

Németh Péter<sup>1</sup> – Simon Sándor<sup>2</sup>

## SKYWALKER X8-AS PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP TELJESÍTMÉNY SZÁMÍTÁSA<sup>3</sup>

*Napjainkra egyre jobban elterjedtek a pilóta nélküli léghajművek, amelyek a legkülönbözőbb feladatok ellátására alkalmasak. Ezekre a járművekre éppúgy, mint a légitörleskedés többi szereplőjére, a légitörleskedési jog szabályai érvényesek. Dolgozatomban egy Skywalker X8-as pilóta nélküli léghajmű aerodinamikai- és repülésmechanikai számításait végeztem el. Megvizsgáltam a pilóta nélküli repülőgépek jogi környezetét, meghatároztam az üzemeltetési feltételeket, valamint megismertem a hatósági engedélyezés menetét. A számítási módszer a későbbiekben felhasználható különböző típusú pilóta nélküli repülőgép hatósági tanúsításához szükséges számítások elkészítéséhez.*

### **CALCULATING THE PERFORMANCE OF THE SKYWALKER X8, AN UNMANNED AERIAL VEHICLE**

*Nowadays, unmanned aerial vehicles are becoming more and more widespread, and are also capable to perform a wide variety of tasks. The rules of aviation law apply to these vehicles just as much as to all the other vehicles in the air transport. In my thesis, I performed aerodynamic and flight mechanic calculations for the Skywalker X8, an unmanned aerial vehicle. I examined the legal environment regarding unmanned aerial vehicles, determined the conditions of operation, and I also became familiar with the official authorization process. This calculation method can be used in the future for calculations that are needed for the official certification of different types of pilotless planes.*

## BEVEZETÉS

### **Számítás célja**

*„A légitörleskedési hatóság, az állami célú légitörleskedéssel összefüggő feladatok tekintetében a katonai léghajmű hatóság engedélyével repülhet a magyar légtérben az a léghajmű, amely vezető nélküli repülésre alkalmas, továbbá a jogszabályban meghatározott repülőmodell, illetve repülőeszköz.” [1]*

A fenti idézet a 1995. évi XCVII. törvényből való, amely kimondja, hogy egy vezető nélküli léghajműnek is rendelkeznie kell a léghajmű hatóság engedélyével, ahhoz hogy a magyar légtérben („A magyar légtér az országhatár által körbezárt terület feletti légtérnek a légi közlekedés számára fizikailag igénybe vehető magasságig terjedő része.” [1]). repülés céljára igénybe vegye.

Napjainkban egyre többen használnak pilóta nélküli repülőgépeket, legyen szó akár kedvtelésből végzett úgynevezett hobbirepülésről, akár tudományos rendeltetésűről, sőt egyre több Magyarországon működő vállalkozás is használ ilyen szerkezeteket kereskedelmi/üzleti vagy

<sup>1</sup> Járműmérnök hallgató, BME, peter.nemeth@hotmail.com

<sup>2</sup> Hatósági mérnök, simon.sandor@nkh.gov.hu

<sup>3</sup> Lektorálta: Prof. Dr. Óvári Gyula, egyetemi tanár, NKE Katonai Repülő Tanszék, ovari.gyula@uni-nke.hu

egyéb célra. Ezek irányítása történhet manuálisan, ilyen esetekben leggyakrabban modellrepülőkről beszélünk, vagy autonóm módon, ilyenkor használható az UAV<sup>4</sup> kifejezést.

Jelen tanulmány témája egy Skywalker X8-as pilóta nélküli repülőgép aerodinamikai és repülésmechanikai számítása, olyan formában, amely a későbbiekben alkalmas lehet egy légügyi hatósági tanúsítási eljárás keretében a szükséges engedélyek megszerzésére, amely birtokában a jármű biztonságos és jogszerű formában végezhet akár kereskedelmi/üzleti célú repüléseket is.

## SKYWALKER X8-AS PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉP

### Skywalker X8 bemutatása és adatai

Az általam választott és vizsgált csupaszárny kialakítású pilóta nélküli robotrepülőgép egy Skywalker X8-as, mely kül- és belföldön egyaránt igen népszerű a felhasználók körében. A csupaszárny kialakítás miatt nem rendelkezik fékszárnyval, függőleges- és vízszintes vezérsíkokkal, kormányzása az elevonok mozgatásával valósul meg. A kínai gyártmányú repülő öntött EPO (Expanded PoliOlefin), amely egy kiváló minőségű habanyag, a modell célú repülőgépek kedvelt alapanyaga. A repülőeszköz fő- és segéd tartója kör keresztmetszetű karbon cső, mely a kellő szilárdságot biztosít, illetve a - leggyakoribb konstrukciós megoldás szerint - toló légcsavaros, melyet villanymotor hajt meg. A jármű vezérlése rádió távirányítással (RC) vagy autonóm módon emberi irányítás nélkül történik (robotpilótával).



1. ábra Skywalker X8

Skywalker X8 legfontosabb adatai [2]:

- szárnyfeszítávolság: (b)            2120 mm
- szárnyfelület: ( $S_{\text{szárny}}$ )            80 dm<sup>2</sup>
- maximális tömeg: ( $m_{\text{TOW}}$ )        3,2 kg

A fent definiált adatok minden Skywalker X8-asra érvényesek, azonban a felszereltsége (motor,

<sup>4</sup> Unmanned aerial vehicle magyarul: pilóta nélküli légi jármű

szabályozó, akkumulátor, stb.) változhat a felhasználó igényei és anyagi erőforrásai szerint. A légi jármű engedélyezési folyamat szempontjából fontos mind az általános Skywalker X8-as légi jármű vizsgálata, ugyanakkor az egyedi légi alkalmassági vizsgálat szempontjából meg kell határoznunk az általunk használt légi jármű felszereltségét.

Az általam számított UAV felszereltsége a következő:

- motor: NTM Prop Drive Series 35-42 Series 1000 kV [3]
- szabályozó: Turnigy Trust 70A SBEC [4]
- akkumulátor: Turnigy nano-tech 8400mah 3S 40~80C [5]
- légszár: APC 12×6 [6]

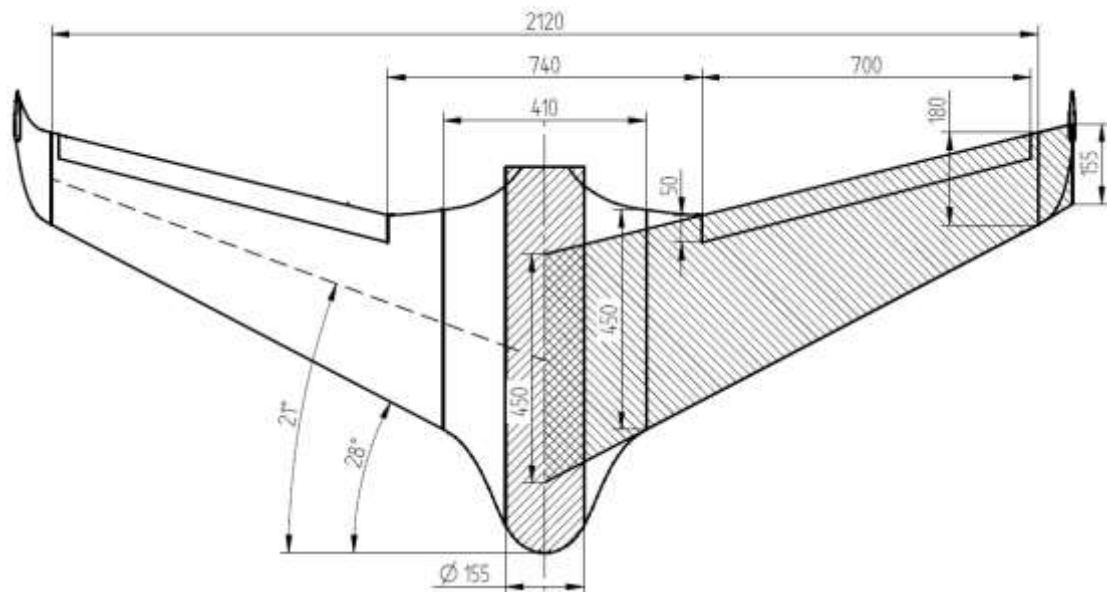
A többi, általam felhasznált adatot a légi jármű fotói és mérés alapján definiáltam.

### Skywalker X8-as legfontosabb paraméterei

A légi jármű aerodinamikai és repülésmechanikai számításai előtt szükséges mértékben egyszerűsíttem a geometriai jellemzőket, ugyanis Skywalker X8 bonyolult geometriai alaprajzú megoldása miatt, manuális számításokra eredeti állapotában nem alkalmas.

