



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

VLIV HMOTNOSTI CESTUJÍCÍCH NA CENTRÁŽ LETOUNU

THE EFFECT OF PASSENGER WEIGHT ON THE CENTER OF GRAVITY OF THE AIRCRAFT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

RADEK LUDVA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV JURAČKA, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Radek Ludva**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv hmotnosti cestujících na centráž letounu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Korejské a Novozélandské aerolinie zavádějí dobrovolné vážení cestujících, aby mohly korigovat výpočty hmotnosti a centráže dopravního letounu. Problém je dán definovanou průměrnou hmotností mužů, žen a dětí leteckými předpisy, které již nebyly řadu let aktualizovány. Snahou je stanovit diferenci, kterou způsobuje použití původních výpočtů (loadsheetů) oproti realitě.

Cíle bakalářské práce:

V rámci práce prostudujte dostupné podklady a zpracujte postup výpočtu centráže dopravního letounu B737 klasickou metodou. Dále pak s ohledem na možné odchylky hmotnosti cestujících a obsazení letounu stanovte potenciální odchylky v poloze centráže letounu.

Seznam doporučené literatury:

Daněk, V., Mechanika letu I

Oxford Aviation Academy, ATPL ground Training series, Flight Performance & Planning I, 2018

Aviation Exam, JAA/EASA-FCL, 031 Mass & Balance, 2013

Boeing, Internetové podklady výrobce

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá výpočtem hmotnosti a centráže dopravního letounu Boeing 737-800 pomocí běžně používaných metod, konkrétně numerické a grafické. Důraz je kladen na přesnost vstupních údajů, zejména hmotnosti cestujících a zavazadel, které bývají často odvozeny ze standardizovaných hodnot. Práce analyzuje možné odchylky těchto údajů a jejich vliv na výslednou centráž.

Součástí je také srovnání výpočtů s reálnými statistickými daty a návrhy na zpřesnění inspirované praxí některých leteckých společností, které zavádějí dobrovolné vážení cestujících. Výsledky slouží jako podklad pro posouzení rozdílu mezi teoretickým výpočtem a skutečným zatížením letounu a upozorňují na možné dopady zastaralých standardních hodnot na bezpečnost leteckého provozu.

Klíčová slova

Hmotnost a vyvážení letounu, centráž, standardní hmotnosti, hmotnost cestujících, Boeing 737-800, odchylky hmotnosti, loadsheet

Summary

This bachelor's thesis focuses on calculating the weight and center of gravity (CG) of a Boeing 737-800 aircraft using commonly applied methods, specifically numerical and graphical approaches. Emphasis is placed on the accuracy of input data, particularly passenger and baggage weights, which are often based on standardized average values. The thesis analyzes potential deviations from these values and their impact on the calculated CG position.

It also compares standard calculations with real statistical data and proposes improvements inspired by the practice of some airlines, such as voluntary passenger weighing. The results serve as a basis for assessing the gap between theoretical calculations and actual aircraft loading, highlighting the safety implications of outdated standardized weight values.

Keywords

Aircraft weight and balance, center of gravity, standardized weights, passenger weight, Boeing 737-800, weight deviations, loadsheet

Bibliografická citace

LUDVA, Radek. *Vliv hmotnosti cestujících na centráž letounu*. Brno, 2025. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Jaroslav Juračka.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vliv hmotnosti na centráž letounu vypracoval samostatně a s použitím uvedených zdrojů a literatury, které jsou uvedeny v seznamu.

Radek Ludva

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Jaroslavu Juračkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a laskavý přístup. Zároveň děkuji svým bývalým vedoucím a kolegům z Letiště Brno za získání motivace a zkušeností v tomto oboru.

Radek Ludva

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 11 |
| 1 Základní pojmy a teorie | 12 |
| 1.1 Letové vlastnosti | 12 |
| 1.2 Základní síly působící na letoun | 12 |
| 1.3 Těžiště | 12 |
| 1.4 Důležité dokumenty | 14 |
| 1.5 Hmotnostní terminologie | 16 |
| 1.6 Boeing 737-800 | 18 |
| 2 Výpočet hmotnosti a vyvážení Boeingu 737-800 | 20 |
| 2.1 Princip stanovení hmotnosti a vyvážení letadla | 20 |
| 2.2 Elektronický výpočet hmotnosti a vyvážení | 21 |
| 2.2.1 Vstupní hodnoty | 21 |
| 2.2.2 Provozní prázdná hmotnost a index letounu | 22 |
| 2.2.3 Cestující a náklad | 23 |
| 2.2.4 Palivo | 25 |
| 2.2.5 Let a přistání | 28 |
| 2.2.6 Kontrola výsledků | 30 |
| 2.3 Princip grafické metody | 31 |
| 2.3.1 Grafické znázornění vyvažovací obálky | 33 |
| 2.3.2 Úvodní informace a údaje | 33 |
| 2.3.3 Cestující, náklad a dovolená dopravní zátěž | 34 |
| 2.3.4 Výsledné výpočty hmotností | 34 |
| 2.3.5 Grafické určení indexu a %MAC | 35 |
| 2.4 Porovnání numerické a grafické metody | 37 |
| 3 Obsazenost letu a rozmístění hmotnosti | 38 |
| 3.1 Obsazenost a rozmístění cestujících | 38 |
| 3.2 Vliv rozmístění zavazadel | 38 |
| 3.3 Případy rozložení hmotnosti | 39 |
| 3.3.1 Extrémní případy | 39 |
| 3.3.2 Kompenzace momentu | 40 |
| 3.4 Převrácení letadla na zemi (Tipping) | 41 |
| 4 Tabulkové hodnoty | 43 |
| 4.1 Hmotnost posádky | 43 |
| 4.2 Hmotnost cestujících a zavazadel | 43 |
| 4.2.1 Postup pro stanovení standardních hmotnostních hodnot pro cestující | 43 |
| 4.2.2 Standardní hmotnost zavazadel | 44 |
| 4.2.3 Statistické vyhodnocení údajů o cestujících a zavazadlech | 44 |
| 4.3 Průzkum | 45 |

