https://doi.org/10.26552/ pas.Z.2025.1.3

UNIVERSITY OF ŽILINA

POKROČILÁ AERODYNAMIKA VÝŠKOVÝCH BEZPILOTNÝCH LIETAJÚCICH SYSTÉMOV (UAV)

Maroš Benka
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Pavol Pecho
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

This article deals with the advanced aerodynamics of high-altitude long-endurance unmanned aerial vehicles (HALE UAVs). The aim of the work was to analyze the current knowledge in the field of stratospheric flights and, based on the obtained results, to design a theoretical model of an unmanned aerial vehicle capable of stratospheric flight for specialized applications. The thesis analyzes the specific conditions of stratospheric flight, including low air density, low Reynolds numbers, potential compressibility effects, and reduced control surface effectiveness. Existing HALE UAV systems (e.g., Helios, Zephyr, PHASA-35) and their aerodynamic challenges are examined. Within the scope of the work, a theoretical UAV model with a 10-meter wingspan, S1223 airfoil, and V-tail configuration was designed using Autodesk Inventor software. The aerodynamic performance of the designed model was verified using CFD simulation in ANSYS Fluent software for flight conditions at an altitude of 20 km (temperature 216.65 K, pressure 5.5 kPa, speed 25 m/s) employing the k-ω SST turbulence model and the NIST Real Gas model. The simulation demonstrated the model's ability to generate a lift of 512.5 N with a drag of 38.2 N, allowing it to carry a payload of approximately 12 kg with a total drone weight of 40.2 kg. The achieved L/D ratio is 13.42, confirming the good aerodynamic efficiency of the design for the given conditions. In conclusion, it is stated that stratospheric flight presents significant aerodynamic challenges mainly due to low air density, but the designed model demonstrated potential for specialized missions. Successful HALE UAV design requires a comprehensive and integrated approach combining aerodynamics, structures, materials, propulsion, and control systems.

Keywords

Unmanned Aerial Vehicles, HALE UAV, Stratosphere, Low Reynolds Number Aerodynamics, UAV Design

1. Úvod

Bezpilotné lietajúce systémy, najmä tie určené pre operácie vo veľkých výškach s dlhou vytrvalosťou (HALE), predstavujú dynamicky sa rozvíjajúcu oblasť leteckej techniky. Tieto systémy, operujúce v stratosfére vo výškach presahujúcich 15 až 20 kilometrov [20, 28], ponúkajú unikátne schopnosti pre dlhodobé misie, ako sú diaľkový prieskum Zeme, monitorovanie životného prostredia, meteorologické merania, poskytovanie komunikačných služieb či spravodajské a sledovacie operácie [4, 19, 27]. Aktuálnosť tejto témy podčiarkuje rýchly technologický pokrok a vývoj systémov ako Airbus Zephyr, BAE Systems PHASA-35 či Aero Vironment Horus A [6, 7, 15]. Napriek značnému pokroku však návrh a prevádzka HALE systémov čelia špecifickým a komplexným výzvam z extrémnych podmienok stratosférického prostredia. Kľúčovým problémom je aerodynamika v podmienkach veľmi nízkej hustoty vzduchu [23, 28]. To vedie k letu pri nízkych Reynoldsových číslach [29, 31, 32], čo spôsobuje dominanciu viskóznych efektov, vznik laminárnych separačných bublín, zvýšenú citlivosť na odtrhnutie prúdenia a potenciálne nelineárne aerodynamické správanie [31, 32, 36]. Súčasne, potreba generovať dostatočný vztlak v riedkom vzduchu si často vyžaduje let pri vyšších pravých vzdušných rýchlostiach, čo môže viesť k relevantným Machovým číslam a nástupu efektov stlačiteľnosti [30, 37]. Ďalšou výzvou je znížená účinnosť konvenčných riadiacich plôch v dôsledku nízkeho dynamického tlaku [41]. Požiadavka na nízku hmotnosť a veľké rozpätia krídel prináša problémy v oblasti aeroelasticity a štrukturálnej integrity [2, 26, 39]. Cieľom tejto práce bolo analyzovať aktuálne poznatky z oblasti aerodynamiky letov v stratosfére a na základe týchto poznatkov navrhnúť a aerodynamicky zhodnotiť teoretický koncept vonkajšieho tvaru bezpilotného lietajúceho prostriedku.

1.1. Analýza výškových bezpilotných lietajúcich systémov (UAV)

Výškové bezpilotné lietajúce systémy (UAV), známe aj ako High-Altitude Long Endurance (HALE) UAV, predstavujú špecifickú kategóriu leteckej techniky určenú na operácie vo výškach nad 15 km [23]. Tieto systémy sa vyznačujú schopnosťou dlhodobého letu, nízkou spotrebou energie a vysokou efektivitou pri plnení misií, ako sú diaľkový prieskum, meteorologické merania, komunikácia či monitorovanie [4, 19, 27]. Prevádzka v stratosfére prináša extrémne podmienky – nízku hustotu vzduchu, teploty pod -50 °C a intenzívne slnečné žiarenie [21, 24], čo kladie vysoké nároky na aerodynamiku, konštrukčné materiály a pohonné systémy. Tento článok analyzuje kľúčové projekty v oblasti HALE UAV, ich aerodynamické vlastnosti a technologické inovácie.