#### A szárny geometriája [2]

A szárny legtöbb méretét méréssel sikerült meghatározni, a nem mérhető vagy általam nem ismert geometriai adatokat becsléssel állapítottam meg.



2. ábra Skywalker X8 felülnézete

A szárny geometriai adatai:

- fesztávolság (b): 2120 mm
- felület ( $S_{\text{szárny}}$ ):  $700000 \text{ mm}^2 = 0,7 \text{ m}^2$  (egyszerűsítés után)
- nyílazási szöge ( $\Lambda_{LE}$ ):  $28^\circ$
- nyílazási szöge a húr 50%-nál ( $\Lambda_{1/2c}$ ):  $21^\circ$
- húr hossz ( $c_t$ ): 465 mm = 0,465 m
- húr hossz ( $c_r$ ): 155 mm = 0,155 m
- profil típusa: MH 61 (becslés)



- szárnytó beállítási szöge ( $i_r$ ):  $2^\circ$  (becslés)
- geometriai elcsavarás szöge ( $\epsilon_t$ ):  $-2^\circ$  (becslés)
- V-beállítási szöge ( $\Psi$ ):  $0^\circ$
- trapézviszony [7] ( $\Lambda$ ): 0,3333
- geometriai húrhossz [7] (cg): 0,3255 mm
- karcsúság [7] (AR): 6,5136

### A törzs geometriai kialakítása és adatai [2]

A törzset áramvonalas hengerré egyszerűsítettem le. Külső részén a kamera, belül pedig az akkumulátorok, a motor és szabályzó helyezhető el.

A törzs geometriai adatai:

- felülete ( $S_{\text{törzs}}$ ):  $116000 \text{ mm}^2 = 0,116 \text{ m}^2$
- szélessége:  $410 \text{ mm} = 0,41 \text{ m}$
- hossza:  $790 \text{ mm} = 0,79 \text{ m}$
- átmérője ( $D^c_{\text{törzs}}$ ):  $155 \text{ mm} = 0,155 \text{ m}$  (egyszerűsítés után)
- keresztmetszete ( $S^c_{\text{törzs}}$ ):  $0,0189 \text{ m}^2$  (egyszerűsítés után)
- karcsúság [7] ( $\Lambda_{\text{törzs}}$ ): 4,9677
- nedvesített felülete [7] ( $S_{\text{nedv.törzs}}$ ):  $0,2875 \text{ m}^2$

## Skywalker X8 aerodinamikai számításai

A tengerszinti magasságán [8] számítjuk ki az repülőgép aerodinamikai paramétereit, mivel alkalmazása során főként alacsony magasságon végez repülést.

### $c_l - \alpha$ görbe meghatározása [7] [9]

A felhajtóerő-tényező meghatározása illetve állásszögtől való függésének megismerése fontos, ahhoz, hogy pontos képet kapjunk a repülőgép repülési tulajdonságairól. A maximális felhajtóerő tényező definiálása, az átesési állásszög megismerése és az átesési sebesség meghatározása mind szükségesek, ahhoz, hogy a légijármű repülési tulajdonságait megfelelően pontosan megismerjük.

### Maximális felhajtóerő-tényező meghatározása [7]

A számítás elvégzése előtt meg kell, határozzuk a szárnyra (és profilra) érvényes Reynolds szám értékét:

$$Re_{\text{szárny}} = \frac{v_0 \cdot c}{\nu_0} = 4,9605 \cdot 10^5 \quad (1.1)$$

A maximális felhajtóerő-tényező értéke a következőképpen számítható:

$$c_{lmax} = c_{Lprmax} \cdot c_{Lmax\Lambda} \cdot k_\lambda \quad (1.2)$$

A profil és a Reynolds szám ismeretében, a szárnyprofil karakterisztikáinak felhasználásával definiálni tudjuk a profilhoz tartozó maximális felhajtóerő-tényező értékét.

- Maximális felhajtóerő-tényező a profilra [10] ( $c_{Lprmax}$ ): 1,25



A modell méretű repülőgépeire jellemző az alacsony Reynolds szám, mely jelentősen befolyásolja a maximális felhajtóerő-tényező értékét. Ebben a Reynolds szám tartományban körülbelül 1,2–1,4 körüli maximális felhajtóerő-tényezővel számolhatunk. Ezt a számítás során figyelembe kell venni.

A  $c_{Lmax\Lambda}$  tényezővel a szárny nyílazása miatt kialakuló felhajtóerő-tényező változást vesszük figyelembe, értéke a következő összefüggés szerint számítható:

$$c_{Lmax\Lambda} = \frac{1+\cos(\Lambda)}{2} = 0,9415 \quad (1.3)$$

A szárny trapéz alakját a  $k_\Lambda$  tényezővel vesszük figyelembe, melynek értéke esetünkben 0,93. [7]

A maximális felhajtóerő tényező ( $c_{lmax}$ ) értéke a 1.2-es egyenletbe való behelyettesítés után  $c_{lmax}=1,094$

### **$c_l - \alpha$ görbe kiszámítása [7] [9]**

A számítás során a különálló szárnyra határozzuk meg a  $c_l - \alpha$  görbét, ezért úgy tekintjük, hogy csak a szárny termel felhajtóerőt. A felhajtóerő tényező az állásszög függvényében az alábbi képlet alapján határozható meg:

$$c_l = c_{l0} + c_l^\alpha \cdot \alpha + c_l^\delta \cdot \delta_e \quad (1.4)$$

Az egyszerűsítések miatt a számítás során a  $c_{l0}$  és a  $c_l^\delta \cdot \delta_e$  értéke nulla. A felhajtóerő tényező tehát az alábbi összefüggés szerint változik, amely a görbe lineáris szakaszában igaz:

$$c_l = c_l^\alpha \cdot (\alpha - \alpha_0) \quad (1.5)$$

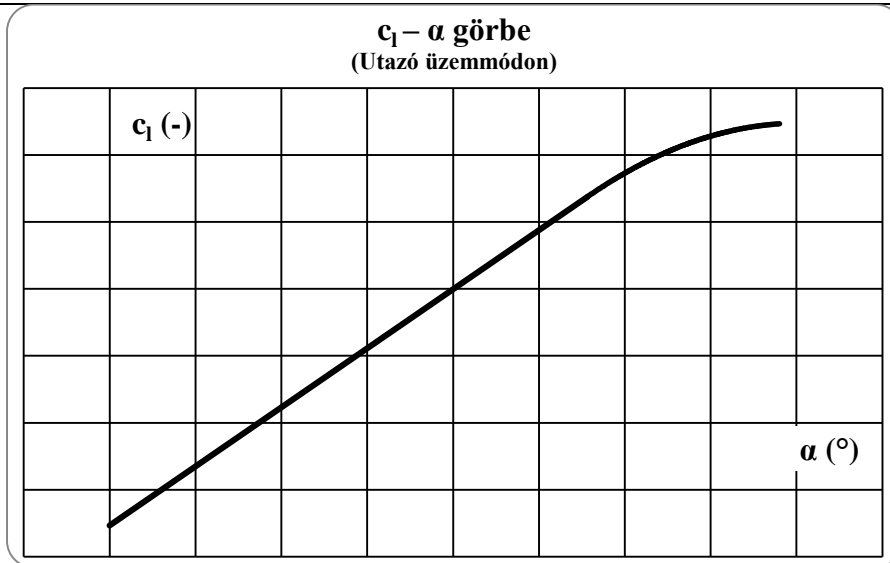
A fenti összefüggés alapján az  $\alpha$  értéke a távoli meg fúvás és a törzs építési vízszintese (továbbiakban: TÉV) által bezárt szög.

A  $\alpha_0$  értéke, amely a TÉV és a nulla felhajtóerő tényezőhöz tartozó vonal (ZLL-Zero Lift Line) által bezárt szög a következő összefüggés alapján határozható meg:

$$\alpha_0 = -i_r + \alpha_{0r} + k_e \cdot \varepsilon_t \quad (1.6)$$

amelyben a ZLL és a húr által bezárt szög  $\alpha_{0rw} = -1,5^\circ$ , a korrekciós tényező értéke  $k_e = 0,4$  ami a szárny elcsavarásából adódó szögeltérést korrigálja. Ezen adatok ismeretében az  $\alpha_0$  értéke  $-3,486^\circ$ . A  $c_l^\alpha$  értéke 4,069 [7].

