

Terpezcz Gábor

eVTOL¹ légi járművek biztonsága

Az eVTOL járművek fejlesztése és elterjedése az utóbbi években nagy figyelmet kapott a légi közlekedési iparban. Az eVTOL biztonsága nagy kihívást jelent az ipar számára, mivel az ilyen típusú járművek repülési rendszerei és az ehhez szükséges infrastruktúra még fejlesztésre szorulnak. Az eVTOL járműveknek több biztonsági szempontot kell figyelembe venniük, mint a hagyományos repülőgépeknek, mivel az alacsonyabb magasságban való repülés, a rövidebb fel- és leszállási úthossz, valamint a sokkal nagyobb forgalom potenciális veszélyeket jelentenek.

Kulcsszavak: eVTOL, nagyvárosi légi mobilitás, biztonság, fejlett légi mobilitás, biztonsági integritási szint, hibaaarány, biztonságkritikus rendszer, megbízhatóság

1. Mi is az az eVTOL légi jármű?

Az eVTOL jelölés a függőleges fel- és leszállás képességét jelenti a repülőgépek egy speciális változatánál. Akár a hagyományos helikopterek, képesek helyből fel- és leszállni, így alkalmasak városi környezetben történő műveletek végrehajtására.

Az eVTOL (elektromos függőleges felszállású és leszállású) drónok új generációja a repülőgépeknek, és a biztonságuk kulcsfontosságú. Az eVTOL drónok fejlesztése és üzemeltetése során számos biztonsági protokollt kell alkalmazni, például az ütközésgátló rendszereket és a légiforgalmi irányítást.

Az eVTOL drónok megbízhatósága kritikus fontosságú, mivel az utasokat szállítják, és rendszeresen ellenőrizni kell őket. Az eVTOL drónok adatvédelmi kérdéseinek meg kell felelniük az adatvédelmi törvények követelményeinek, és a személyes adatok kezelése, valamint tárolása biztonságos kell legyen.

Az eVTOL drónokra vonatkozó biztonsági, adatvédelmi szabályozás további fejlesztése és szigorítása szükséges ahhoz, hogy a repülés biztonságos legyen mindenki számára.

A fenntarthatóságnak, az innovációnak, a környezetvédelemnek, valamint a gyorsan változó szállítási igényeknek megfelelően, a robbanásszerűen fejlődő új technológiák eredményeképpen megjelentek az elektromos meghajtású, függőleges fel- és leszállásra képes légi járművek, amelyek a világ minden részén forradalmasíthatják a légi közlekedést és a légi áruszállítást.

¹ Electric Vertical Take-Off Landing – elektromos helyből fel- és leszálló.

1.1. Az eVTOL légi járművek jellemzői

Az eVTOL légi járművek villamos energiát használnak a függőleges fel- és leszálláshoz, valamint a lebegéshez, ezért több tanulmány szerint is fontos elemei lehetnek a városok és azok agglomerációjában felmerülő modern közlekedési igények kiszolgálásának.

Az eVTOL légi járművek a fenntartható szállítás jegyében kínálnak megoldásokat utasok és különböző terhek városokban vagy azok külterületein való mozgatására. A jelenleg elérhető megoldások akár 100–200 km távolságra is biztosítják a szállítást, csökkentve ezzel a közlekedési torlódásokat, valamint a szén-dioxid-kibocsátást.

Az akkumulátortechnológia és az üzemanyagcellák dinamikus fejlődése, valamint a fenntartható közlekedés iránti növekvő kereslet fokozza az érdeklődést az eVTOL légi járművek iránt. Mivel eVTOL légi járműveknél alkalmazott különböző technológiák már több mint egy évtizede léteznek, a villamos energiával működtetett meghajtások fejlesztései és az ezekhez szükséges pénzügyi befektetések jelentősen megnövekedtek.

Jelenleg már több kereskedelmi forgalomban lévő eVTOL termék létezik. A repüléssel foglalkozó cégek már több olyan légijármű-típussal is rendelkeznek, amelyek fejlesztése a tesztszakaszba lépett, illetve a tesztelés végén jár. Ezek első példányai várhatóan 2023-ban már megjelennek a légi közlekedésben, ezért rendkívül fontos a biztonságos működésük mielőbbi szabályozása.

2. eVTOL szabályozási környezetek

A közlekedési ágazat fejlett légi mobilitásának (AAM²) kiemelt részét képezi az eVTOL légi járművekben rejlő lehetőségek kihasználása. Ezek a lehetőségek nagyban elősegítik a regionális és városi közlekedési hálózatokban történő személy- és teherszállítás korszerűsítésére, racionalizálására tett erőfeszítéseket.

A fejlett légi mobilitáson belül az eVTOL légi járművek várhatóan fontos szerepet fognak betölteni a városi légi mobilitásban (UAM³), amely nem más, mint a városokon belüli és városok közötti alacsony tengerszint feletti magasságban történő légi közlekedés jelenleg kialakulóban lévő szabályozási kerete.

Tekintettel az eVTOL légi járművek iránti világszerte növekvő érdeklődésre, a légi közlekedéssel foglalkozó szervezeteknek (például FAA⁴, EASA⁵) olyan szabályozási kereteket kell létrehozniuk, amelyek az egyes tagállamokon belüli használatukat szabályozzák. Ilyenek lehetnek például az EU 2019/945 40. cikkely 1. bekezdés [1], vagy az EU 2019/947 3. cikkely [2, p. 6] rendeletekben meghatározott, az eVTOL légi járművekre adaptálható típustanúsítások és műveletek. Ezt a folyamatot az EASA a drónok tervezésének ellenőrzésére vonatkozó, 2021. április 8-án közzétett iránymutatásai vázolták fel. Az EU-ban a német Volocopter VC200-2 kapta meg elsőként (1. ábra) az úgynevezett DVR⁶ tanúsítást.