1.2. NASA Helios: Priekopník stratosférického letu

Projekt NASA Helios (HP03-2) bol jedným z prvých pokusov o dlhodobý stratosférický let poháňaný solárnou energiou [2, 3]. V roku 2001 dosiahol rekordnú výšku 29 524 m [3], čím demonštroval potenciál HALE UAV. Helios využíval solárne články a palivové články na báze vodíka, no jeho nehoda v roku 2003 odhalila kritické aerodynamické a aeroelastické výzvy [2, 3].

1.2.1. Kľúčové aerodynamické problémy

- Aeroelasticita a dihedrálny uhol: Flexibilná štruktúra krídla s rozpätím 247 stôp a aspektovým pomerom 31 reagovala na turbulencie neočakávaným ohnutím, čo viedlo k dihedrálnemu uhlu až 40 stôp [2]. To spôsobilo redistribúciu vztlaku a nestabilitu.

- Nestabilný fugoidný režim: Vysoký dihedrál vyvolal divergentné kmitanie s periódou 8–9 sekúnd, zvyšujúce rýchlostné výkyvy [2]. Nestabilita bola spôsobená posunom aerodynamického centra a nárastom momentu zotrvačnosti.

- Citlivosť na turbulencie: Malé poryvy (0,5 ft/s) spôsobili trvalé deformácie krídla, ktoré sa nevrátilo do pôvodného tvaru [2].

- Prekročenie návrhovej rýchlosti: Počas strmhlavého pádu rýchlosť dvojnásobne prekročila návrhovú hodnotu, čo viedlo k zlyhaniu štruktúry [2].Nehoda Heliosu zdôraznila potrebu pokročilých aeroelastických simulácií a robustných riadiacich systémov pre HALE UAV.

Obrázok 5 NASA Helios

Zdroj: https://archive.org/details/370731main_ED03-0152-2

1.3. Airbus Zephyr: Rekordér v dĺžke letu

Airbus Zephyr, konkrétne model Zephyr 8/S, je solárne poháňané UAV typu HAPS (High-Altitude Platform Station) [4, 42]. V roku 2022 dosiahol rekordnú výdrž 64 dní [6], čím prekonal Helios. Zephyr operuje vo výškach nad 20 km [19] a je navrhnutý na misie ako pozorovanie Zeme, komunikácia a prieskum [42].

1.3.1. Aerodynamické vlastnosti

Vysoký aspektový pomer: Krídlo s rozpätím 25 m a hmotnosťou 60 kg (aspektový pomer ~31) znižuje indukovaný odpor a zvyšuje pomer vztlaku k odporu (L/D > 20) [19], čo je kľúčové v riedkom vzduchu (hustota ~0,088 kg/m³ [24]).

Solárny pohon: Solárne články (GaAs, >1500 W/kg) nabíjajú batérie (435 Wh/kg) pre nočné lety [19, 42]. Dva motory (1,5 kW) poháňajú vrtule optimalizované pre nízke Reynoldsovo číslo (~10^5) [34].

Stabilita a aeroelasticita: Krídlo s 10° dihedrálnym uhlom a twistom zlepšuje stabilitu, no je citlivé na turbulencie. Nehoda v roku 2022 po 64 dňoch bola spôsobená poruchou motora v turbulencii [6, 19].

Výškový výkon: Zephyr dosiahol 23 200 m v roku 2021 [42], s profilom krídla (pravdepodobne NACA 6-série) optimalizovaným pre laminárny tok.

Zephyr demonštruje pokrok v aerodynamickej efektivite a riadení, no ukazuje aj pretrvávajúce výzvy spojené s aeroelasticitou a stabilitou.

Obrázok 4 Štart Airbus Zephyr

Zdroj: https://mediacentre.airbus.com/element?id=555991

1.4. BAE Systems PHASA-35: Všestranná HAPS platforma

BAE Systems PHASA-35 je solárno-elektrické UAV s rozpätím krídel 35 m a hmotnosťou 150 kg [7, 8], navrhnuté pre stratosférické misie (65 000–70 000 stôp) [7, 11]. Platforma využíva ultraľahké kompozitné materiály a GaAs solárne články [7, 13], čo umožňuje dlhodobú výdrž.

1.4.1. Technické a aerodynamické aspekty

Konštrukcia: Vysoký aspektový pomer krídla maximalizuje vztlak a minimalizuje odpor v riedkom vzduchu. Odnímateľný podvozok znižuje hmotnosť po vzlete [7, 13].

Pohon: Dva elektromotory poháňajú vrtule optimalizované pre stratosféru, s Li-ion batériami pre nočné lety [7, 13].

