlt néhány évben komoly fejlődés volt tapasztalható, amely kutatásoknak az eredményeit szintén érdemes lenne integrálni az eddigi elképzelésekkel. Különösen fontos lenne a kivételes

helyzetek, kritikus esetek, vis-major szituációk elemzése, ami szintén megnehezítheti az elképzelések gyakorlati alkalmazását. Ez tehát az egyik legfontosabb fejlesztési terület, hiszen a teljes modellünket a drónok tömeges és együttes kezelésére építjük.

A rajon belüli pozíciók, ezáltal a raj alakjának (topológiájának) kedvező megválasztása is számos kihívást rejt magában, ahol számos kérdést kell megválaszolni. Az élővilágból igyekeztünk ötletet meríteni, azonban szükséges megfigyeléseket és kísérleteket végezni a drónok működésével kapcsolatban, hogy kitapasztalhassuk, milyen alakzat megvalósítása lehetséges és például energiahatékonyság szempontjából melyik lehet a legkedvezőbb.

A különböző technológiai fejlesztési irányok mellett nem mehetünk el amellett sem, hogy a jelenlegi jogi környezet nem teszi lehetővé az általunk elképzelt (de még egy ennél jóval egyszerűbb) rendszer megvalósítását sem. Bár nem feladatunk, hogy erre javaslatot tegyünk, de véleményünk szerint a kereskedelmi, és ezen belül is a logisztikai alkalmazások szabályozását alaposan át kellene gondolni, mert ennek hiánya akadályozhatja komoly innovációk megvalósítását ezen a területen. A dróntechnológiai és forgalomszervezési kérdések mellett át kellene gondolni a légtér használat és engedélyezés szabályait is.

5.2. Összegzés

Dolgozatunk végére érve röviden összefoglalva az eddig kifejtett részeket elmondhatjuk, hogy a drónokkal támogatott tömeges áruszállítás megvalósítása még egy meglehetősen újszerű és utópisztikusnak tűnő gondolat, amit még kevéssé vizsgáltak. Emiatt számos kérdés merül fel, melyek megválaszolása kísérleteket, teszt rendszerek létrehozását, további kutatásokat és különböző szakterületek bevonását igénylik. Az általunk létrehozott forgalomszervezési keretrendszer számos új gondolatot tartalmaz és kihívást fogalmaz meg, amit további lendületet adhat az ezekből kiinduló kutatásoknak.

Humán részről bizalomra van szükség, hogy nyitottak legyünk az újdonságra, a technológiai oldalról pedig jelentős mértékű fejlesztések kellenek, hogy minél eredményesebben és költséghatékonyabban vihessük véghez a drónok által támogatott operációkat. Várakozásaink szerint egyszer valószínűleg eljöhét az idő, amikor a témánkhoz kapcsolódó kutatások magas szintre érnek, és a kiscsomag küldéssel foglalkozó vállalatok is meglátják a lehetőséget a drónok üzemszerű alkalmazásában. Addig is a K+F szférában tevékenykedő fejlesztők feladata, hogy a megfelelő kérdések és kihívások megfogalmazásával, minél több innovatív ötlettel és megoldással támogassák a vállalatokat a sikeres alkalmazások felé vezető úton.

Ábrajegyzék

| | |
|---|----|
| 1. ábra: A nyílt kategória feltételei vizuálisan szemléltetve [2] | 7 |
| 2. ábra: Az egyes alkategóriák a nyílt kategórián belül [4] | 10 |
| 3. ábra: A DHL és az EHang csomagautomatája [7] | 12 |
| 4. ábra: UAV szerkezetére szerelhető kiegészítő eszközök [9] | 13 |
| 5. ábra: Egy UTM rendszer funkcionális felépítése [12] | 18 |
| 6. ábra: A madarak közötti érzékelés a rajrepülés közben [17] | 21 |
| 7. ábra: Hierarchikus mozgásvezérlés | 24 |
| 8. ábra: „V” alakú drónraj topológia | 25 |
| 9. ábra: A rajszerű forgalomszervezési modell működési logikája | 27 |
| 10. ábra: Hátizsákos probléma a csomagok drónokhoz rendelésére | 30 |
| 11. ábra: DJI Matrice 300 RTK repülési ideje a szállított tömeg függvényében [23] | 32 |
| 12. ábra: Két raj irányának különbözősége irányszöggel meghatározva | 34 |
| 13. ábra: A drónraj tagjainak egyenkénti felszállása | 35 |
| 14. ábra: A raj útja a szétválási pontig és a raj feloszlása | 36 |
| 15. ábra: „V” alakban lehetséges elfoglalt pozíciók | 38 |
| 16. ábra: Példa egy lehetséges korábbi leválásra | 39 |
| 17. ábra: Várakozási alakzatok a drónok számától függően | 42 |
| 18. ábra: A visszatérési stratégia útvonalai | 46 |
| 19. ábra: Depók elhelyezése centrumkereséssel és az így kialakult körzetek | 50 |
| 20. ábra: Igénypontok elhelyezkedése | 51 |
| 21. ábra: Az aktuálisan kiszorgálandó igénypontok és a kezdeti szétválási pontok | 52 |
| 22. ábra: Az 1. iteráció eredménye | 54 |
| 23. ábra: A 4. iterációs lépés eredménye | 55 |
| 24. ábra: A tranzakciók megvalósításához szükséges összesített idő | 58 |