² Advanced Air Mobility.

³ Urban Air Mobility.

⁴ Federal Aviation Administration – Szövetségi Repülési Hivatal (USA).

⁵ European Union Aviation Safety Agency – EU Repülésbiztonsági Ügynökség.

⁶ Design Verification Report.



1. ábra
Volocopter VC200 [3]

A DVR az EASA által létrehozott tervhitelesítési jelentés, amelynek kiadását a dróngyártók vagy üzemeltetők kérhetik az EASA-tól egy meghatározott feladatra használt drónra.

Ez azt is jelenti, hogy bármelyik európai üzemben tartó kérhet az illetékes nemzeti légügyi hatóságtól az adott kategóriába tartozó műveleti engedélyt egy meghatározott tevékenység elvégzésére DVR-rel rendelkező drónnal anélkül, hogy az EASA-tól további hitelesítést kellene beszereznie. További információk a 2021. április 21-én kiadott iránymutatásban találhatóak.⁷

3. eVTOL légi járművek biztonsági tervezése

Az eVTOL légi járművek biztonságkritikus rendszerek, ezért a tervezésük olyan folyamat, amelynek célja az olyan rendszerek tervezése és implementálása, amelyek biztosítják a magas szintű biztonságot és megbízhatóságot, különösen olyan környezetekben, ahol a hibák vagy a rendszerhibák súlyos következményekkel járhatnak.

A biztonságkritikus rendszerek tervezése során az elsődleges cél a biztonság, a megbízhatóság és a stabilitás biztosítása a rendszer egész életciklusa alatt. Az ilyen rendszerek tervezése és bevezetése magas szintű szakértelmet és átfogó ismereteket igényel az adott területen, és magában foglalja a megfelelő tervezési és tesztelési módszerek alkalmazását, hogy biztosítsa a rendszer teljesítményét és megbízhatóságát.

3.1. A PFD⁸-érték

A PFD egy olyan mérőszám, amelyet a funkcionális biztonság területén használnak annak értékelésére, hogy egy biztonsági rendszer mennyire megbízható és hatékony a hibákat elkerülő vagy azok következményeit csökkentő működése során.

⁷ Guidelines on Design verification of UAS operated in the 'specific' category and classified in SAIL III and IV.

⁸ Probability of Failure on Demand.

A PFD értéke azt mutatja meg, hogy a biztonsági rendszer mennyire valószínű, hogy egy adott időszakban kudarcot vall, amikor kérésre el kell indítania egy biztonsági funkciót. Általában a PFD értéke nagyon kicsi tört szám (például 10^{-5} , ami azt jelenti, hogy a rendszernek nagyon alacsony az esélye a hiba bekövetkezésére).

A PFD értékelése során figyelembe veszik a rendszer minden lehetséges hibáját és a rendszer tervezésének minden lépését. A PFD értéke befolyásolható a rendszer architektúrájával, a redundancia szintjével, a hardver és szoftver megbízhatóságával, valamint az érzékelők és az aktuátorok⁹ megbízhatóságával is.

3.1.1. Példa PFD számítására

Vegyük példának egy közelségérzékelő rendszert, amely eVTOL-okon működik, és távolság-érzékelő szenzorokkal van felszerelve. A rendszer célja, hogy észlelje a beállított értékekhez közeledő légi és földi objektumokat, és küldjön riasztást a repülésvezérlő számítógépnek.

A rendszer érzékenysége és a környezeti tényezők, például a terület forgalma, valamint a környező interferenciák, zajok befolyásolhatják a PFD értékét. Tegyük fel, hogy a rendszer érzékenysége magas, és a környezeti tényezők nem befolyásolják jelentősen a rendszer teljesítményét.

Ebben az esetben a PFD számítása a következő lenne:

Tételezzük fel, hogy a rendszer által észlelt, közeledő objektumok száma 1000, és ebből 5 hamis riasztás volt.

A PFD értéke kiszámítható a következő képlettel:

$PFD = \text{hamis riasztások száma} / \text{összes észlelt mozgások száma}$

$PFD = 5 / 1000 = 0,005$ vagy $0,5\%$

Ez azt jelenti, hogy a rendszer 1000 észlelt mozgásából csak 5 volt hamis riasztás, ami nagyon alacsony PFD-értéknek felel meg. Ez azt jelenti, hogy a rendszer megbízható és hatékonyan elözi meg a hamis riasztásokat.

3.1.2. A PFDavg¹⁰ mutató

A PFDavg egy biztonsági mutató, amely az adott rendszer vagy folyamat meghibásodásának valószínűségét méri. A PFDavg érték azt mutatja meg, hogy milyen gyakran várható az adott biztonsági rendszer hibás működése, ha azt rendszeresen ellenőrzik és karbantartják.

A PFDavg-t gyakran használják az ipari biztonságtervezés során, különösen a megbízhatósági tervezésben, amelynek célja, hogy minimalizálja az eszközök, rendszerek vagy folyamatok meghibásodásának kockázatát.

A biztonságkritikus rendszerek tervezésekor és karbantartásakor fontos a PFDavg érték meghatározása, hogy a tervezők biztosítani tudják a lehető legnagyobb megbízhatóságot.