Testovanie: Úspešné stratosférické lety v roku 2023 a 2024 (vrátane 24-hodinového letu nad 66 000 stôp) potvrdili aerodynamickú efektivitu a robustnosť [11, 14].

Aplikácie: PHASA-35 podporuje prieskum, komunikáciu (4G/5G) a monitorovanie, s nosnosťou do 15 kg [7, 12].

PHASA-35 kombinuje nízke prevádzkové náklady a flexibilitu, čím konkuruje tradičným lietadlám a satelitom.

1.5. AeroVironment Horus A: Nováčik s potenciálom

Horus A, vyvinutý ako vylepšená verzia Sunglideru, je solárne UAV pre vládne aplikácie [15]. Hoci technické detaily sú obmedzené, nosnosť 68 kg a výkon 1,5 kW [15], spolu s modernizovanou avionikou a autonómiou, naznačujú schopnosť niesť pokročilé senzory a vykonávať misie ako sledovanie či zálohovanie GPS.

Predpokladané aerodynamické vlastnosti

Konštrukcia: Predpokladá sa vysoký aspektový pomer a ľahká štruktúra podobná Sunglideru [15], optimalizovaná pre stratosféru [26, 39].

Výzvy: Nízka hustota vzduchu a nízke Reynoldsovo číslo vyžadujú efektívne profily krídla a minimalizáciu odporu [23, 29].

Obrázok 6 Prvý let PHASA-35 vo Woomere, február 2020

https://d3lcr32v2pp4l1.cloudfront.net/Pictures/780xany/5/9/3/67593_phasa35maidencbaesystems_995632.png

1.6. Qimingxing 50: Čínsky konkurent

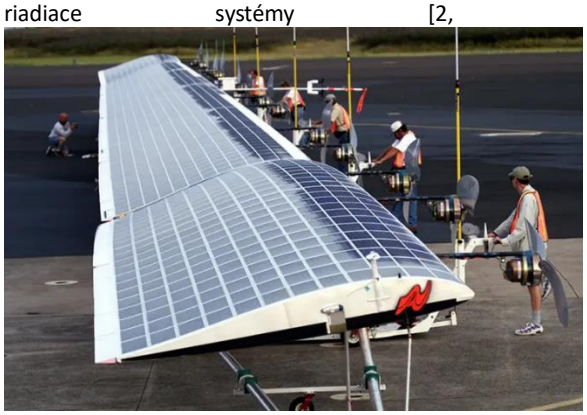
Čínsky Qimingxing 50 (Morning Star 50) je solárne UAV s rozpätím krídel 50 m a šiestimi motormi [16, 17], navrhnuté pre dlhodobé stratosférické misie. Jeho ultraľahká konštrukcia a solárne panely umožňujú operácie vo výške 20 km [16].

Aerodynamické riešenia

Krídlo: Dlhé a štíhle krídlo s vysokým aspektovým pomerom minimalizuje odpor a maximalizuje vztlak [17].

Stabilita: Dvojitý trup so stabilizátormi zlepšuje manévrovateľnosť [18].

Výzvy: Nízke Reynoldsovo číslo a turbulencie vyžadujú pokročilé riadiace systémy [2, 29].



Obrázok 7 Predletová príprava Horus A na let

Zdroj: https://topwar.ru/uploads/posts/2024-10/57a68bfee0_horus-2.webp

1.7. Zhrnutie

Analýza systémov ako Helios, Zephyr, PHASA-35, Horus A a Qimingxing 50 ukazuje rýchly pokrok v technológiách HALE UAV. Kľúčové výzvy zahŕňajú aeroelasticitu, stabilitu v turbulenciách a efektivitu v riedkom vzduchu [2, 23, 29, 41]. Inovácie ako ľahké kompozitné materiály, vysoko efektívne solárne články a sofistikované riadiace systémy umožňujú dlhodobé misie s minimálnymi nákladmi [13, 19, 40]. Tieto systémy otvárajú nové možnosti pre prieskum, komunikáciu a monitorovanie, s potenciálom nahradiť tradičné lietadlá či satelity v určitých aplikáciách [4, 27].

2. Analýza podmienok letov v stratosfére

Stratosféra, rozprestierajúca sa od približne 10–12 km do 50 km nad zemským povrchom [20, 28], predstavuje unikátne prostredie pre prevádzku výškových bezpilotných lietajúcich systémov (HALE UAV). Tieto systémy operujú najmä vo výškach 15–30 km [23], kde sa stretávajú s extrémnymi podmienkami, ako sú nízka hustota vzduchu, nízke teploty a minimálna turbulencia. Tieto faktory výrazne ovplyvňujú aerodynamiku a návrh HALE UAV, čo si vyžaduje špecifické technologické riešenia.