A függvény azonban a  $c_l - \alpha$  görbének csak a lineáris szakaszát tudja megfelelően leírni. Az átesési közelében létrejövő hirtelen állásszög változás a 1.5 egyenlet alapján nem határozható meg. A  $c_l - \alpha$  görbét a maximális felhajtóerő tényező 80%-os értékéig lineárisan, az 1.5 egyenlet alapján definiáljuk, 80% felett egy érintő görbével közelítjük egészen addig, amíg el nem írjuk a maximális felhajtóerő tényező értékét. Ezáltal létrejön egy  $\Delta\alpha$  szög eltérés, amely mindössze néhány fok ( $1-2^\circ$ ), ezért számításaink során elhanyagolható [7].



3. ábra  $c_l - \alpha$  görbe

### $c_l - c_d$ görbe meghatározása [7] [9]

A  $c_l - c_d$  görbe vagy más néven poláris a repülőgépek egyik, ha nem a legfontosabb görbéje. A görbe ismerete nélkülözhetetlen ahhoz, hogy pontosan megismerjük a repülőgép aerodinamikai adottságait, repülési tulajdonságait. A Skywalker X8-as modell polárisát számítással határozzuk meg, de természetesen meghatározható szélcsatorna kísérletekkel vagy számítógépes szimulációs szoftverekkel is. A számítás során kiszámítjuk az egyszerűsített repülőgép szárnyára és törzsére az ellenállás tényező értékét.

Az ellenállás alapösszefüggése:

$$c_d = c_{d0} + c_{di} + \Delta c_d \quad (1.7)$$

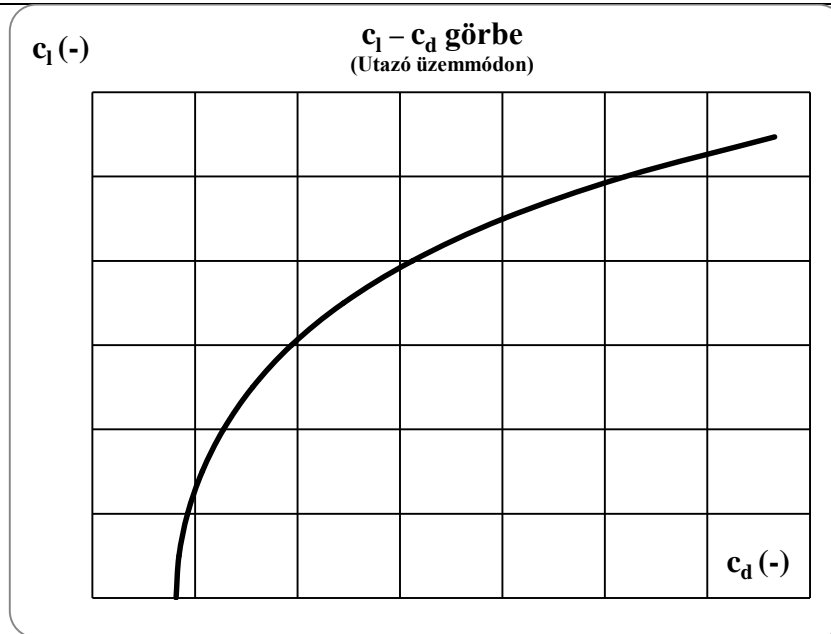
A  $c_{d0}$  tényező tartalmazza a szárny, törzs és a winglet ellenállás tényezőjét, amely összege 0,016496. [9] Az indukált ellenállás az alábbi összefüggés alapján számíthatjuk:

$$c_{di} = \frac{c_l(\alpha)^2}{\pi \cdot AR_{eff}} \quad (1.8)$$

A  $\Delta c_d$  veszi figyelembe az állásszög változás miatti ellenállás növekedés megváltozását az alábbi összefüggés alapján:

$$\Delta c_d = \frac{\bar{c}_l^5}{20} \quad (1.9)$$

Az ellenállás tényező ismeretében ábrázolható a repülőgép polárisa.



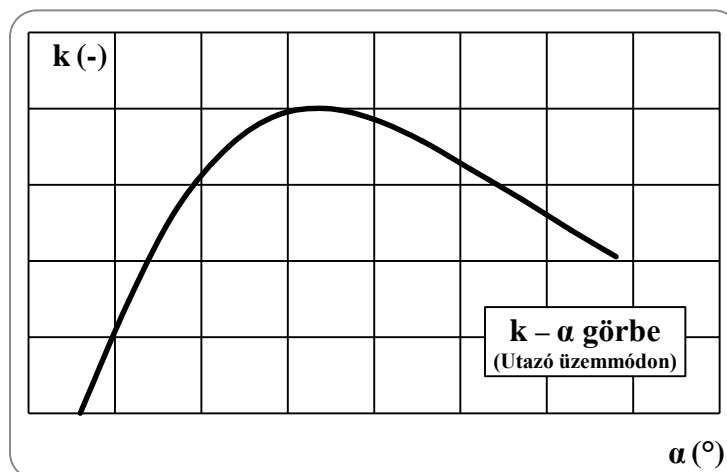
4. ábra  $c_l - c_d$  görbéje

### Aerodinamikai jóság meghatározása [11]

Az aerodinamikai jóság meghatározása az alábbi összefüggés alapján történhet:

$$k = \frac{c_l}{c_d} \quad (1.10)$$

Az aerodinamika jóságát ábrázolhatjuk az állásszög, illetve a felhajtóerő tényező függvényében is. Jelen esetben az állásszög függvényében ábrázoljuk.



5. ábra Az aerodinamikai jóság az állásszög függvényében

### Átesési sebesség meghatározása

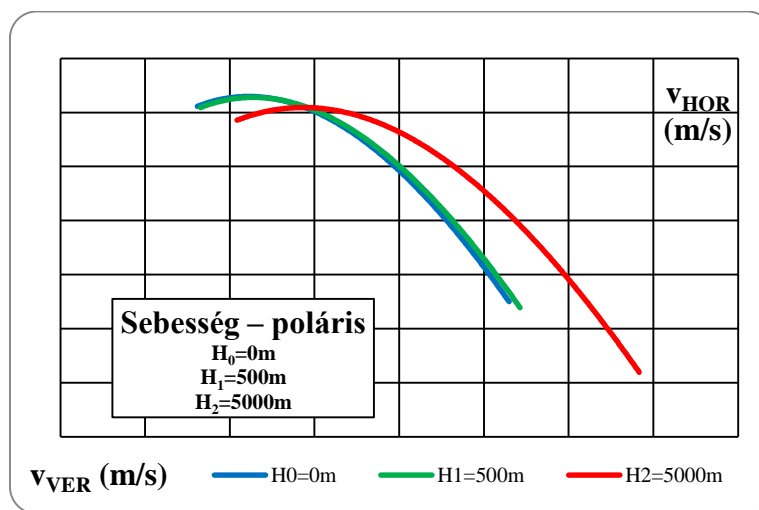
A Skywalker X8-as repülőgép esetében is - a repülés és a leszállás biztonsága szempontjából - fontos meghatározni azt a kritikus sebességet, amikor még ébred felhajtó erő a szárnyon. Ez, az alábbi összefüggés alapján lehetséges:

$$v_{\text{átesési}} = \sqrt{\frac{2 \cdot m_{\text{TOW}} \cdot g}{\rho \cdot c_{l\text{max}} \cdot S_{\text{szárny}}}} = 8,2161 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 29,578 \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad (1.11)$$

### Sebesség – poláris meghatározása [9][12]

Abban az esetben, ha a Skywalker X8-as repülő akkumulátora lemerül, vagy bármilyen egyéb ok miatt megszűnik a tolóerő létrehozása, a repülőgép siklórepülésben még folytathatja a repülést és biztonságosan földet érhet. Ezt, repülésbiztonsági megfontolásból kell vizsgálni, mert a repülés, reptetés nem veszélyeztetheti sem az emberek sem az épített környezet épségét, biztonságát. A sebesség – polárist három különböző magasságra határoztam meg, amelyek a görbék magasságtól való függését hivatottak bemutatni. (0 m, 500 m, 5000 m)

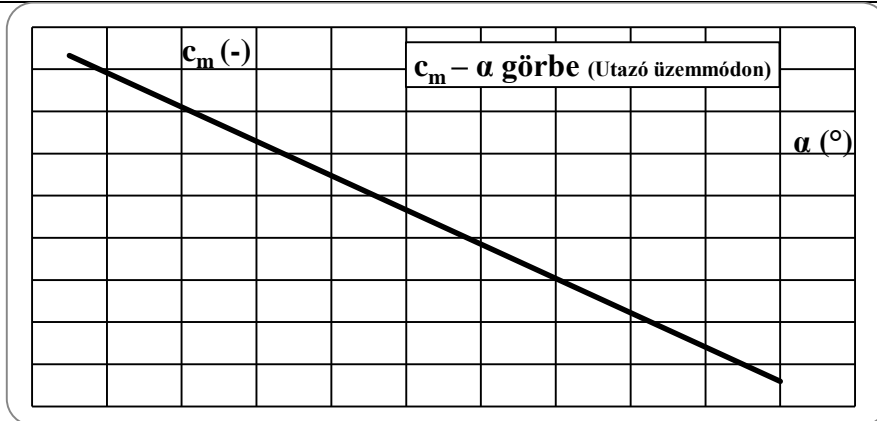
Az eredő légerő tényező ismeretében meghatározzuk az UAV eredő sebességét, majd felbontjuk horizontális és vertikális komponensekre és ezt ábrázoljuk egy diagramban.