⁹ Aktuátor: olyan eszköz vagy berendezés, amely képes mozgatni, irányítani vagy módosítani egy másik rendszert vagy gépet.

¹⁰ Probability of Failure on Demand average.

Az ilyen rendszerek közé tartoznak például a légi közlekedésben is elterjedt tűzjelző, tűzoltó, gázérzékelő, közelségérzékelő stb. rendszerek.

A PFDavg értéke hasznos információ a döntéshozók számára is a tervezési vagy karbantartási folyamat során, mivel segít abban, hogy meghatározzák a rendszer megbízhatóságát és azonosítsák a tervezési vagy karbantartási intézkedésekkel kapcsolatos legfontosabb területeket. Ez segíthet csökkenteni a meghibásodás kockázatát és javítani a biztonságot, valamint az üzleti teljesítményt.

3.1.3. A PFDavg számítása

A PFDavg számítása általában a következő képlettel történik:

$$\text{PFDavg} = \lambda_{DU} \times \text{Test Coverage} \times \text{Diagnostic Coverage}$$

Ahol:

- λ_{DU} : az eszköz vagy rendszer meghibásodási rátája¹¹ (h⁻¹)
- Test Coverage: a tesztelési eljárások hatékonysága (0 és 1 közötti érték). Ez az érték azt mutatja meg, hogy a tesztelés során milyen valószínűséggel találunk meg egy hibát. Ez az érték az adott drón típusától, az alkalmazott tesztelési eljárásoktól és azok hatékonyságától függ.

Számítása:

- Test Coverage = (tesztelt hibák száma)/(összes lehetséges hiba száma)
Ez azt jelenti, hogy a Test Coverage faktor számításához szükséges meghatározni az összes lehetséges hiba számát, majd ebből kiválasztani azokat a hibákat, amelyekre tesztet végeztek. A tesztelt hibák számának elosztása az összes lehetséges hiba számával adja meg a Test Coverage faktor értékét. A Test Coverage faktor értéke általában 0 és 1 között van, és minél magasabb a faktor értéke, annál nagyobb a tesztelési és diagnosztikai lefedettség, valamint annál jobb a rendszer megbízhatósága.
- Diagnostic Coverage: a diagnosztikai eljárások hatékonysága. Ez az érték azt mutatja meg, hogy a diagnosztikai eljárásokkal milyen valószínűséggel lehet azonosítani egy hibát. Ez az érték az adott drón típusától, az alkalmazott diagnosztikai eljárásoktól és azok hatékonyságától függ.

A Diagnostic Coverage értéke 0 és 1 között mozog. A nagyobb érték azt jelenti, hogy a biztonsági rendszer képes hatékonyabban észlelni a hibákat, így a PFDavg értéke is alacsonyabb lesz (1. táblázat). A Diagnostic Coverage értékének meghatározása általában a rendszer tervezése és fejlesztése során történik, és figyelembe veszi az összes lehetséges hibafeltárási technológiát és a rendszer komponenseinek megbízhatóságát.

¹¹ Failure Rate – meghibásodási arány.

Például, ha az adott rendszer meghibásodási ráta 0,01 h⁻¹, a tesztelési eljárások hatékonysága¹² = 0,9 és a diagnosztikai eljárások hatékonysága¹³ = 0,8, akkor a PFDavg értéke a következő lenne:

$$PFD_{avg} = 0,01 \times 0,9 \times 0,8 = 0,0072 \text{ h}^{-1}$$

Ez azt jelenti, hogy az adott biztonsági rendszer átlagosan 0,0072-szer fog hibásan működni óránként, ha azt rendszeresen ellenőrzik és karbantartják.

1. táblázat
Egy esemény hatására bekövetkező átlagos meghibásodás valószínűsége [a szerző]

| Egy esemény hatására bekövetkező átlagos meghibásodás valószínűsége | | |
|---|--|---|
| PFDavg | $\frac{\text{Elviselhető baleseti gyakoriság}}{\text{Védelem nélküli balesetek gyakorisága}} = \frac{1}{RRF}$ | |
| | Egyszerűsített egyenletek | |
| | Közös okok nélkül | Gyakori okokkal (Béta faktor) |
| 1001 | $\lambda_{DU} \times \frac{TI}{2}$ | |
| 1002 1002D | $\lambda_{DU_1} \times \lambda_{DU_2} \times \frac{TI^2}{3}$ | $\frac{[(1 - \beta)] \times (\lambda_{DU} \times TI)^2}{3}$ |
| 1003 | $\lambda_{DU_1} \times \lambda_{DU_2} \times \lambda_{DU_3} \times \frac{TI^3}{4}$ | $\frac{[(1 - \beta)] \times (\lambda_{DU} \times TI)^3}{4}$ |
| 2002 | $(\lambda_{DU_1} + \lambda_{DU_2}) \times \frac{TI}{2}$ | $[(1 - \beta) \times (\lambda_{DU} \times TI)] + \frac{(\beta \times \lambda_{DU} \times TI)}{2}$ |
| 2003 | $[(\lambda_{DU_1} \times \lambda_{DU_2}) + (\lambda_{DU_1} \times \lambda_{DU_3}) + (\lambda_{DU_2} \times \lambda_{DU_3})] \times \frac{TI}{2}$ | $[(1 - \beta) \times (\lambda_{DU} \times TI)]^2 + \frac{(\beta \times \lambda_{DU} \times TI)}{2}$ |
| 1001 | $\lambda_{DU} \left[\left(Et \times \frac{TI}{2} \right) + (1 - Et) \times \frac{SL}{2} \right]$ | |

ahol:

- RRF¹⁴ – kockázatcsökkentési tényező;
- TI¹⁵ – a bizonyítási tesztidő intervalluma;
- Et¹⁶ – a teszt hatékonysága;
- λ_{DU} ¹⁷ – veszélyes nem észlelt hibaarány;
- 1 – β – felfedezési valószínűség.