2.1. Atmosférické vlastnosti stratosféry

Stratosféra je charakteristická stabilným prostredím s minimálnou vertikálnou konvekciou a absenciou bežného počasia [21], čo je výhodné pre dlhodobé lety. Kľúčové atmosférické parametre zahŕňajú:

Teplotný profil:

V tropopauze (okolo 11 km) teplota klesá na -56,5 °C a zostáva konštantná do 20 km. Nad 20 km teplota stúpa v dôsledku absorpcie UV žiarenia ozónovou vrstvou, dosahujúc -44,5 °C vo výške 30 km [24, 28]. Tento profil ovplyvňuje rýchlosť zvuku a viskozitu vzduchu.

Tlakový profil:

Tlak klesá exponenciálne – z 22 632 Pa (11 km) na 1 200 Pa (30 km), čo je menej ako 1,2 % tlaku na úrovni mora [24, 28]. Nízky tlak znižuje dynamický tlak, čím obmedzuje aerodynamické sily.

Hustota vzduchu: Hustota klesá dramaticky – z 0,364 kg/m³ (11 km) na 0,018 kg/m³ (30 km) [24, 28]. Nízka hustota komplikuje generovanie vztlaku a znižuje Reynoldsovo číslo, čo ovplyvňuje prúdenie vzduchu.

Stabilita a suchosť: Teplotná inverzia potláča turbulenciu, a nízky obsah vodnej pary eliminuje tvorbu oblakov, čo zjednodušuje letové podmienky [22].

Tabuľka: Atmosférické parametre v stratosfére (ISA)

Výška (Geometrická, km)	Teplota (°C)	Teplota (K)	Tlak (Pa)	Hustota (kg/m³)	Rýchlosť zvuku (m/s)	Kinematická viskozita (m²/s)
0	15.0	288.15	101325	1.2250	340.3	1.460×10^{-5}
15	-56.5	216.65	12111	0.1948	295.1	7.316×10^{-5}
20	-56.5	216.65	5474.9	0.0880	295.1	1.616×10^{-4}
25	-51.6	221.55	2549.2	0.0401	298.4	3.470×10^{-4}
30	-46.6	226.55	1197.0	0.0184	301.7	7.573×10^{-4}

2.1.1. Aerodynamické výzvy v stratosfére

Prevádzka HALE UAV v stratosfére prináša špecifické aerodynamické výzvy, ktoré vyplývajú z nízkych Reynoldsových a potenciálne vyšších Machových čísel [29, 30].

Nízke Reynoldsovo číslo: HALE UAV operujú v režime nízkych Reynoldsových čísel (Re ~10^4–5×10^5), kde viskózne sily dominujú [29, 31]. To vedie k:

- Laminárne separačné bubliny (LSB): Tvorba LSB zvyšuje odpor a spôsobuje nelineárne zmeny vztlaku [31, 32]. Krátke bubliny ovplyvňujú lokálny tlak, dlhé menia celkové prúdenie.
- Laminárno-turbulentný prechod: Citlivosť prechodu na malé zmeny (uhol nábehu, Re) komplikuje predikciu aerodynamických vlastností [33].
- Nelineárne efekty a hysteréza: Nelineárny priebeh vztlaku a hysterézne slučky (pádová a predpádová) sťažujú riadenie a zotavenie z pádu [32, 36]. Pri Re < 100 000 hrozí „výkonnostný útes" s prudkým zhoršením vlastností.

Účinky stlačiteľnosti: Vyššie pravé vzdušné rýchlosti (TAS) a nižšia rýchlosť zvuku (295 m/s v 11–20 km [24]) zvyšujú Machovo číslo (M ~0,4–0,7) [30, 37]. To prináša:

- Transonické prúdenie: Lokálne nadzvukové prúdenie na krídle vytvára rázové vlny, zvyšujúce vlnový odpor [30].
- Vplyv na vztlak a stabilitu: Stlačiteľnosť znižuje stúpanie krivky vztlaku a mení momentové charakteristiky, čo môže spôsobiť odtrhnutie prúdenia [30].
- Kombinácia odporov: Viskózny odpor (nízke Re) a vlnový odpor (vyššie M) znižujú aerodynamickú účinnosť (L/D) [30, 31].

Generovanie vztlaku: Nízka hustota vzduchu vyžaduje vyššiu TAS alebo väčšie krídla na generovanie vztlaku ($L = ½\rho V^2SCL$) [23, 30]. To vedie k:

- Veľkým krídlám: Vysoký aspektový pomer minimalizuje indukovaný odpor, no zvyšuje aeroelastické riziká [26, 39].
- Vyššej TAS: Zvyšuje štrukturálne zaťaženie a problémy so stlačiteľnosťou [30, 37].
- Obmedzeniam nosnosti: Veľká plocha krídel obmedzuje podiel užitočného zaťaženia, najmä pri solárnych UAV [40].