6. ábra Sebesség – poláris

### Repülőgép stabilitása [9] [11]

A pilóta nélküli repülőgépek esetén is fontos a megfelelő stabilitás biztosítása, melynek számítása elvégezhető "kézi" számításokkal vagy számítógépes szoftverrel. Ekkor vizsgálni szükséges a repülőgép hossz- és keresztirányú valamint iránystabilitását is. Csúpszárny repülőgépek-nél a hosszstabilitás vizsgálata különösen fontos, ami a szárny pontos geometriai adatai és a repülőgép súlypontjának ismeretében az XFLR5 programmal végezhető el. A Skywalker X8-as esetében ezek az adatok csak részben álltak rendelkezésre így, a stabilitás vizsgálatnál felállított modell egyszerűsége miatt a számítás inkább csak irányadó. A létrehozott modell az egyszerűsített szárny geometriai adatai alapján készült, súlypontja a belépőéltől 300 mm-re került. Az így kiszámított  $c_m - \alpha$  görbe néhány pontjának koordinátái alapján Excelben rajzoltam meg a görbét, mivel így könnyebben és szemléletesebben jeleníthető meg. Az X8-as másik két tengely körüli stabilitását nem vizsgáltam.



7. ábra  $c_m - \alpha$  görbe

## Skywalker X8 repülésmechanikai számításai

### Szükséges teljesítmény [9][12]

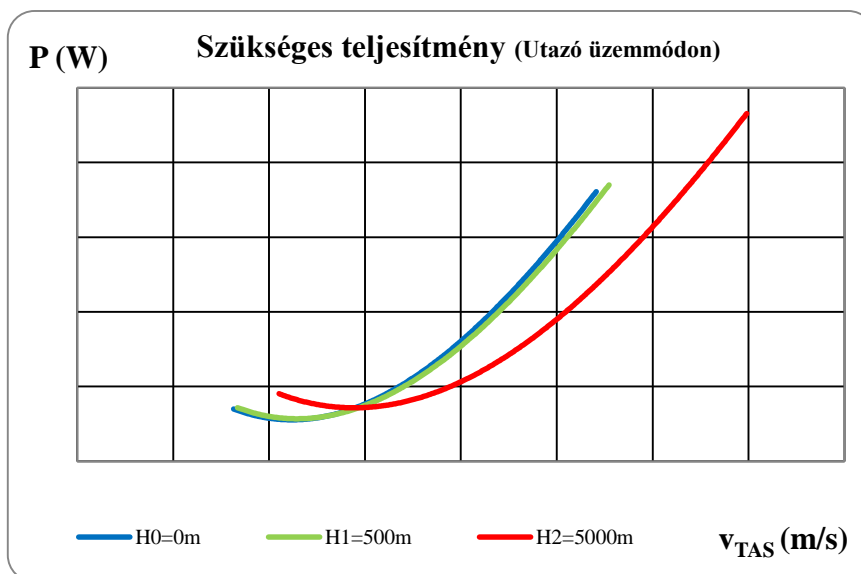
Az utazó üzemmódon a Skywalker X8-asra ható erők vizsgálatából indulunk ki, amely alapján a szükséges tolóerő az alábbi összefüggés alapján számítható:

$$T = \frac{W_{TOW}}{k} = \frac{m_{TOW} \cdot g}{k} = T_r \quad (2.1)$$

a 2.1-es összefüggés alapján meghatározható különböző sebességekre a szükséges tolóerő értéke, amelyből megállapítható a repülőgép tolóerő-sebesség diagramja. Légcsavaros légi járművek esetében azonban nem a hajtómű tolóerejét, hanem sokkal inkább a teljesítményét célszerű megadni. A szükséges teljesítmény számításának az összefüggése:

$$P_r = T_r \cdot v \quad (2.2)$$

A repülési magasság változásakor a levegő sűrűségének változása számításoknál a sűrűségviszonnyal vehető figyelembe (8. ábra).



8. ábra Szükséges teljesítmény



## Rendelkezésre álló teljesítmény [7][12]

A megfelelő légszűrő és motor kiválasztására több módszer létezik, ugyanakkor ebben a mérettartományban - saját helyzetünk megkönnyítésére - célszerű figyelembe venni a gyártó vagy a forgalmazó ajánlásait. A Skywalker X8-ashoz többféle légszűrő típust ajánl a gyártó/forgalmazó, amelyek közül én az APC 12x6-os légszűrőt választottam, melynek karakterisztikája letölthető a gyártó honlapjáról. [13]

Légszűrő paraméterei:

- átmérője: 12 hüvelyk = kb. 305 mm
- emelkedése: 6

A motor kiválasztása során is célszerű követni a légszűrőválasztás során alkalmazott döntési módszert, így esett a választás a NTM Prop Drive 35-42 Series 1000KV 450 W / 700W kefe nélküli villanymotorra.

Motor legfontosabb paraméterei:

- típus: NTM Prop Drive Series 35-42 Series 1000 kV
- kV: 1000 rpm/V
- maximális áramerősség: 47A
- maximális teljesítmény: 450 W (3S) / 750 W (4S)
- tömeg: 146 g

A rendelkezésre álló teljesítményt a légszűrő karakterisztikái és a motor maximális teljesítménye ismeretében meghatározható. Utóbbi esetén a 450 W maximális értékkel számolunk, mert egy háromcellás akkumulátor biztosítja a szükséges teljesítményt.

## Rendelkezésre álló teljesítmény számítása [9][12]

Toló légszűrő esetén a számítás menete hasonlóan működik, mint a húzólégszűrőknél.

A rendelkezésre álló teljesítmény kiszámítása során először az egyes sebességekhez és fordulatszámokhoz tartozó előrehaladási fok értéket kell meghatározni az alábbi összefüggés alapján:

$$J = \frac{v}{n \cdot D} \quad (2.3)$$

A rendelkezésre álló teljesítmény számítása az alábbi összefüggés alapján lehetséges:

$$P_a = \eta_{lcs} \cdot k_{\eta_{törzs}} \cdot k_{\eta_M} \cdot P_{motor} \quad (2.4)$$

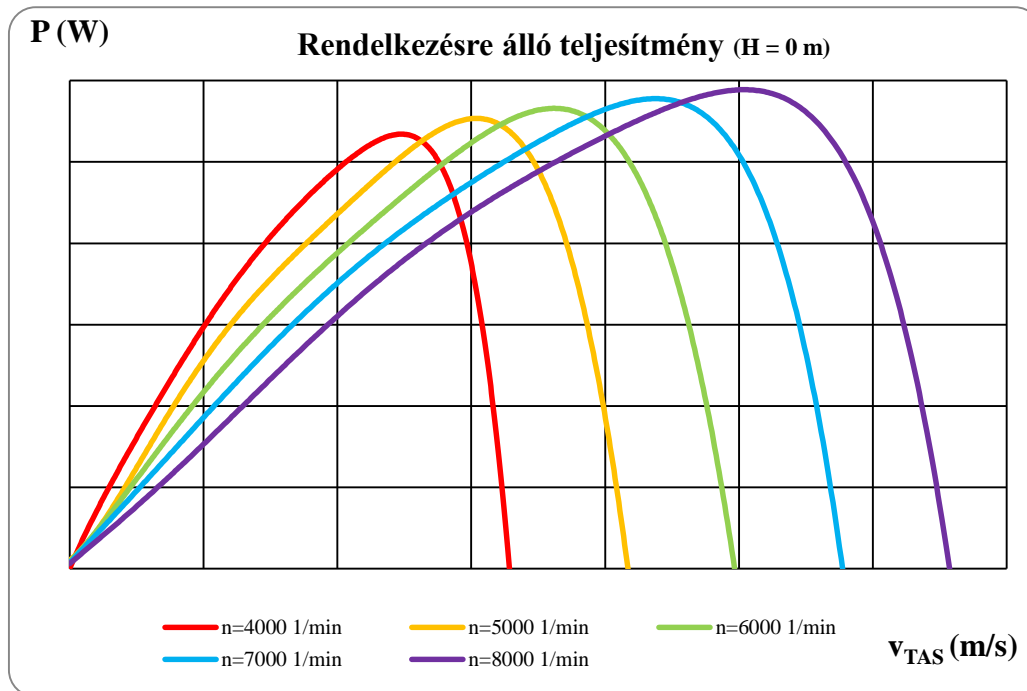
A légszűrő hatásfok meghatározható az előrehaladási fok ismeretében a légszűrő karakterisztikájából. (I- $\eta$  diagramból)