¹² Test Coverage – teszt lefedettség.
¹³ Diagnostic Coverage – diagnosztikai lefedettség.
¹⁴ Risk Reduction Factor.
¹⁵ Proof Test Time Interval.
¹⁶ Test Effectiveness.
¹⁷ Test Dangerous Undetected Failures.

4. Biztonsági integritási szintek (SIL¹⁸)

4.1. Mi is a SIL szint?

A PFD értéke alapján a rendszert biztonsági integritási szintekbe (SIL) sorolják, amelyeket az IEC 61508 és más funkcionális biztonsági szabványok határoznak meg. Minél alacsonyabb a PFD értéke, annál magasabb a SIL szint, és annál megbízhatóbb a rendszer.

Az eVTOL-ok tervezésénél a SIL szabványt alkalmazzák. A SIL biztonsági integrációs szintek gyűjteménye, amelyeket egy adott ipari folyamathoz vagy rendszerhez szükséges kockázatcsökkentési szint meghatározására használnak.

A SIL azonosítja és értékeli a kockázatokat, amelyeket egy adott rendszer, folyamat vagy eszköz jelent az emberekre, a környezetre vagy a gazdasági javakra.

Minél nagyobb egy folyamathoz vagy rendszerhez kapcsolódó kockázat, annál magasabb a szükséges SIL szint.

A SIL-t gyakran használják a biztonság szempontjából kritikus rendszerek tervezéséhez és üzemeltetéséhez olyan iparágakban, mint az olaj- és gázipar, a vegyipari feldolgozás és az atomenergia-termelés, járműipar vagy éppen a légi közlekedés.

A SIL-t a Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottság (IEC¹⁹) határozza meg az IEC 61508 és IEC 61511 szabványokban.

A SIL egy szabványosított módszer a biztonsági rendszerek megbízhatóságának értékelésére és a biztonsági követelmények teljesítésének biztosítására. A SIL szintjei az adott rendszer kockázatának mértékétől függenek. Az IEC 61508 szabványon alapuló funkcionális biztonsági szabványok négy SIL-t határoznak meg, amelyek közül a SIL 4 a legmegbízhatóbb és a SIL 1 a legkevésbé megbízható. A következő SIL szinteket különböztetjük meg:

- SIL 1 – alacsony biztonsági szint;
- SIL 2 – közepes biztonsági szint;
- SIL 3 – magas biztonsági szint;
- SIL 4 – kritikus biztonsági szint.

4.2. SIL 3

A számos halálos áldozattal vagy súlyos sérüléssel járó balesetek elkerüléséhez szükséges integritást képviseli. A SIL 3 a biztonsági integritás harmadik legmagasabb szintje a SIL szabványban. A SIL 3 követelményeinek való megfelelésre tervezett rendszer vagy folyamat PFD-je az adott alkalmazástól függően kevesebb, mint 0,1–1%. A SIL 3-ra jellemzően olyan rendszerek esetében van szükség, amelyek meghibásodás esetén jelentős kockázatot jelentenek az emberi életre vagy a környezetre, mint például egy vegyi üzem vészleállító rendszerei vagy egy atomerőmű biztonsági rendszerei.

¹⁸ Safety Integration Level.

¹⁹ International Electrotechnical Commission.

4.3. A SIL 3 tartalmi elemei

4.3.1. Teljesítményszint

A SIL 3 esetén a rendszernek magas szintű teljesítményt kell biztosítania a hibák és meghibásodások minimalizálása érdekében. A rendszernek képesnek kell lennie a kritikus hibák azonosítására, elkerülésére vagy csökkentésére.

4.3.2. Biztonsági intézkedések

A SIL 3 rendszereknek magas szintű megbízhatósági és biztonsági intézkedéseket kell tartalmazniuk. A rendszernek képesnek kell lennie arra, hogy előre jelezze a hibákat és meghibásodásokat, és minimalizálja azok kockázatát. A SIL 3 tanúsítvány megszerzéséhez egy rendszernek vagy folyamatnak szigorú tervezési, tesztelési és ellenőrzési folyamaton kell átesnie annak biztosítása érdekében, hogy megfeleljen a szükséges biztonsági integritási szintnek.

5. SIL 4

A SIL 4 tanúsítás az egyik legmagasabb biztonsági szintet jelenti, és általában a kritikus fontosságú biztonsági rendszerek értékelésére és tanúsítására használják. A SIL 4 tanúsítás tehát azt jelenti, hogy egy adott rendszer a legmagasabb szintű biztonsági követelményeknek felel meg, megfelelően tesztelték, ellenőrizték és tanúsították az adott szintnek megfelelően. Az ilyen tanúsítványok általában olyan kritikus rendszerekhez kapcsolódnak, mint például az űrkutatás, a repülés, a vasúti közlekedés, a kémiai vagy nukleáris iparágak és más hasonló területek.