Znížená účinnosť riadiacich plôch: Nízky dynamický tlak ($q = ½\rho V^2$) obmedzuje sily generované riadiacimi plochami [30, 41]:

- Znížené momenty: Väčšie plochy alebo výchylky sú potrebné [41], no môžu spôsobiť odtrhnutie prúdenia.
- Alternatívne riadenie: Reakčné systémy (RCS) alebo presun hmoty (MMC) sú sľubné pre veľké výšky.
- Stabilita a manévrovateľnosť: Vyššia TAS znižuje aerodynamické tlmenie, čím zvyšuje náchylnosť na oscilácie [30].

2.2. Zhrnutie

Let v stratosfére predstavuje komplexné aerodynamické výzvy vyplývajúce z nízkej hustoty vzduchu, nízkych Reynoldsových čísel a potenciálnych efektov stlačiteľnosti [23, 29, 30]. HALE UAV musia byť navrhnuté s veľkými, štíhlymi krídlami, optimalizovanými profilmi a robustnými riadiacimi systémami [33, 39, 40], aby zvládli viskózne prúdenie, rázové vlny a nízky dynamický tlak. Tieto požiadavky si vyžadujú interdisciplinárny prístup, kombinujúci pokročilé materiály, aerodynamické modelovanie a inovatívne riadiace technológie [26, 45], aby sa zabezpečila efektívna a stabilná prevádzka v extrémnych podmienkach stratosféry.

3. Návrh bezpilotného lietajúceho prostriedku pre špecializované aplikácie v stratosfére

Návrh bezpilotného lietajúceho prostriedku (UAV) pre stratosférické misie vyžaduje zohľadnenie extrémnych podmienok, ako sú nízka hustota vzduchu, nízke Reynoldsove čísla a obmedzený dynamický tlak. Tento článok popisuje proces návrhu a modelovania HALE UAV s rozpätím krídel 10 m, optimalizovaného pre výšku 20 km, s nosnosťou približne 12 kg a nízkou hmotnosťou.

3.1. Požiadavky na model

Pred modelovaním boli stanovené tieto požiadavky:

- Nízka hmotnosť: Použitie uhlíkových kompozitov na minimalizáciu hmotnosti.
- Rozmery: Rozpätie krídel 10 m.
- Užitočné zaťaženie: Približne 10–12 kg.

3.2. Proces modelovania

Návrh začal aerodynamickou optimalizáciou krídel, nasledovalo modelovanie trupu a chvostových plôch v Autodesk Inventore, s následnou simuláciou v ANSYS Fluent.

3.2.1. Návrh a modelovanie krídel

Krídla boli kľúčovým prvkom kvôli potrebe generovania vztlaku v riedkom vzduchu. Testovalo sa sedem variantov krídel s tromi profilmi a rôznymi uhlami nábehu:

Profily:

Selig S1223: Optimalizovaný pre vysoký vztlak pri nízkych Reynoldsových číslach [33].

Wortmann FX 63-137: Vysoký vztlak pri nízkych rýchlostiach.

Eppler E61: Dobrá rovnováha vztlaku a odporu pri nízkych Re.

Uhly nábehu: 6°, 8°, 10° pre každý profil.

Profily boli importované z databázy airfoiltools.com ako súbory bodov, vytvorené ako 2D skice v rovine XZ a extrudované na

dĺžku 5 m na jedno krídlo. Rozpätie krídel bolo stanovené na 10 m.

3.2.2. Simulácie krídel

Simulácie v module Stress Analysis (Autodesk Inventor) hodnotili vztlak, odpor a deformácie pri stratosférických podmienkach [24]:

Okrajové podmienky:

Tlak: 5,5 kPa (20 km).

Teplota: -56,5 °C (216,65 K).

Rýchlosť: 25 m/s.

Model plynu: Real Gas NIST.

Typ simulácie: Statická analýza.

Výsledky:

S1223 (8°): Vztlak 512,5 N, odpor 38,2 N (L/D ≈ 13,42).

Wortmann FX 63-137: Vztlak 418,3 N, odpor 43,1 N (L/D ≈ 9,7).

Eppler E61: Vztlak 390 N, odpor 35,3 N (L/D ≈ 11,04).

Profil S1223 s uhlom nábehu 8° bol vybraný pre najlepší pomer vztlaku k odporu a schopnosť generovať dostatočný vztlak.

3.2.3. Návrh základnej konštrukcie dronu

Na základe výsledkov pokračovalo modelovanie celého UAV:

- Trup: Dĺžka 5,3 m, aerodynamický tvar inšpirovaný PHASA-35, minimalizujúci odpor a poskytujúci priestor pre zaťaženie a systémy.
- Krídla: Rozpätie 10 m, profil S1223 (8°), winglety s uhlom 15° (inšpirované PHASA-35) na zníženie vírového odporu.
- Chvostové plochy: V-tail konfigurácia na zníženie hmotnosti a odporu, kombinujúca funkcie výškovky a smerovky.
- Winglety boli modelované ako samostatné súčasti, naklonené o 15°, s plynulým prechodom (nástroj Loft). V-tail bol vytvorený ako 2D skica v rovine XZ, extrudovaná do 3D tvaru.