| | |
|---|-----------|
| 5 Faktory a odchylky hmotnosti | 47 |
| 5.1 Vliv druhu letu | 47 |
| 5.2 Změna v průměrné hmotnosti populace | 48 |
| 5.3 Geografie a etnický vliv | 49 |
| 5.4 Sezónní a pohlavní rozdíly | 50 |
| 5.5 Zavazadla | 50 |
| 5.6 Dopad na polohu centráže | 51 |
| Závěr | 52 |
| Seznam použitých zdrojů | 54 |
| Seznam použitých zkratk a symbolů | 56 |

Úvod

Hmotnost a vyvážení letounu jsou nezbytnou součástí každé předletové přípravy pro provedení bezpečného letu. Od počátku letectví je kladen důraz na přesnost těchto hodnot a tím i na bezpečnost leteckého provozu. U velkých dopravních letadel je vyhotovení dokumentu o hmotnosti a vyvážení a jeho potvrzení kapitánem letounu povinností před zahájením každého letu.

Většina parametrů potřebných k výpočtu centráže lze přesně měřit jako například hmotnost samotného letounu, paliva či nákladu. Vliv hmotnosti cestujících na polohu centráže však patří k údajům s nejnižší přesností, protože se ve většině případů vychází ze standardizovaných průměrných hodnot hmotností. Tyto standardizované průměrné hmotnosti jsou definovány leteckými předpisy, například směrnici Evropské agentury pro bezpečnost letectví (EASA). V této oblasti ale mohou četné odchylky a faktory potenciálně omezovat přesnost standardizovaných hodnot.

Statistiky ukazují, že průměrná tělesná hmotnost populace se postupně zvyšuje, což s sebou přináší potenciální rizika pro přesnost výpočtu centráže. Nepřesnosti v standardizovaných hodnotách mohou způsobit odchylky, které ovlivní výkon letounu, spotřebu paliva i bezpečnost letu. Některé letecké společnosti, jako například Korean Air nebo Air New Zealand, se proto rozhodly zkoumat alternativní přístup a zavedly dobrovolné vážení cestujících s cílem zvýšit přesnost těchto údajů a zpřesnit výpočty centráže letounu.

Cílem bakalářské práce je zpracování postupu výpočtu centráže běžně používanými metodami. Výpočty budou zpracovány pro jedno z nejrozšířenějších dopravních letadel Boeing 737-800. Dále pak definování možných faktorů ovlivňujících hmotnost cestujících a zavazadel a stanovení potenciálních odchylek v poloze centráže.

První část bakalářské práce je zaměřena na pochopení této tematiky. Pro pochopení problematiky hmotnosti a vyvážení letadel je nutné znát nejen základní fyzikální souvislosti, ale hlavně pochopit mechaniku letu. Toto téma s sebou také nese řadu terminologických pojmů vycházejících z jazyka používaného v letectví, tedy z angličtiny.

Další část se zaměřuje na výpočty dvěma běžně používanými metodami určování hmotnosti a vyvážení letounu Boeing 737-800. První z nich je modernější numerická metoda, k jejímuž výpočtu se využívá výpočetní technika. Druhá metoda je starší grafická metoda určení centráže letounu.

Dále práce popisuje statistické určení standardizovaných hodnot hmotnosti cestujících a zavazadel. V rámci této části byl proveden průzkum porovnávací zjištěné hodnoty se standardizovanými údaji.

Bakalářská práce se také zaměřuje na vliv obsazenosti a rozložení zatížení na palubě na centráž letounu. Poslední část se věnuje stanovení a rozdělení možných odchylek a faktorů ovlivňujících hmotnost cestujících a zavazadel a jejich dopad na centráž.

1 Základní pojmy a teorie

Pro pochopení problematiky hmotnosti a vyvážení letounu je nutné znát základní pojmy. Hmotnost letounu a poloha jeho těžiště patří mezi hlavní aspekty ovlivňující stabilitu, ovladatelnost a celkovou letovou způsobilost stroje. Nesprávné rozložení hmotnosti může vést ke zhoršené manévrovatelnosti, zvýšené spotřebě paliva a v extrémních případech i k ohrožení bezpečnosti letu.