5.1. A SIL 4 tartalmi elemei

5.1.1. Teljesítményszint

SIL 4 esetén a rendszernek magasabb szintű teljesítményt kell biztosítania a hibák és meghibásodások minimalizálása érdekében. A rendszernek képesnek kell lennie a kritikus hibák azonosítására, elkerülésére vagy csökkentésére.

5.1.2. Biztonsági intézkedések

A SIL 4 rendszereknek rendkívül magas szintű megbízhatósági és biztonsági intézkedéseket kell tartalmazniuk. A rendszernek képesnek kell lennie arra, hogy előre jelezze a hibákat és meghibásodásokat, és minimalizálja azok kockázatát.

5.1.3. Tervezési követelmények

A SIL 4 rendszerek tervezéséhez nagyon magas szintű szakértelemre és figyelemre van szükség. A tervezőknek meg kell érteniük a rendszer működési környezetét és azokat a lehetőségeket, amelyek megbízhatósági és biztonsági kihívásokat jelentenek.

5.1.4. Ellenőrzés és karbantartás

A SIL 4 rendszerek működését folyamatosan ellenőrizni kell, és szükség esetén karbantartást kell végezni. A rendszernek képesnek kell lennie az automatikus tesztelésre, valamint az öndiagnosztikára is.

5.1.5. Dokumentáció

A SIL 4 rendszerekhez szükséges dokumentációknak nagyon részletesnek és pontosnak kell lenniük, valamint tartalmazniuk kell a rendszer működési követelményeit, az ellenőrzési és karbantartási utasításokat, a hibaelhárítási utasításokat, valamint a biztonsági utasításokat.

5.1.6. Validáció²⁰ és verifikáció

A SIL 4 rendszerek tervezését, fejlesztését és telepítését validálni, a rendszer működését verifikálni kell. A validáció és verifikáció célja, hogy bizonyosodjon meg arról, hogy a rendszer megfelel az előírt követelményeknek és biztonságosan működik.

6. Tanúsítások

6.1. A tervező szervezet jóváhagyása (DOA-tanúsítvány)

A DOA²¹ egy olyan jóváhagyási eljárás, amely lehetővé teszi, hogy egy tervezési szervezet, például egy repülőgépgyártó cég, hivatalosan is elvégezhesse a tervezési és mérnöki munkát, valamint a repülőgép-alkatrészek gyártását, valamint azt, hogy be lehessen építeni a repülőgépekbe. Az EASA (Európai Repülésbiztonsági Ügynökség) által kiadott DOA-tanúsítvány bizonyítja, hogy a tervezési szervezet felelős az általa tervezett, gyártott vagy karbantartott légi járművek biztonságos működéséért, valamint azért, hogy megfeleljen az EASA előírásainak.

A DOA-tanúsítvány rendelkezése értelmében a tervezési szervezet jogosult arra, hogy saját maga véglegesítse a terveket, azokat jóváhagyassa és megfelelő minőségűre szabja a légi járművek tervezéséhez, gyártásához, valamint karbantartásához. Ezért a DOA-tanúsítvánnyal rendelkező cégeknek nagyobb szabadságot biztosítanak az alkotófolyamatban, illetve gyorsabbak

²⁰ Elfogadás, hitelesítés.

²¹ Design Organisation Approval.

és hatékonyabbak lehetnek az új repülőgépek vagy repülőgép-alkatrészek kifejlesztésében és tesztelésében. A DOA-tanúsítvány tehát az eVTOL légi járművek tervezése, tesztelése és gyártása szempontjából kulcsfontosságú, hogy biztosítsa azok biztonságos működését.

6.2. A gyártó szervezet jóváhagyása (POA-tanúsítvány)²²

A POA olyan engedélyezési eljárás, amely lehetővé teszi, hogy egy szervezet hivatalosan is elvégezhesse az eVTOL légi járművek gyártását. Az EASA által kiadott POA-tanúsítvány bizonyítja, hogy a gyártó szervezet megfelel az EASA előírásainak a termékek minőségére és biztonságára vonatkozóan. A POA-tanúsítvány rendelkezése értelmében a gyártó jogosult arra, hogy gyártási folyamatokat vezessen be, ellenőrizzék az alkatrészeket, az összeszerelést és tesztelést, valamint a minőségellenőrzési rendszereket a légi járművek gyártása során. Ez garantálja, hogy az eVTOL légi járművek kerülnek legyártásra, tesztelésre és minősítésre a szabványoknak megfelelően, és ennek megfelelően biztonságosan működnek.

A POA-tanúsítvánnyal rendelkező cégeknek nagyobb szabadságot biztosítanak a termelési folyamatban, és gyorsabbak, hatékonyabbak lehetnek az új repülőgépek vagy repülőgép-alkatrészek gyártásában. Ezáltal lehetővé válik az eVTOL légi járművek sorozatgyártása, és azt is garantálja, hogy az összes termék ugyanolyan magas minőségű és biztonságos lesz.

7. Az első, Európában kiadott tanúsítások

A német Volocopter már rendelkezik EASA-tanúsítással, mégpedig a „Design Organisation Approval” (tervezési szervezet jóváhagyás) és a „Production Organisation Approval” (gyártási szervezet jóváhagyás) tanúsításokkal. Emellett a Volocopter az első cég, amely megkapta az EASA „Type Certificate” (típusbizonyítvány) tanúsítását az elektromos meghajtású VTOL (eVTOL) légi jármű kategóriájában a VoloCity típusra, amely egy kétszemélyes eVTOL légi jármű.