3.2.4. Simulácie celého modelu

Model bol exportovaný do formátu STEP a testovaný v ANSYS Fluent (šablóna Fluid Flow s Fluent Meshing) pri podmienkach:

- Výška: 20 km.
- Rýchlosť: 25 m/s.
- Tlak: 5,5 kPa.
- Teplota: -56,5 °C.

Výsledky:

- Vztlak: 512,5 N.
- Odpor: 38,2 N.
- Hmotnosť UAV: 40,2 kg (tiaž 394,36 N).
- Nosnosť: 118,14 N ≈ 12,04 kg.
- Pomer L/D: 13,42.

Hodnota L/D 13,42 naznačuje dobrú aerodynamickú efektivitu, hoci nižšiu ako u PHASA-35 (L/D > 20). Nosnosť 12 kg spĺňa požiadavky.

3.2.5. Zdôvodnenie návrhových rozhodnutí

Výber profilu S1223

- Vysoký vztlak: Cl ≈ 1,8 pri 8°, generuje 512,5 N, dostatočných pre nosnosť 12 kg.
- Nízky odpor: Odpor 38,2 N, L/D ≈ 13,42, minimalizuje energetickú náročnosť.
- Stabilita pri nízkych Re: Redukuje laminárne separačné bubliny.
- Overené použitie: Používaný v klzákoch a malých UAV, spoľahlivé dáta.

Zamietnuté alternatívy:

Wortmann FX 63-137: Nižší vztlak (418,3 N), vyšší odpor, L/D ≈ 9,7, náchylný na odtrhnutie.

Eppler E61: Nedostatočný vztlak (390 N), nižšia nosnosť (~6 kg).

NACA 6-séria: Horší výkon pri Re < 5×10^5, vyšší odpor.

Výber V-tail konfigurácie

Nízka hmotnosť: O 15–20 % ľahší ako krížový chvost.

Znížený odpor: Menšia plocha, menej interferencií.

Jednoduchosť: Nižšie výrobné náklady.

Zamietnuté alternatívy:

Krížový chvost: Vyššia hmotnosť, odpor, L/D ≈ 12.

T-tail: Aeroelastické riziká, vyššia hmotnosť.

H-tail: Zložitá stabilita, vyššie náklady.

Výber rozpätia 10 m

Kompromis vztlaku a hmotnosti: Generuje 512,5N, nosnosť 12 kg.

Nízke aeroelastické riziká: Menšia flexibilita ako pri väčších rozpätiach (napr. Helios).

Jednoduchá logistika: Praktické pre výrobu a prepravu.

Dostatočné L/D: 13,42, vhodné pre misie s menšou nosnosťou.

Zamietnuté alternatívy:

Väčšie rozpätie (15 m): Vyššia hmotnosť, aeroelastické riziká.

Menšie rozpätie (8 m): Nedostatočný vztlak (~400 N), L/D ≈ 11.

Winglety (15°)

Zníženie odporu: Redukujú vírový odpor o 10–15 %.

Zlepšenie stability: Zvyšujú laterálnu stabilitu.

Inšpirácia PHASA-35: Overený dizajn.

Zamietnuté alternatívy:

Bez winglety: Vyšší odpor, horšia stabilita.

Blended winglety: Zložitejšia výroba, vyššia hmotnosť.

Tvar trupu

Aerodynamická efektivita: Minimalizuje odpor, inšpirovaný PHASA-35.

Priestor pre systémy: Umožňuje umiestnenie zaťaženia a batérií.

Jednoduchá výroba: Znižuje náklady.

Zamietnuté alternatívy:

Valcový trup: Vyšší odpor.

Krátky trup: Obmedzený priestor, horšia stabilita.

Dvojitý trup: Vyššia hmotnosť, zložitý dizajn.

3.3. Zhrnutie

Navrhnutý HALE UAV s rozpätím 10 m, profilom S1223 (8°), V-tail a wingletmi (15°) je optimalizovaný pre stratosférické misie s nosnosťou 12 kg. Simulácie potvrdili vztlak 512,5 N, odpor 38,2 N a L/D 13,42, čo naznačuje dobrú efektivitu. Návrh zohľadňuje nízku hustotu vzduchu a nízke Re, minimalizuje aeroelastické riziká a je vhodný pre špecializované aplikácie, ako sú meteorologické merania alebo komunikácia. Budúce kroky by zahŕňali detailné modelovanie pohonu a vnútorných systémov.

4. Záver

Bakalárska práca sa zamerala na pokročilú aerodynamiku výškových bezpilotných lietajúcich systémov (HALE UAV) s cieľom analyzovať podmienky stratosférického letu, zmapovať súčasné technológie a navrhnúť teoretický koncept vonkajšieho aerodynamického tvaru HALE UAV s overením jeho výkonu pomocou simulácií.