A  $k_{\eta_{törzs}}$  tényező a légszűrő és a törzs egymásra hatását veszi figyelembe húzó légszűrők esetében. Toló légszűrőnél ezzel a tényezővel vettem figyelembe azt, hogy a légszűrő megzavart áramlásban működik. A Skywalker X8-as esetében a  $k_{\eta_{törzs}} = 0,92$  [14]

A  $k_{\eta_M}$  tényező pedig az esetleges Mach szám elérését hivatott figyelembe venni. A mi légszűrőnk és a kisméretű pilóta nélküli repülőgépek esetében ennek a tényezőnek az értéke 1, tehát nem következik be további hatásfokromlás, mivel a modell légszűrőknél nem jöhet létre akkora légszűrő lapátvégi sebesség, ami ezt szükségessé tenné.

A motor teljesítménye alatt a minden esetben annak maximális teljesítményét értjük. A feltételezésünk az, hogy a légsavár annyira leterheli a motort, hogy az különböző fordulatszámon tudja leadni a maximális teljesítményét. A pontosabb számításokhoz a motor és a légsavár együttműködésének vizsgálata lenne szükséges.

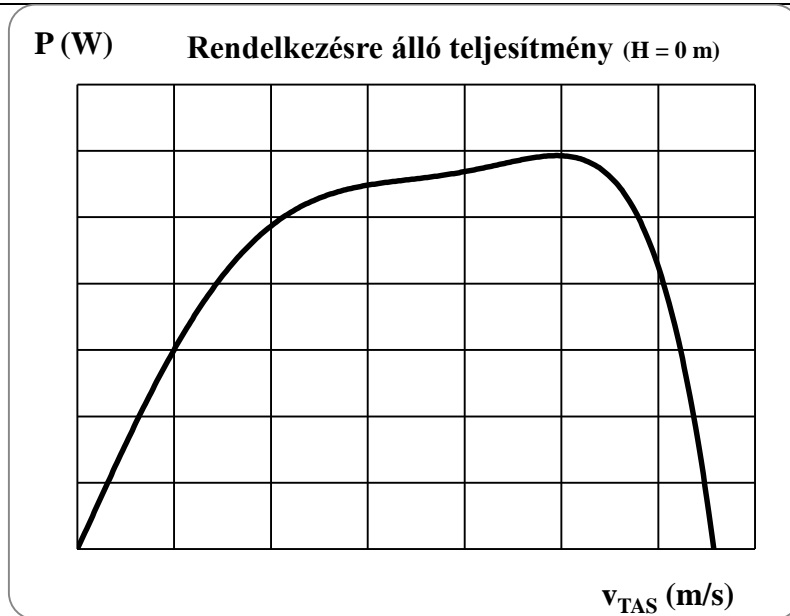
Az így kiszámított rendelkezésre álló teljesítmény értékeket a sebesség függvényében ábrázoljuk különböző állandó fordulatszám esetén. A fordulatszám értékeket 4000 1/min-től 1000 1/min-ként növeljük egészen 8000 1/min-ig. Utóbbi, egy olyan elméleti maximumnak tekinthetjük, amelynél még biztosan nem következik be a légsavár mechanikai károsodása.



9. ábra Rendelkezésre álló teljesítmény különböző fordulatszámok esetén

Jól megfigyelhető, hogy a légsavár hatásfoka 0,7–0,8 közötti előrehaladási foknál meredeken csökken és a vonóerő kifejtése megszűnik. [13] Merev légsavarak esetében ugyanakkor a fordulatszám növelésével, ahogy diagramon is megfigyelhető, elérhető nagyobb sebességeken (25–30 m/s) is megfelelő nagyságú tolóerő, illetve teljesítmény.

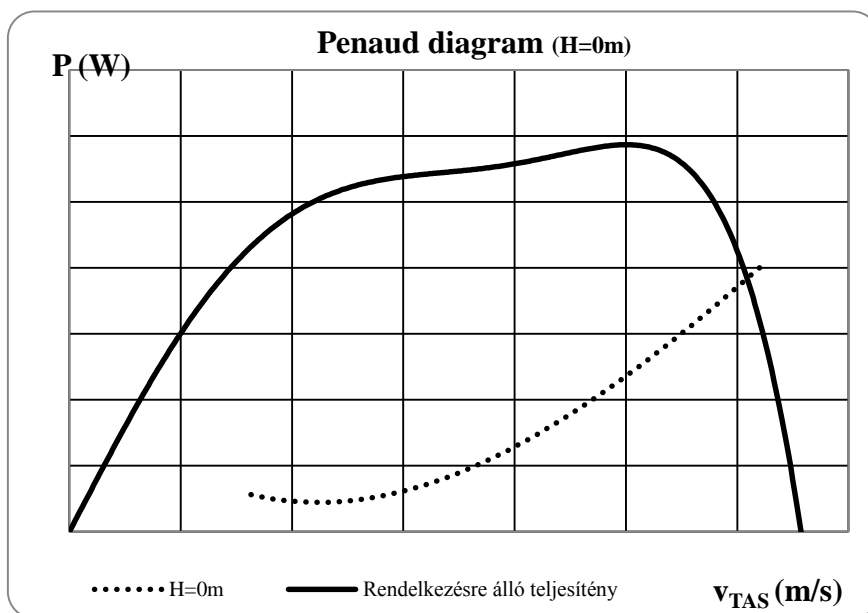
A számítás során csak tengerszint magasságára határoztuk meg a rendelkezésre álló teljesítményt, úgy egyszerűsítve, hogy a légsavár hatásfok értékét 0,6–0,7 körüli értéken próbáljuk tartani a fordulatszám növelésével. Így alakul ki a 10. ábrán látható rendelkezésre álló teljesítmény görbe.



10. ábra Rendelkezésre álló teljesítmény

### Penaud diagram [9][12]

A Penaud diagramban ábrázoljuk a szükséges és rendelkezésre álló teljesítmény görbét 0 m-es magasságra.



11. ábra Penaud diagram

### Utazó üzemmód sebességei [9][12]

A Skywalker X8-as számára a Penaud diagram felhasználásával definiáljuk a nevezetes sebességeit, amelyek:

- *minimális sebesség*: az a legkisebb sebesség, amivel a repülő vízszintesen repülni képes. Meghatározása a Penaud diagramról történik a baloldali metszéspont leolvasásával. Ha

nincs ilyen, akkor a legkisebb sebességhez tartozó érték lesz a tényleges minimális sebesség a szükséges teljesítmény görbéről;

- *gazdaságos sebesség*: az a sebesség, ahol a legkisebb hajtómű teljesítményre van szükség az állandó magasságú és sebességű repüléshez (azaz a szükséges teljesítmény görbe minimum helyén);
- *aerodinamikai utazó sebesség*: az a sebesség, amellyel a lehető legnagyobb hatótávolság érhető el, adott mennyiségű üzemanyag esetén. Leolvasása úgy lehetséges, hogy a szükséges teljesítmény görbéhez érintőt húzunk a nulla pontból és az érintési pontot levetítjük a vízszintes tengelyre, így megkapjuk az aerodinamikai utazó sebesség értékét;
- *maximális sebesség*: a légi jármű által elérhető legnagyobb repülési sebesség. A szükséges és a rendelkezésre álló teljesítmény görbe jobb oldali metszéspontja.