Táblázatjegyzék

| | |
|--|----|
| 1. táblázat: A drónokkal végzett műveleti kategóriák | 8 |
| 2. táblázat: A drónok megjelenési forma szerinti csoportosítása | 14 |
| 3. táblázat: A drónok környezeti érzékeléshez szükséges szenzorjai | 16 |
| 4. táblázat: Vezérlési típusok jellemzői [10] | 22 |
| 5. táblázat: Különböző dróntípusok paramétereinek összehasonlítása [20] [21] [22] | 31 |
| 6. táblázat: Az igénypontok részkörzetektől való távolsága (részlet) | 53 |
| 7. táblázat: A szállítási feladatok paraméterei | 56 |
| 8. táblázat: A drónok javasolt dokkolási sorrendje a modell alapján | 57 |
| 9. táblázat: A kiszolgálás kumulált időszükséglete | 57 |
| 10. táblázat: A várakozási idők kiszámítása | 57 |

Hivatkozások

- [1] 4/1998. (I. 16.) Korm. rendelet a magyar légtér igénybevételéről
<https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=99800004.kor>
- [2] Direction de l'Aviation Civile Luxemburg
<https://dac.gouvernement.lu/en/drones/drones-let-me-fly/categorie-open.html?fbclid=IwAR27nUYHIRRavGl2VXm4p-QmNufQJPUg5OsKjzFKupwr8z3fUlhaHP12k3Y>
- [3] mydronespace <https://mydronespace.hu/applikacio>
- [4] Dr. Bóna Krisztián (2021). Drónok a logisztikában, kihívások és lehetőségek. 29. MLBKT Kongresszus
- [5] Közlekedési Alkalmassági és Vizsgaközpont. <https://vizsgakozpont.hu/dron-vizsgaztatas>
- [6] Dr. Bóna Krisztián és Sárdi Dávid Lajos (2021). Áruszállító drónok alkalmazása a városi koncentrált igénypont-halmazok city logisztikai rendszerében, Közlekedéstudományi Szemle, LXXI. évf. 4. sz., pp. 19-38, DOI: <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2021.4.2>
- [7] J. Daleo (2022). Flytrex grows drone delivery service 150% with new FAA approval, <https://www.freightwaves.com/news/flytrex-grows-drone-delivery-service-150-with-new-faa-approval>
- [8] J. Porter (2019). Wing will start making drone deliveries in Finland next month, <https://www.theverge.com/2019/5/17/18629239/alphabet-wing-drone-deliveries-finland-helsinki-vuosaari-google-air-early-access>
- [9] C. Stonor (2022). Australia: Swoop Aero drones to deliver “rapid medical testing for Queenslanders”, <https://evtolinsights.com/2022/10/australia-drones-to-deliver-rapid-medical-testing-for-queenslanders/>
- [10] Skyway and Zing Operate First Drone Delivery in Orlando, Florida. (2022), <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/05/03/2435026/0/en/Skyway-and-Zing-Operate-First-Drone-Delivery-in-Orlando-Florida.html>