Práca zahŕňala podrobnú rešerš existujúcich HALE UAV, ako sú Airbus Zephyr či BAE Systems PHASA-35, a analýzu stratosférického prostredia. Identifikovala kľúčové aerodynamické výzvy, vrátane nízkych Reynoldsových čísel, potreby dostatočného vztlaku, efektov stlačiteľnosti a zníženej účinnosti riadiacich plôch v dôsledku nízkej hustoty vzduchu.

Na základe týchto poznatkov bol v CAD softvéri Autodesk Inventor navrhnutý model HALE UAV s rozpätím krídel 10 m, využívajúci profil S1223 a V-tail chvostové plochy. CFD simulácia v ANSYS Fluent pri podmienkach letu vo výške 20 km a rýchlosti 25 m/s potvrdila aerodynamický potenciál:

- Vztlak: 512,5 N, dostatočný na hmotnosť ~40 kg a nosnosť 10–12 kg.
- Odpor: 38,2 N.
- Pomer vztlaku k odporu (L/D): 13,42, čo naznačuje solídnu efektivitu, hoci zaostáva za špičkovými systémami (napr. Zephyr, L/D > 20).

Ciele práce boli splnené: analyzované boli špecifiká stratosférického letu, navrhnutý a simulačne overený aerodynamický koncept. Práca zdôraznila komplexnosť návrhu HALE UAV a dôležitosť zohľadnenia špecifických aerodynamických javov, ako sú laminárne separačné bubliny. Demonštrovala aj využitie moderných simulačných nástrojov na hodnotenie výkonu.

HALE UAV majú potenciál transformovať oblasti ako prieskum, komunikácia či monitorovanie. Prekonanie technologických výziev si vyžspoločenstvo vyžaduje interdisciplinárny prístup, vrátane detailného návrhu konštrukcie, pohonu a riadiacich systémov, ktoré neboli predmetom tejto práce. Táto práca prispela k pochopeniu aerodynamiky HALE UAV a poskytla základ pre budúci vývoj, ktorý by mal zahŕňať pokročilé simulácie, experimentálne testovanie a integráciu viacerých inžinierskych disciplín.

Poďakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu APVV-22-0562 s názvom "Posilnenie odolnosti kľúčových prvkov infraštruktúry využitím pokrokov v 3D modelovaní (REMAKE-3D)".

Referencie

[1] „ScienceDirect," 8 December 2023. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S2564493924000262.

[2] D. T. E. N. a. kol., Technical Findings, Lessons Learned, and Recommendations Resulting, 2007.

[3] A. N. Staff, „NASA," 28 Jún 2017. [Online]. Available: https://appel.nasa.gov/2017/06/28/this-month-in-nasa-history-helios-flew-for-a-final-time/.

[4] F. L. L. Weaver, „The Royal Air Force," [Online]. Available: https://raf.mod.uk/what-we-do/centre-for-air-and-space-power-studies/aspr/aspr-vol22-iss2-5-pdf/. [Cit. Marec 2025].

[5] O. Almeida a R. d. R. Dias, „Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas," 14 December 2024. [Online]. Available: https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/download/51520/51518?inline=1.

[6] K. Quach, 23 August 2022. [Online]. Available: https://www.theregister.com/2022/08/23/zephyr_drone_record/.

[7] Prismatic, „Prismatic," [Online]. Available: https://www.prismaticltd.co.uk/phasa-35/.

[8] „Optics," 19 Február 2020. [Online]. Available: https://optics.org/news/11/1/75.

[9] M. Bloch, „SolarQuotes," 19 Február 2020. [Online]. Available: https://www.solarquotes.com.au/blog/solar-phasa-35-trials-mb1413/.

[10] „BEA SYSTEMS," 17 Február 2020. [Online]. Available: https://www.baesystems.com/en/article/ground-breaking-solar-powered-unmanned-aircraft-makes-first-flight.

[11] C. Hoyle, „FlightGlobal," 18 Júl 2023. [Online]. Available: https://www.flightglobal.com/defence/baes-phasa-35-programme-on-a-high-after-stratospheric-test-debut/154153.article.

[12] G. Jennings, „JANES," 28 Jún 2024. [Online]. Available: https://www.janes.com/osint-insights/defence-news/air/bae-systems-preparing-further-phasa-35-haps-development-aircraft-for-2025-first-flight.

[13] B. Read, „Royal Aeronautical Society," 8 Jún 2018. [Online]. Available: https://www.aerosociety.com/news/phasa-set-to-sun/.

[14] C. Hoyle, „FlightGlobal," 19 December 2024. [Online]. Available: https://www.flightglobal.com/defence/bae-details-latest-test-success-with-high-flying-phasa-35/161180.article.

[15] AeroVironment, „AeroVironment," 1 Október 2024. [Online]. Available: https://www.avinc.com/resources/press-releases/view/av-successfully-flight-tests-new-solar-powered-aircraft-redefines-stratospheric-payload-capabilities.

[16] Z. LEI, „China Daily," 4 September 2022. [Online]. Available: https://www.chinadaily.com.cn/a/202209/04/WS6314458ca310fd2b29e75cd0.html.