A teljesítmény görbéről leolvasott értékek  $H=0$  m-re:

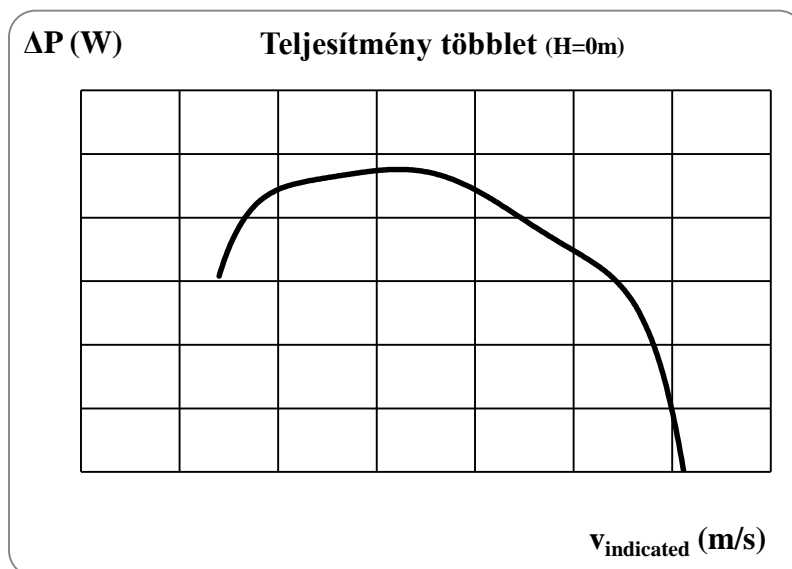
- minimális sebesség:  $v_0 = 8,1$  m/s
- gazdaságos sebesség:  $v_g = 11$  m/s
- aerodinamikai utazó sebesség:  $v_{P/V_{\min}} = 13$  m/s
- maximális sebesség:  $v_{\max} = 30,2$  m/s

### Emelkedési sebesség [9][12]

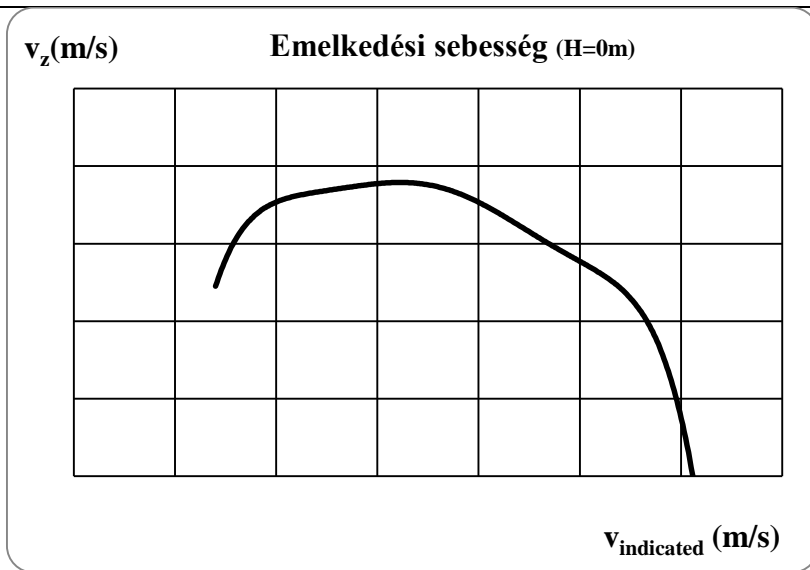
Az emelkedési sebesség számításához meg kell határoznunk a rendelkezésre álló teljesítmény és a szükséges teljesítmény különbségét, az úgynevezett teljesítmény többletet. A teljesítmény többlet meghatározása után az emelkedési sebesség az alábbi összefüggéssel számítható:

$$v_z = \frac{\Delta P}{W} \quad (2.5)$$

A teljesítmény többlet a rendelkezésre álló és a szükséges teljesítmények különbsége.



12. ábra Teljesítmény többlet



13. ábra Emelkedési sebesség

### Repülési idő [9]

A repülési időtartam számítását H=0 m-re számítjuk, mivel ezen a repülési magasságon a legnagyobb. Az első esetben megvizsgáljuk, hogy a maximális motorteljesítmény leadása esetén mennyi lesz a repülési idő.

Szükséges adatok:

- akkumulátor feszültség (V) = 11,1V
- akkumulátor kapacitás (C) = 8400 mAh
- motor teljesítmény ( $P_{motor}$ ) = 450 W
- a motor és a szabályzó hatásfoka [15] ( $\eta_{motor\_ESC}$ ) = 0,86

Az akkumulátor energiáját az alábbi összefüggés alapján számítható:

$$E_{akkumulátor} = V \cdot C = 335664 \text{ J} \quad (2.6)$$

Az akkumulátor által biztosított teljesítmény:

$$P_{akkumulátor} = \frac{P_{motor}}{\eta_{motor\_ESC}} = 523,2558 \text{ W} \quad (2.7)$$

A repülési idő pedig az akkumulátor energiájának és teljesítményének a hányadosa:

$$t = \frac{E_{akkumulátor}}{P_{akkumulátor}} = 10,6915 \text{ min} \quad (2.8)$$

A repülési idő ebben az esetben hozzávetőleges 11 perc, ami megfelel a várakozásunknak maximális motorteljesítmény leadásakor.

A maximális repülési időt a gazdaságos sebességnél szükséges teljesítményre számítjuk ki. Felhasznált adatok:

- gazdaságos sebesség ( $v_g$ ) = 11 m/s
- szükséges teljesítmény, ami egyenlő a légcsavar által szolgáltatott teljesítménnyel ( $P_{ics} = P_a = 23 \text{ W}$ )



A motor teljesítmény:

$$P_{motor} = \frac{P_{ics}}{\eta_{ics} \cdot k_{\eta\text{örzs}} \cdot k_{\eta M}} = 35,714 \text{ W} \quad (2.9)$$

Az akkumulátor teljesítménye a 3.6.2-es egyenlet alapján:

- $P_{akkumulátor} = 41,528 \text{ W}$

A légszavar hatásfokát 0,7-nek vehetjük.

A 3.5.1, 3.5.2 és a 3.5.3-as összefüggések felhasználásával a maximális repülési idő:

- $t_{max} = 131,632 \text{ min}$

A számítás során alkalmazott egyszerűsítések miatt a két órás repülési idő reális lehet. A pontosabb repülési idő meghatározásához ellenállás számítás pontatlanságát kellene csökkenteni, illetve az egyéb repülési időt csökkentő tényezőket jobban figyelembe venni. (fordulók, emelkedés, stb.) Az így kapott repülési idő nagysága jóval közelebb állna a valóságos maximális repülési időhöz.

### Hatótávolság [9][11]

A hatótávolságot a  $H=0$  m-re definiáljuk, a repülőgép sebessége az aerodinamikai utazó sebesség, ugyanis ezzel érhető el a legnagyobb hatótávolság. Utóbbi esetén azt, az egyszeri teljes akkumulátor feltöltéssel repülhető maximális távolságot értjük, amely során a légi jármű képes még visszarepülni a felszállás eredeti helyére.

Az aerodinamikai utazó sebességnél szükséges teljesítmény:

- $P_a = P_{ics} = 25 \text{ W}$

A motor által teljesítménye a 3.5.4-es összefüggés alapján:

- $P_{motor} = 39,82 \text{ W}$

Az akkumulátor energiája a 3.5.1-es összefüggés alapján:

- $E_{akkumulátor} = 335664 \text{ J}$

Az akkumulátor teljesítménye a 3.5.2-es összefüggés alapján:

- $P_{akkumulátor} = 47,4048 \text{ W}$

A repülési idő a 3.6.3-as egyenlet alapján:

- $t = 118,0135 \text{ min}$

A hatótávolság:

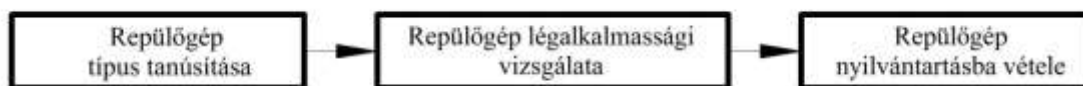
$$s = v \cdot t = 92,0505 \text{ km} \quad (2.10)$$

A repülési idő ismeretében nem meglepő a hatótávolság nagysága, ugyanakkor a repülési idő számítása során definiált módszerekkel hasonló mértékben lehetne pontosítani a hatótávolságot is. Az alkalmazott egyszerűsítésekkel és az ellenállás számítási módszerrel a hatótávolság értéke reális.