Ez azt jelenti, hogy az EASA szerint a Volocopter VoloCity típusa megfelel a biztonsági, teljesítmény- és környezetvédelmi előírásoknak, és engedélyezett, hogy üzembe helyezték az európai légtérben. A fenti tanúsítványok kiterjednek a VoloCity teljes gyártási folyamatára is, amely magában foglalja a kompozit alkatrészek gyártását, az elektromos meghajtóegységek teljes spektrumát, a meghajtásrendszer és a sárkányszerkezet végszerelését, valamint a mindenre kiterjedő berepülési programot.

8. eVTOL légi járművek kialakítása

Az eVTOL-t a kivitelük sokfélesége választja el a másik két repülőgéptípustól, a fix és forgó-szárnyú modellektől, ahol jelenleg négy különböző típus található.

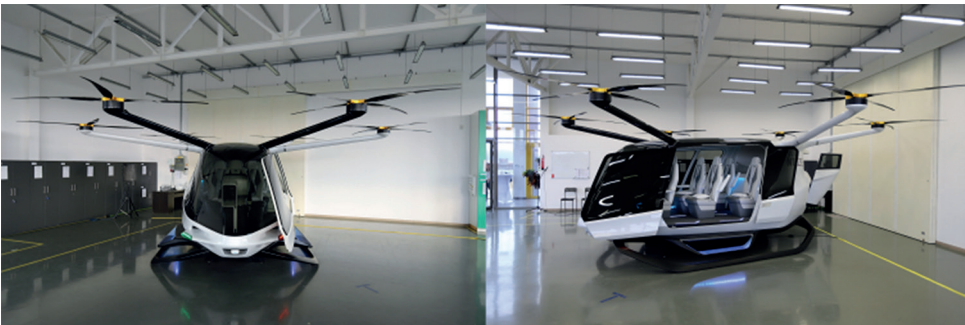
²² Production Organisation Approval.



2. ábra
VoloCity [4]

8.1. Multikopter típusú kialakítás

Ez a kialakítás egyszerű és hatékony (2. és 3. ábra). A multikoptereknek nincsenek szárnyaik, a hatótávolságuk a hagyományos légi járművekhez képest kisebb, az energiafogyasztás pedig nagyobb, mivel a szárnyak hiányából adódó aerodinamikai felhajtóerő-szükségletet a légcsonkcsavarok és a motorok teljesítményével kell kompenzálni.



3. ábra
A Kaliforniai Alaka'i Technologies által fejlesztett Skai típusú multikopter [5]

8.2. Az „Emelkedj és utazz”²³ irányzat



4. ábra
A Beta Technologies által kifejlesztett Alia [6]

A második tervezési irányzat az „Emelkedj és utazz” (4. ábra), amely a függőleges fel- és leszállásokhoz használható multikopter dizájnt kombinálja a hagyományos repülőgéppel. Ebben a koncepcióban a repülőgépnek van egy szárnya, amelyen az emelő hajtóművek és légszárak találhatók. Ezek biztosítják a függőleges mozgást. Az emelő légszárak a függőleges felszállás és leszállás, valamint a lebegés során használatosak. A vízszintes haladáshoz a hossz tengelyen vagy annak irányában elhelyezett további erőforrást helyeznek el.

8.3. A dönthető szárny és dönthető rotor irányzat

A harmadik koncepció neve „dönthető szárny és dönthető rotor”²⁴ (5. ábra). Ennél a tervezésnél több, viszonylag lassú, nyílt térben forgó légszár vagy rotort használnak, amelyek képesek minimalizálni a zajhatást. Ennek a kialakításnak a hátránya, hogy nehezebb, nagy nyomatomatékú villanymotorokat kell beszerezni, ami némileg bonyolítja az általános kialakítást.

²³ Lift & Cruise.

²⁴ „Tilt Wing” és „Tilt Rotor”.



5. ábra
A Joby Aviation repülőgépe [7]

8.4. A tolóerővektor-eltérítéses (DVT²⁵) irányzat

Az eVTOL-piacon megtalálható a tolóerővektor-eltérítéses irányzat is (6. ábra). Ennél az irányzatnál a merev szárnyakon ventilátorcsatornákat alkalmaznak (7. ábra). Ezekben a csatornákban (8. ábra) helyezték el a villanymotorral hajtott lapátkoszorúkat (EDF²⁶) a függőleges és vízszintes repülési üzemmódhoz, az elosztott elektromos meghajtás (DEP²⁷) koncepcióját alkalmazva. Ez a rendszer nagyon hatékony, és csendesebb a korábban ismertetett irányzatoknál.



6. ábra
A német Lilium Jet [8]

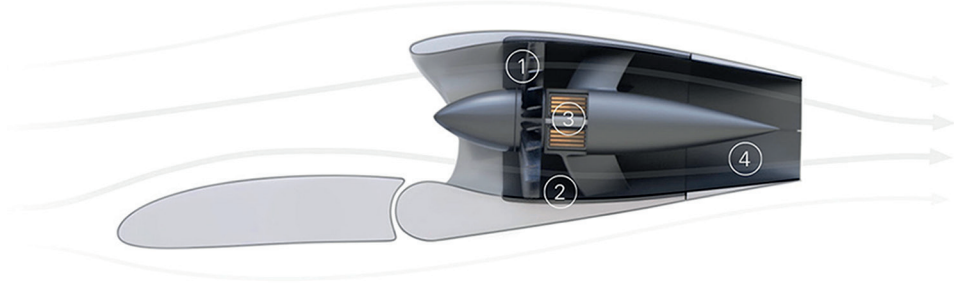
²⁵ Ducted Vector Thrust.