- [11] BBC: Zipline blood delivery drone applies for US trial (2018), <https://www.bbc.com/news/technology-43629965>
- [12] L. Kolodny (2017). Matternet cleared to fly blood samples in delivery drones over Swiss cities, <https://techcrunch.com/2017/03/31/matternet-cleared-to-fly-blood-samples-in-delivery-drones-over-swiss-cities/>
- [13] Manna Aero, <https://www.manna.aero/>
- [14] 12 ezer drónnal érkezik a Wingcopter Afrikába (2022), <https://dronerz.hu/hir/12-ezer-dronnal-erkezik-a-wingcopter-afrikaba>
- [15] J. Hayes (2023). Amazon Prime Air Drone Delivery Takes To The Skies in California and Texas, <https://www.frooition.com/blog/2023/01/amazon-prime-air-drone-delivery-california-texas/>
- [16] J. Daleo (2023), Zipline Drone Delivery Just Got a Massive Upgrade, <https://www.flyingmag.com/zipline-drone-delivery-just-got-a-massive-upgrade/>
- [17] DHL express launches its first regular fully-automated and intelligent urban drone delivery service (2019), <https://www.dhl.com/global-en/home/press-archiv/2019/dhl-express-launches-its-first-regular-fully-automated-and-intelligent-urban-drone-delivery-service.html>
- [18] Different Types of Drones and Uses (2023 Full Guide) (2023), <https://www.jouav.com/blog/drone-types.html>
- [19] B. Galle, S. Arellano, V. Conde, N. Bobrowski, T. Fischer, G. Gerdes, A. Gutmann, T. Hoffmann, I. Itikarai, T. Krejci, E. Nicholson, K. Mulina, S. Nowicki, T. Richardson, J. Rüdiger, K. Wood és J. Xu (2021). A multi-purpose, multi-rotor drone system for long-range and high-altitude volcanic gas plume measurements <https://amt.copernicus.org/articles/14/4255/2021/>
- [20] A. Dr. Németh és P. Pápics (2019). Mini UAV-rajok alkalmazásának lehetőségei, különös tekintettel a katonai célú igénybevételre II. rész,” Haditechnika, LIII. évf. 6. sz., pp. 2-6. DOI: <https://doi.org/10.23713/HT.53.6.01>
- [21] Dobi Sándor Gábor, Fekete Róbert Tamás és Rohács Dániel (2018). Az európai UTM helyzete és jövője, Repüléstudományi Közlemények, XXX. évf. 2. sz., pp. 189-204. https://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_2/2018-2-17-0467_Dobi_Sandor_Gabor_et_al.pdf

- [22] Dr. Sándor Zsolt és Boros Péter (2018). Pilóta nélküli légi járművek okozta kihívások a légiforgalmi irányításban 2. rész: UTM – pilóta nélküli légi járművek forgalmi menedzsmentjét biztosító rendszerek, Közlekedéstudományi Szemle, LXVIII. évf. 1. sz., pp. 37-46. DOI: <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2018.1.4>
- [23] K. Wilhelm (2017.) Why Animals Swarm for Swarms, MaxPlanckResearch 2/2017 pp. 62-69., https://www.mpg.de/11357042/W004_Environment_climate_062-069.pdf
- [24] E. Yong (2014). Birds That Fly in a V Formation Use An Amazing Trick, <https://www.nationalgeographic.com/science/article/birds-that-fly-in-a-v-formation-use-an-amazing-trick>
- [25] S. Terpstra (2010). The role of the lateral line in schooling, https://fse.studenttheses.ub.rug.nl/9477/1/Biol_BC_2010_Sytzeterpstra.pdf
- [26] Boldizsár Balázs, Gábor Vásárhelyi és Tamás Vicsek (2019) Adaptive leadership overcomes persistence–responsivity trade-off in flocking, DOI: <https://doi.org/10.1098/rsif.2019.0853>
- [27] Örvénylő madárrajok (2022), <https://ng.24.hu/termeszett/2022/10/07/orvenylo-madarrajok/>
- [28] M. McNabb (2023). Fully Automated Drone Delivery: Flytrex Partners with National Restaurant Chains for Ultrafast Food <https://dronelife.com/2023/09/17/fully-automated-drone-delivery-flytrex-partners-with-national-restaurant-chains-for-ultrafast-food/>
- [29] R.W. Saaty (2002). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used, DOI: [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- [30] DJI Mavic 3T, <https://dronshop.hu/dji-mavic-3-thermal-1eves-care>
- [31] DJI Matrice 200 Series, <https://www.dji.com/hu/matrice-200-series>
- [32] Introducing The Brand-New DJI FlyCart 30 Delivery Drone, <https://uasolutions.ch/dji-flycart-30-delivery-drone/>
- [33] DJI Matrice 300 RTK, <https://enterprise.dji.com/matrice-300>
- [34] R. Alyassi, M. Khonji, A. Karapetyan, S. C.-K. Chau, K. Elbassioni és C.-M. Tseng (2022). Autonomous Recharging and Flight Mission Planning for Battery-Operated Autonomous Drones, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9779119>