## PILÓTA NÉLKÜLI LÉGIJÁRMŰVEK HATÓSÁGI TANÚSÍTÁSA

Hagyományos légi járművek esetében a hatósági tanúsítás minden esetben a repülőgép tervező és gyártó szervezet hatósági bevizsgálásával, minősítésével kezdődik, mivel légi járművet, illetve légiközlekedéssel kapcsolatos eszköz gyártását, javítását kizárólag csak a Hatóság (értsd. légügyi hatóság) által tanúsított szervezet végezheti (lásd. légügyi törvény vonatkozó része).

Egy pilóta nélküli légi jármű esetében a hatósági tanúsítási eljárás rendszerint a típus tanúsítástól a repülőgép nyilvántartásba vételéig a 14. ábra szerint alakul.[16] Tekintettel a pilóta nélküli légi járművek rendkívül változatos méret és teljesítménybeli megoszlására a tervező, illetve gyártó szervezet légügyi hatóság által történő szervezeti tanúsítása nem minden esetben indokolt, mivel a légi jármű repülőműszaki paraméterei, illetve teljesítmény jellemzői nem teszik azt indokoltá, ahogy az általunk vizsgált géptípusnál sem. Fontos megjegyeznünk, hogy pilóta nélküli légi járművek hatósági tanúsításának még nem alakult ki a végleges rendje, az jelenleg még formálódik van csupán. Ennek megfelelően az alábbiakban részletezett eljárásrend sem tekinthető véglegesnek, hanem a jelenleg elfogadott állapotot tükrözi.



14. ábra Pilóta nélküli légi járművek hatósági tanúsítási folyamata

Először a jármű típusának, a mi esetünkben a Skywalker X8-asnak a hatósági tanúsítása történik meg, majd pedig az egyedi jármű légi alkalmassági vizsgálatára kerül sor. Ha mindkét esetben megfelel a jármű, akkor történhet meg a hatóság általi nyilvántartásba vétel. Jelenleg az UAV-kat nem veszi lajstromba a légügyi hivatal, de a későbbiekben (valószínűleg a közeljövőben az új gyártmányokra vonatkozó törvény hatályba lépése után) erre sorkerül, főként azoknál a repülőeszközöknél, amelyek kereskedelmi/üzleti célú repülést folytatnak. A repülőgép típus tanúsítása előtt sorra kell kerülnie a tervező/gyártó szervezet hatóság általi tanúsításának is, azonban ezzel a kérdéskörrel jelen tanulmányban részletesebben nem foglalkozik.

### A repülőgép típus tanúsítása

*„A típusalkalmassági bizonyítvány igazolja, hogy a légi jármű, illetve a légiközlekedéssel kapcsolatos eszköz típusa megfelel a légiközlekedés előírásainak.”[17]*

A törvény értelmében a Skywalker X8-asnak először meg kell felelnie a típusalkalmassági vizsgán. A vizsgálat alatt légügyi hatóság szakértői a benyújtott dokumentációk alapján megállapítják azt, hogy a légi jármű alkalmas-e a magyar légtérben való repülésre.

A típusalkalmasság vizsgálatra szükséges benyújtani a légi jármű:

- műszaki leírását
- légiüzemeltetési és kiszolgálási utasításokat
- karbantartási utasítást
- egyéb más hatóság által kiadott tanúsítványt (rádióengedély, stb.)



A típus tanúsítása során kerül sor a jármű szilárdsági vizsgálatára és a berepülésére. A légialkalmassági vizsgálat berepülési programját is ilyenkor készítik el.

### **A repülőgép légialkalmassági vizsgálata**

Az egyedi légialkalmassági vizsgálatra a jármű típus tanúsítása után kerül sor. Ilyenkor kerül sor az adott légi jármű típusra vonatkozó légialkalmassági berepülési program lerepülésének végrehajtására. A vizsgálat során a járművet a hatóság szakértői repülés közben ellenőrzik, és megvizsgálják, hogy biztonságos légiközlekedésre alkalmas-e.

A légialkalmassági vizsgálat végrehajtását követően a hatóság a légialkalmasság tényét megállapítja, és külön dokumentumban igazolja a jogszabályban meghatározott érvényességi ideig (légialkalmassági bizonyítvány).

### **A repülőgép hatósági nyilvántartásba vétele**

Amennyiben a légi jármű típus tanúsítása és a légialkalmassági vizsgálata során megfelelőnek bizonyul, akkor a hatóság a repülőgépet nyilvántartásba veszi, amely után jogszerűen használható az kereskedelmi/üzleti célra. A repülőgép üzemszerű alkalmazásához szükséges biztosítanunk a megfelelő üzemeltetési környezetet.

A jogszerű használat mellett természetesen kiemelten fontoságú az is, hogy ha a jármű a légügyi hivatal szakemberei által is alkalmas legyen a repülésre, mivel csak akkor működtethető biztonságosan. Ez pedig kiemelten fontos cél a repülés bármely szegmensében, így a pilóta nélküli repülés esetén is.

## **ÖSSZEFOGLALÁS**

Tanulmányunk célja az volt, hogy bemutassuk egy pilóta nélküli repülőgép teljesítmény számítását és a vizsgált pilóta nélküli légi jármű típus hatósági tanúsításának egy lehetséges folyamatát. A teljesítmény számításban kitértünk az UAV aerodinamikai- ( $c_l$ - $\alpha$  görbe, poláris, sebességi poláris, stb.), illetve repülésmechanikai (szükséges-, rendelkezésre álló teljesítmény, stb) számításaira. A kiszámított eredmények (pl. repülési idő, hatótávolság, stb.) pontossága tovább növelhető további számításokkal (pl. CFD szimuláció), illetve mérésekkel.

Véleményünk szerint, mivel a repülőgép nem rendelkezi a gyártó által kiadott hasonló szintű aerodinamikai számításokat tartalmazó dokumentációval az elvégzett számítások részét képezhetik a repülőgép hatósági tanúsításának megkezdéséhez szükséges alapvető műszaki dokumentációnak. A hatósági engedélyhez természetesen szükségesek további számítások, amelyek nem kerültek bemutatásra, főként terjedelmi okok miatt. (szilárdsági-, részletes stabilitási számításai, stb.) A „Pilóta nélküli légi járművek hatósági tanúsítása” című fejezetben bemutatásra került a jelenlegi magyarországi UAV tanúsítási folyamat, röviden jellemezve a különböző szakaszait. Fontos azonban megjegyeznünk, hogy ez a folyamat UAV-k esetében még nem tekinthető véglegesnek különös tekintettel a pilóta nélküli légi járművek korábban említett változatos technikai, kialakítás- és teljesítménybeli változatosságára.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] ORSZÁGGYŰLÉS 1995. évi XCVII. törvény a légitörvényről. Budapest, 1995. A jogszabály 2014. december 14.-én hatályos állapota.
- [2] Skywalker X-8 FPV / UAV Flying Wing 2120mm (2015. március 7.) (online)  
url:[http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/\\_\\_27132\\_\\_Skywalker\\_X\\_8\\_FPV\\_UAV\\_Flying\\_Wing\\_2120mm.html](http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__27132__Skywalker_X_8_FPV_UAV_Flying_Wing_2120mm.html)
- [3] NTM Prop Drive Series 35-42 Series 1000 kV (2015. március 7.) (online)  
url:[http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/\\_\\_16233\\_\\_NTM\\_Prop\\_Drive\\_35\\_42\\_Series\\_1000KV\\_700W.html](http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__16233__NTM_Prop_Drive_35_42_Series_1000KV_700W.html)
- [4] Turnigy Trust 70A SBEC Brushless Speed Controller (2015. március 7.) (online)  
url:[http://www.hobbyking.com/store/\\_\\_12189\\_\\_TURNIGY\\_TRUST\\_70A\\_SBEC\\_Brushless\\_Speed\\_Controller.html](http://www.hobbyking.com/store/__12189__TURNIGY_TRUST_70A_SBEC_Brushless_Speed_Controller.html)  
Turnigy nano-tech 8400mah 3S 40~80C (2015. március 7.) (online)  
url:[http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/\\_\\_21945\\_\\_Turnigy\\_nano\\_tech\\_8400mah\\_3S\\_40\\_80C\\_Lipo\\_Pack\\_TRA2878\\_Slash\\_VXL\\_Slash\\_4x4\\_.html](http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__21945__Turnigy_nano_tech_8400mah_3S_40_80C_Lipo_Pack_TRA2878_Slash_VXL_Slash_4x4_.html) APC 12x6 (2015. március 7.) (online)  
url:[http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/\\_\\_5441\\_\\_APC\\_style\\_propeller\\_12x6\\_E.html](http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__5441__APC_style_propeller_12x6_E.html)  
Preliminary Aerodynamical Calculation of Aircraft. (Aerodinamika házi feladat segédlet), (2015. március 7.) (online) url: [http://www.vrht.bme.hu/letoltes/Tanszeki\\_letoltheto\\_anyagok/Oktatok\\_anyagai/Jankovics\\_Istvan\\_anyagai/Aerodinamika/hazifeladat\\_segedlet.pdf](http://www.vrht.bme.hu/letoltes/Tanszeki_letoltheto_anyagok/Oktatok_anyagai/Jankovics_Istvan_anyagai/Aerodinamika/hazifeladat_segedlet.pdf)  
Légkör paraméterek (2015. március 7.) (online) url: <http://www.digitaldutch.com/atmoscalc/>
- [5] NÉMETH PÉTER Skywalker X8-as pilóta nélküli repülőgép teljesítmény számítása. Budapest, 2012 MH 61 (2015. március 7.) (online) url: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=mh61-il>
- [6] RÁCZ ELEMÉR Repülőgépek Budapest, Műegyetemi Kiadó, 2001
- [7] ROHÁCS JÓZSEF, GAUSZ ZSANNA, GAUSZ TAMÁS Repülésmechanika Budapest, Typotex, 2012  
Légcsavar karakterisztika (2015. március 7.) (online) url:  
[http://www.apcprop.com/v/downloads/PERFILES\\_WEB/PER3\\_12x6.dat](http://www.apcprop.com/v/downloads/PERFILES_WEB/PER3_12x6.dat)
- [8] Légcsavar-törzs egymásra hatását figyelembe vevő tényező (2015. március 7.) (online) url:  
[http://www.vrht.bme.hu/letoltes/Tanszeki\\_letoltheto\\_anyagok/Oktatok\\_anyagai/Jankovics\\_Istvan\\_anyagai/Repulesmechanika/abrak/abrak.pdf](http://www.vrht.bme.hu/letoltes/Tanszeki_letoltheto_anyagok/Oktatok_anyagai/Jankovics_Istvan_anyagai/Repulesmechanika/abrak/abrak.pdf)
- [9] ERDŐDI ISTVÁN TAMÁS Alacsony Reynolds-számú légcsavar üzemi jellemzőinek analitikus és kísérleti vizsgálata. Budapest, 2012
- [10] SANDOR SIMON Oversight activity of NTA/AA related to UAS. V4 UAS International Conference 2014, Budapest, Hungary, 2014
- [11] HONVÉDELMI MINISZTERIUM 21/1998. (XII. 21.) HM rendelet, az állami légitörvények nyilvántartásáról, gyártásáról és javításáról, valamint a típus- és légitörvényekről, Budapest, 1998. A rendelet 2014. december 14.-én hatályos állapota.