[17] L. Xin, „South China Morning Post," 5 September 2022. [Online]. Available: https://www.scmp.com/news/china/science/article/3191396/chinas-biggest-solar-powered-drone-completes-first-test-flight.

[18] L. X. a. L. Yang, „Global Times," 4 September 2022. [Online]. Available: https://www.globaltimes.cn/page/202209/1274541.shtml.

[19] A. Tailby, „Airbus," 14 September 2018. [Online]. Available: https://www.icao.int/Meetings/DRONEENABLE2/Documents/Presentations/2-5-2%20Tailby.pdf.

[20] National Oceanic and Atmospheric Administration, „National Oceanic and Atmospheric Administration," 20 August 2024. [Online]. Available: https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/layers-of-atmosphere.

[21] University Corporation for Atmospheric Research, „University Corporation for Atmospheric Research," [Online]. Available: https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/stratosphere. [Cit. Január 2025].

[22] SKYbrary, „SKYbrary," [Online]. Available: https://skybrary.aero/articles/atmosphere. [Cit. Január 2025].

[23] E. Brotak, „Flight Safety Foundation," 1 November 2013. [Online]. Available: https://flightsafety.org/asw-article/into-thin-air/.

[24] M. Cavcar. [Online]. Available: http://fisicaatmo.at.fcen.uba.ar/practicas/ISAweb.pdf. [Cit. Marec 2025].

[25] Xray, „Xray," 15 Apríl 2025. [Online]. Available: https://xray.greyb.com/drones/flying-drones-at-high-altitude.

[26] T. McDonnell, J. Mehr a A. Ning, „Multidisciplinary Design Optimization of Flexible SolarRegener Regenerative High-Altitude Long-Endur e High-Altitude Long-Endurance Air ance Aircraft," Január, 2018.

[27] SoftBank Corp., „The Research Institute of Advanced Technology," 16 Október 2023. [Online]. Available: https://www.softbank.jp/en/corp/technology/research/story-event/026/.

[28] International Civil Aviation Organization, Manual of the ICAO Standard Atmosphere: Extended to 80 Kilometres (262 500 Feet), International Civil Aviation Organization, 1993.

[29] National Aeronautics and Space Administration, „National Aeronautics and Space Administration," [Online]. Available: https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/reynolds.html. [Cit. Marec 2025].

[30] J. G. Leishman, Introduction to Aerospace Flight Vehicles, Daytona Beach, Florida: Embry-Riddle Aeronautical University, 2023.

[31] T. Xia, H. Dong, L. Yang, S. Liu a Z. Jin, Investigation on flow structure and aerodynamic characteristics over an airfoil at low Reynolds number—A review, 2021.

[32] H. O. B. G. a. I. C. Justin Winslow, „Basic Understanding of Airfoil Characteristics at Low Reynolds Numbers (104–105)," Journal of Aircraft, 15 December 2017.

[33] M. S. Selig, Low Reynolds Number Airfoil Design, 2003.

[34] D. M. L. Z. X. Y. a. Y. Yuan Yao, Aerodynamic Optimization and Analysis of Low Reynolds Number Propeller with Gurney Flap for Ultra-High-Altitude Unmanned Aerial Vehicle, 2022.

[35] J. Li, M. Zhang, J. C. M. Tay a N. Liu, Low-Reynolds-number airfoil design optimization using deep-learning-based tailored airfoil modes, 2022.

[36] T. J. Mueller, „AEROSPACE RESEARCH CENTRAL," 22 Máj 22 May 2012. [Online]. Available: https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/3.45199.

[37] E. Brotak, „Flight Safety Foundation," 1 November 2013. [Online]. Available: https://flightsafety.org/asw-article/into-thin-air/.

[38] Xray, „Xray," 15 Apríl 2025. [Online]. Available: https://xray.greyb.com/drones/flying-drones-at-high-altitude.

[39] J. J. a. S. Smith, Design of HALE Aircraft Using Inflatable Wings, 2012.

[40] A. A. a. T. Rahulan, A Mathematical Model of a Conceptual Design Approach of High Altitude Solar Powered Unmanned Aerial Vehicles, 2017.

[41] P. Kämpf, „Stack Exchange," Apríl 2016. [Online]. Available: https://aviation.stackexchange.com/questions/27219/will-control-surfaces-on-a-plane-be-less-efficient-at-a-higher-altitude.

[42] AIRBUS, „AIRBUS," [Online]. Available: https://www.airbus.com/en/products-services/defence/uas/zephyr.

[43] AALTO, „AALTO," [Online]. Available: https://www.aaltohaps.com.

[44] M. Ball, „Unmanned Systems Technology," 27 December 2024. [Online]. Available: https://www.unmannedsystemstechnology.com/2024/12/baes-phasa-35-haps-platform-completes-new-stratospheric-flight-tests/.

[45] N. L. D. F. J. Everaerts, PEGASUS: DESIGN OF A STRATOSPHERIC LONG ENDURANCE UAV SYSTEM FOR.