²⁶ Electric Ducted Fan – elektromos légcatornás ventilátor.

²⁷ Distributed Electric Propulsion.

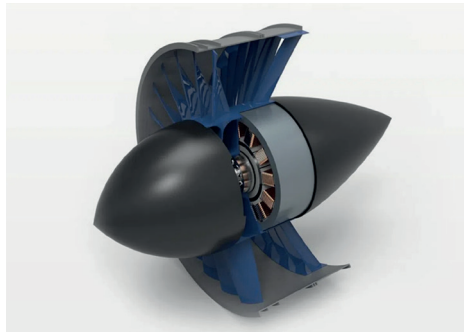
A Lilium Jet meghajtásrendszere a 7. ábrán látható elemekből áll:

1. ventilátor lapátkoszorú;
2. légcsatorna a motor rögzítésével;
3. villanymotor;
4. elfordítható (vektorálható) fúvócső a vertikális manőverekhez.



7. ábra

A Lilium Jet meghajtásrendszere [9]



8. ábra

A Lilium Jet EDF hajtóműve [10]

Az eVTOL repülőgépek DVT tervezési irányzata különösen előnyös lehet az átmeneti üzemmódban, amikor a repülőgép átvált a függőleges emelkedésről vízszintes repülésre, és fordítva. Ez a tervezési megoldás hatékonyabbá és biztonságosabbá teszi (az egyik legkritikusabb fázisban) az átmenetet a két repülési mód között.

9. eVTOL légi járművek mentési megoldásai

Noha a mai eVTOL légi járművek redundáns rendszerekkel vannak felszerelve, mégis előfordulhat a tolóerő vagy az irányítás kritikus mértékű elvesztése. Ez azt eredményezi, hogy a fedélzeten tartózkodók védelme (az összes légi jármű-típushoz hasonlóan) teljes mértékben a futóműtől/csúszótalpaktól, a törzs aljának és az ülések kialakításától függ. Ezek a kialakítások egy

rendszerként működnek együtt az utasokra gyakorolt leszállási hatások enyhítésére. Az eVTOL repülőgépek mentőrendszerei különböző megoldásokat tartalmazhatnak, attól függően, hogy milyen típusú repülőgépről van szó, és azt milyen felhasználási területen alkalmazzák.

9.1. Vészhelyzeti eljárások

Az eVTOL repülőgépek vészhelyzeti eljárásai általában a következő funkciókat tartalmazzák.

9.1.1. Vészleszállás

Az eVTOL-oknak lehetőséget kell biztosítani a vészleszállásra, ha valamilyen hiba vagy probléma merül fel a repülés során. Mentőrendszerüknek lehetővé kell tennie az irányítónak (vagy autonóm üzemmód esetén a vezérlő számítógépnek), hogy a légi jármű biztonságosan leszállhasson a dedikált leszállóhelyeken kívül, ha bármilyen műszaki vagy emberi tevékenységből adódó (esetleg egészségügyi) probléma merül fel. Ehhez természetesen elégséges energiatartalékkal kell rendelkezni.

9.1.2. Nem irányított vagy részben irányított vészleszállás

Amennyiben az eVTOL légi jármű a levegőben olyan sérülést szenved, amely nem teszi lehetővé a repülés feltételeinek fenntartását, a fedélzeten tartózkodók sérülésének mérséklése érdekében a sárkányszerkezetbe már a tervezéskor be kell iktatni úgynevezett energiaelnyelő pontokat, amelyek nagyban hozzájárulnak a becsapódási energia csökkentéséhez. További védelmi megoldásként alkalmazható még a helikoptereken már sikeresen alkalmazott amortizációs ülések beépítése (9. ábra). Ezek az ülések a becsapódáskor keletkező energiák jelentős részét elnyelik.



9. ábra

Az Npp Zvezda által gyártott „Pamir” amortizációs ülés [11]

9.1.3. Mentőernyő használata

Az ejtőernyő a légi járművet és az utasokat is mentheti, ha bármilyen hiba vagy probléma merül fel.

9.1.4. Személyi mentőernyő használata

Kisszámú utas esetében (1–2 fő) lehetséges lehet a sportrepülőgépeken elterjedt mentőernyők alkalmazása, amely személyi felszerelésként használható. Hátránya, hogy csak abban az esetben lehetséges a biztonságos menekülés, ha a fedélzeten tartózkodók ismerik a gépelhagyás folyamatát és az ejtőernyő szakszerű használatát. A fentiekből következik, hogy ez a megoldás szinte kizárólag magáncélú felhasználás esetén jöhet szóba, megfelelő kompetenciákat és a légi jármű megfelelő szerkezeti kialakítását feltételezve. Amennyiben a légi jármű kialakítása nem teszi lehetővé annak biztonságos elhagyását lefelé (10. ábra), lehetőség van a katonai légi járművekhez hasonló vészelhagyásra.



10. ábra
A vészelhagyás lefelé nem lehetséges [11]

Ilyen megoldás lehet az NPP Zvezda által kifejlesztett STS-94 ejtőernyős rendszer (11. ábra) alkalmazása, amelyet kifejezetten sportrepülőgépekre fejlesztettek ki, de paramétereitől függően más, könnyű repülőszervezetekben vagy megfelelő kialakítás esetén eVTOL-okban is használható.