Melléklet

1. melléklet

| | Rendszer neve | Koncepció, csomag átadása | Drón tömege | Drón kapacitása | Drón mérete | Drón hatótávolsága |
|-----------------------------------|---|---|-------------|-----------------|-----------------------------|--|
| Élelmiszer szállítás | Aha, Reykjavík, Izland | Hagyományos (csomag leengedése) | 10 kg | 3 kg | 1,668 m* 1,518 m* 0,727 m | 10 km |
| | Flytrex, Texas és Észak-Karolina, Amerika | Hagyományos (csomag leengedése) | 9,5 kg | 6 kg | 1,668 m* 1,518 m* 0,727 m | n. a. |
| | Google, Wing, Helsinki, Finnország | Hagyományos (csomag leengedése) | n. a. | n. a. | n. a. | 10 km |
| | Skyway-Zing, Florida, Amerika | Hagyományos (csomag leengedése) | n. a. | 5 kg | n. a. | n. a. |
| | Yonghui, Guangzhou, Kína | Hagyományos (csomag átadása) | n. a. | 5 kg | n. a. | 19 km |
| | Tesco, Oranmore, Írország | Hagyományos (csomag leengedése) | n. a. | 4 kg | n. a. | n. a. |
| | Walmart, Fayetteville, USA | Hagyományos (csomag leengedése) | n. a. | 2,9 kg | n. a. | n. a. |
| | Uber Eats, San Diego, USA | Személygépjárművekkel kombinált | n. a. | n. a. | n. a. | 10 km |
| | Pizza Hut, Bnei Dror, Izrael | Hagyományos | n. a. | n. a. | n. a. | n. a. |
| Gyógyszer szállítás | Zipline, Ruanda, Afrika | Ejtőernyős megoldás | 12 kg | 1,5 kg | n. a. | 150 km |
| | Swoop Aero, Kite, Ausztrália | Hagyományos (csomag leengedése) | n. a. | 3 kg/5 kg | n. a. | 175 km/130 km |
| | DHL Paketkopter, Ukerewe, Tanzánia, Afrika | Hagyományos (csomag átadása) | n. a. | 4 kg | n. a. | 65 km |
| | Matternet, Lugano, Svájc | Hagyományos (csomag leengedése) | n. a. | 2 kg | n. a. | 22 km |
| | UPS-CVS, The Villages, USA | Hagyományos (csomag leengedése) | n. a. | 4 kg | 1,78 km | 65 km |
| | Health Service Executive, Moneygall, Írország | Hagyományos (csomag leengedése) | n. a. | 4 kg | n. a. | n. a. |
| | DHL Paketkopter, Norddeich-Juist, Németország | Hagyományos (csomag átadása) | n. a. | 1,2 kg | 1,03 m | 12 km |
| | DHL Paketkopter, Bonn, Németország | Hagyományos (csomag átadása) | n. a. | 1,2 kg | 1,03 m | 1 km |
| | Walmart, Cheektowaga, USA | Hagyományos (csomag leengedése) | n. a. | n. a. | n. a. | 1,61 km |
| | Walmart, North Las Vegas, USA | Hagyományos (csomag leengedése) | n. a. | n. a. | n. a. | 1,61 km |
| Élelmiszer és gyógyszer szállítás | Google, Project Wing, Canberra, | Hagyományos (csomag leengedése) | n. a. | 1,5 kg | n. a. | 14 km |
| | Manna Aero, Dublin, Írország | Hagyományos (csomag leengedése) | n. a. | 2 kg | n. a. | n.a. |
| | Wingcopter, Afrika | Hagyományos | n. a. | 6 kg | 1,98 m | 110 km |
| | EASE Drones, Grand Forks, USA | Hagyományos | 10 kg | 2,9 kg | 1,668 m* 1,518 m* 0,727 m | 10 km |
| | Google, Project Wing, Christiansburg, | Hagyományos (csomag leengedése) | n. a. | 1,3 kg | n. a. | 19,3 km |
| Kicsomag szállítása | Amazon Prime Air, Kalifornia és Texas, Amerika | Hagyományos (csomag leengedése) | 36 kg | 2,27 kg | 1,9812 m* 1,651 m* 1,1684 m | n.a. |
| | Zipline, P2 Zip, San Francisco, Kalifornia, Amerika | Hagyományos (csomag leengedése droid használatával) | n. a. | 3,63 kg | n. a. | 38,6 km hasznos teher nélkül 16,1 km teherrel |
| | UPS szállítódrón koncepció | Hagyományos (csomag leengedése) | 12 kg | 6 kg | 1,32 m* 1,78m* 0,52 m | 45 km |
| | DHL, Guangzhou, Kína | Csomagautomatával kombinált | n. a. | 5 kg | n. a. | 8 km |
| | Amazon Prime Air, Cambridge, Anglia | Hagyományos (csomag leengedése) | n. a. | 2,25 kg | n. a. | 16 km |
| | Daimler Vans & Drones, Zürich, Svájc | Kistehergépjárművekkel kombinált | 9,5 kg | 2 kg | n. a. | 20 km |
| | DHL Paketkopter, Reit im Winkel-Winklmoosalm, Németország | Csomagautomatával kombinált | n. a. | 2 kg | 2,2 m | 8,3 km |