## JELÖLÉS JEGYZÉK

Latin betűk, jelölések:

- $AR$ : szárnykarcsúság [-];
- $AR_{eff}$ : effektív szárnykarcsúság [-]
- $b$ : fesztávolság [mm];
- $C$ : akkumulátor kapacitása [mAh]
- $c$ : szárny húr hossz [mm]
- $c_d$ : ellenállás tényező [-];
- $c_{d0}$ : felhajtóerőtől független ellenállás tényező [-];
- $c_{di}$ : indukált ellenállás tényező [-];
- $c_g$ : geometriai húr hossz [mm];
- $c_l$ : felhajtóerő-tényező [-];
- $c_{l0}$ : nulla állásszöghöz tartozó felhajtóerő-tényező [-];
- $c_{lmax}$ : maximális felhajtóerő tényező [-];
- $c_{LmaxA}$ : nyílzás hatását figyelembe vevő korrekciós tényező [-];

- $C_{Lprmax}$ : profilra vonatkozó maximális felhajtóerő-tényező [-];
- $C_l^{\alpha}$ : állásszög függő felhajtóerő-tényező [-];
- $C_l^{\delta}$ : magassági kormánykiterítéstől függő felhajtóerő-tényező [-];
- $C_m$ : bólintó nyomatéki tényező [-]
- $C_R$ : eredő légerő tényező [-]
- $c_r$ : szárnyvég húrhossz [mm];
- $c_t$ : szárnytő húrhossz [mm];
- $D$ : ellenállás erő [N]
- $D$ : légszűrő átmérő [mm]
- $D_{törzs}^c$ : törzs átmérője [mm];
- $E_{akkumulátor}$ : akkumulátor energiája [J]
- $g$ : nehézségi gyorsulás [ $m/s^2$ ];
- $i_r$ : szárnytő beállítási szöge [ $^{\circ}$ ];
- $J$ : előrehaladási fok [-]
- $k$ : aerodinamikai jóság [-]
- $k_e$ : korrekciós tényező [-]
- $k_{\eta M}$ : korrekciós tényező nagysebességű légszűrők esetén [-]
- $k_{\eta törzs}$ : korrekciós tényező, a légszűrő és a törzs egymásra hatására [-]
- $k_A$ : szárny trapéz alakját figyelembe vevő korrekciós tényező [-];
- $L$ : felhajtó erő [N]
- $l$ : törzs hossza [mm];
- $m_{TOW}$ : maximális felszálló tömeg [kg];
- $n$ : fordulatszám [1/s]
- $p$ : levegő nyomása [Pa];
- $P_a$ : rendelkezésre álló teljesítmény [W]
- $P_{akkumulátor}$ : akkumulátor teljesítmény [W]
- $P_{motor}$ : motor teljesítmény [W]
- $P_r$ : szükséges teljesítmény [W]
- $Re$ : Reynolds szám [-];
- $s$ : hatótávolság [km]
- $S_{törzs}^c$ : törzs homlokfelülete [ $m^2$ ];
- $S_{nedv.törzs}$ : törzs nedvesített felülete [ $m^2$ ];
- $S_{törzs}$ : törzs felülete [ $m^2$ ];
- $S_{szárny}$ : szárnyfelület [ $m^2$ ];
- $t$ : repülési idő [s]
- $T$ : levegő hőmérséklete [K];
- $T$ : tolóerő [N];
- $T_r$ : szükséges tolóerő [K];
- $V$ : feszültség [V]
- $v$ : sebesség [m/s]
- $v_0$ : minimális sebesség [m/s]
- $v_0$ : utazó sebesség [m/s]
- $v_{átesési}$ : átesési sebesség [m/s]
- $v_g$ : gazdaságos sebesség [m/s]
- $v_{HOR}$ : horizontális sebesség [m/s]
- $v_{indicated}$ : Indicated Air Speed [m/s]
- $v_{max}$ : maximális sebesség [m/s]
- $v_{P/Vmin}$ : aerodinamikai utazó sebesség [m/s]
- $v_{TAS}$ : True Air Speed [m/s]
- $v_{VER}$ : vertikális sebesség [m/s]
- $v_z$ : emelkedési sebesség [m/s]
- $W$ : repülő súlya [N];

Görög betűk, jelölések:

- $\alpha$ : állásszög [ $^{\circ}$ ];



- 
- $\alpha_0$ : *nulla felhajtó erő tényezőhöz tartozó állásszög [°];*
  - $\alpha_{0rv}$ : *a ZLL és a húr által bezárt szög [°];*
  - $\Delta c_d$ : *állásszög változás miatti ellenállás tényező növekedés [-];*
  - $\delta_e$ : *magassági kormány kitérésének a szöge [°];*
  - $\Delta H$ : *sűrűség viszony [-]*
  - $\Delta P$ : *teljesítmény többlet [W]*
  - $\varepsilon_i$ : *geometriai elcsavarás szöge [°];*
  - $\eta$ : *dinamikai viszkozitás [Pa·s];*
  - $\eta_{lcs}$ : *légcsvár hatásfok [-]*
  - $\eta_{motor\_ESC}$ : *motor és a szabályzó hatásfoka [-]*
  - $\eta_M$ : *korrekciós tény., levegő összenyomhatóságát veszi figyelembe [-]*
  - $\Lambda$ : *trapézviszony [-];*
  - $\Lambda_{1/2c}$ : *szárny nyilazási szöge a húrhossz 50%-nál [°];*
  - $\Lambda_{LE}$ : *szárny nyilazási szöge [°];*
  - $\lambda_{törzs}$ : *törzskarcsúság [-];*
  - $\nu$ : *kinematikai viszkozitás [m<sup>2</sup>/s];*
  - $\rho$ : *levegő sűrűsége [kg/m<sup>3</sup>];*
  - $\Psi$ : *szárny V-beállítási szöge [°];*
  - $\theta$ : *siklási szög [°]*