A rendszer működése a következő:

- a katapultfogantyú meghúzását követően az ülés, amely egy piropatronnal ellátott teleszkópos rúdhoz van csatlakoztatva, megemelkedik felfelé;
- az ülés tetején lévő fejtámla egyfajta „kosként” áttöri a kabin tetejét, és aktiválja a pilóta ejtőernyőjének nyitási folyamatát;
- ezt követően működésbe lép a kilövő mechanizmus, amely egy rakétára szerelt kötél és egy hám segítségével kirántja a pilótát a kabinból. Az egész folyamat 1–1,5 másodpercig tart (11. ábra).



11. ábra

Az orosz NPP Zvezda SKS-92 hevederes mentőrendszer [11]

9.1.5. Központi ballisztikus mentőrendszer alkalmazása

Abban az esetben, ha az előzőekben ismertetett vészhelyzeti evakuálási megoldások valamilyen okból nem alkalmazhatók, lehetőség van egy központi ballisztikus mentőrendszer alkalmazására (12. ábra).



12. ábra

Központi ballisztikus rendszer alkalmazása [11]

Ez a módszer abból áll, hogy a gép fedélzetén egy (vagy több) nagy teherbírású ejtőernyőt helyeznek el, amelyet vészhelyzet esetén kioldanak, így a légi jármű a fedélzeten tartózkodókkal együtt biztonságosan lehozható. A rendszer hátránya, hogy a mentőernyő felfúvódásához meghatározott magasság kell, ami a nagyvárosi környezetben vagy a fel- és leszállási műveletek közben nem mindig adott.

10. Összefoglalás

Az eVTOL légi járművek megfelelő tervezéssel, teszteléssel és biztonsági rendszerekkel kell hogy rendelkezzenek, amelyek garantálják a repülőgép és az utasok biztonságát. A városi légi mobilitási ágazat fejlődésének jelenlegi szakaszában nincs egyértelmű konszenzusos megoldás a különböző mentési és kárenyhítési problémákra. A gyártók különböző technológiákkal kísérleteznek, a beszállítók pedig olyan technológiákat próbálnak létrehozni vagy adaptálni, amelyek jobban megfelelnek a biztonsági igényeknek. Az érdekelt feleknek együtt kell működniük a Szövetségi Légügyi Hivatallal, az Európai Unió Repülésbiztonsági Ügynökségével, valamint más szabályozó szervezetekkel, hogy meghatározzák az emberek és az eVTOL légi járművek biztonságának előnyben részesített módját. Az egyik dolog, amiben az iparági szakértők egyetértenek, az, hogy a biztonság a legfontosabb, valamint a korai hibák ezen a fronton tartósan alááshatják a közvélemény általi elfogadottság elnyerését.

Felhasznált irodalom

- [1] European Commission, Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0945>
- [2] European Commission, Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft. Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0947&rid=9>
- [3] *Volocopter VC200*. Online: https://lh5.googleusercontent.com/U9TfcREXAlwfUgt9ydHa4lKxvBPbQs8O7aGmr73uaApVyoQZ0ZBAAwXGvzUKP2GfQCeA7y-CHMjIdTliXOUKrnfFLPtrclek0SIBMP6Oaok0SG1eSLSdxLwcaTxz5F1txNU_3_VDb
- [4] *VoloCity*. Online: www.volocopter.com/wp-content/uploads/VoloCity_Long-Shot-scaled-e1618221255516.jpg
- [5] Földes A., Repülni is tud az új magyar busz. *Vezess*, 2020. január 23. Online: www.vezess.hu/magazin/2020/01/23/repulni-is-tud-az-uj-magyar-busz
- [6] <https://transportup.com/wp-content/uploads/2020/06/tu1-1.jpg>
- [7] https://i0.wp.com/assets.verticalmag.com/wp-content/uploads/2022/06/01_Joby-Aviation_Aircraft-1.jpg?resize=640%2C457&ssl=1
- [8] https://s30121.pcdn.co/wp-content/uploads/2021/04/lilium_jet_7_seat_render_04.jpg.webp
- [9] https://lilium.com/files/redaktion/refresh_feb2021/jet/mobile/00_engine_default.jpg
- [10] <https://s30121.pcdn.co/wp-content/uploads/2019/04/p1bper7s3l6lm1upte50f010a-085s0mh06.0pn0g.w0ebp00>

[11] <https://i0.wp.com/aeroautosales.com/wp-content/uploads/2022/03/evtol-safety-parachute.jpg?w=1000&ssl=1>

Safety of the eVTOL aircraft

The development and widespread use of eVTOL vehicles has received significant attention in the aviation industry in recent years. The safety of eVTOL technology is a significant challenge for the industry. Its flight systems and infrastructure of these type of vehicles require continuous development. eVTOL vehicles should consider more safety aspects than traditional aircrafts, such as flying at lower altitudes, shorter takeoff and landing distances, and much higher traffic potential hazards.

Keywords: eVTOL, Urban Air Mobility, safety, Advanced Air Mobility, safety integrity level, error rate, safety-critical system, reliability

Terpez Gábor
mérnök tanár
Óbudai Egyetem Kandó Kálmán
Villamosmérnöki Kar Elektronikai
és Kommunikációs Rendszerek Intézet
Műszertechnikai és Automatizálási Tanszék
terpez.gabor@uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0001-7899-2837

Gábor Terpez, MSc
Engineering Teacher
Óbuda University Kandó Kálmán Faculty of
Electrical Engineering Institute of Electronic
and Communication Systems Department of
Instrumentation and Automation
terpez.gabor@uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0001-7899-2837