1.1 Letové vlastnosti

Daněk[1] ve své publikaci popisuje letové vlastnosti jako souhrn vlastností určujících chování letadel za provozu, které se posuzují dle snadnosti, jednoduchosti a příjemnosti pilotáže. Protože se však tyto pojmy těžko kvantifikují, zavádíme pojmy stabilita a říditelnost v různých režimech letu. Stabilita nám popisuje úplné pohyby letadla jako tělesa v prostoru, jeho pohyby kolem těžiště a schopnost letounu zachovávat daný režim letu. Říditelnost je naopak možnost měnit režim letu dle vůle pilota. V rámci hmotnosti a vyvážení letadla je důležitá jak stabilita tak i říditelnost.

1.2 Základní síly působící na letoun

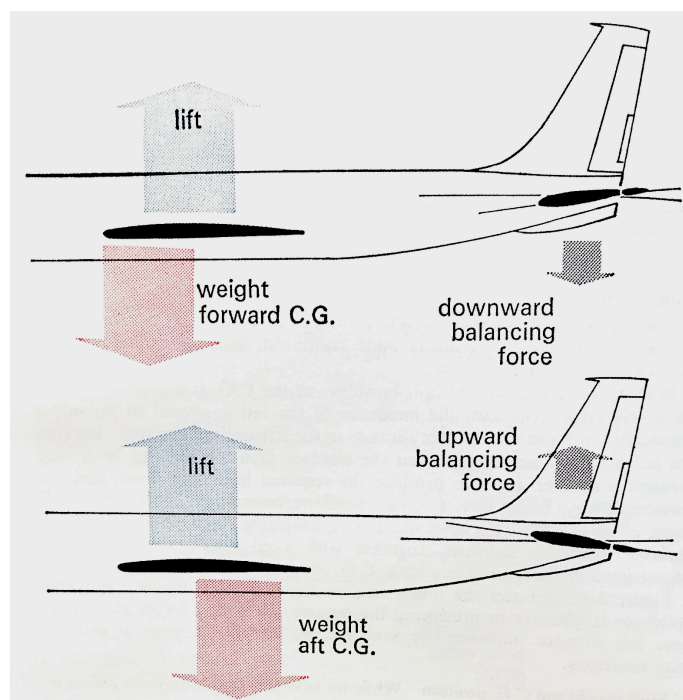
Základní poznatky fyziky nám ukazují, že na letadlo během letu působí čtyři základní aerodynamické síly: vztlak, odpor, tah a gravitace. Vztlak je generován křídly a působí směrem vzhůru, zatímco gravitační síla, reprezentovaná hmotností letadla, směřuje dolů k zemi. Tah, který je vytvářen motory, zajišťuje pohyb vpřed, zatímco odpor je síla působící proti směru pohybu a vzniká v důsledku tření vzduchu o povrch letounu a jeho tvarového odporu.

Podélná statická stabilita

Vztlak a gravitace však nepůsobí ve stejném bodě letadla. Vztlak je generován podél celého rozpětí křídel, zatímco tíha letounu je soustředěna v jeho těžišti. Tento nesoulad mezi působištem vztlaku a těžištěm letounu vytváří klopivý moment, který může způsobit nežádoucí změny v podélné stabilitě a ovladatelnosti letadla. Aby bylo možné tento moment vyrovnat a zajistit stabilní let, jsou na ocasních plochách letadla umístěny vodorovné ocasní plochy s pohyblivými stabilizačními a řídicími prvky (výškové kormidlo a stabilizátor)[2].

1.3 Těžiště

Těžiště je definováno jako myšlený bod, ve kterém na letoun působí gravitační síla rovná součinu celkové hmotnosti letounu a gravitačního zrychlení[4]. Těžiště však není fixním bodem, během letu se mění v závislosti na spotřebě paliva, ale i vlivem pohybu posádky a cestujících v letadle. Právě proto je důležité, aby tato změna zůstala v určitých mezích polohy těžiště, které jsou definovány ve vztahu k podélné ose letadla vzhledem ke střední aerodynamické těživě. Limity těchto hodnot jsou napsané v letové příručce.



Obrázek 1: Vliv klopivého momentu na letoun[3]

Jak uvádí Chmelík ve své publikaci[4] v závislosti na poloze těžiště vůči neutrálnímu bodu hovoříme o přední nebo zadní centrāži. Při posunu těžiště směrem dopředu (přední centrāž) se zvyšuje stabilita letounu, protože horizontální stabilizátor musí vyvíjet větší záporný vztlak. To vede ke zhoršené ovladatelnosti, zejména při nízkých rychlostech, kdy nemusí být výškové kormidlo schopné vyvinout dostatečnou sílu pro nadzdvihnutí přídě letounu. Důsledkem je prodloužení vzletové dráhy, vyšší rychlost odpoutání a snížení celkové výkonnosti letounu.

Naopak při posunu těžiště směrem dozadu (zadní centrāž) klesá stabilita, avšak zvyšuje se ovladatelnost – letoun reaguje na zásahy do řízení citlivěji a s menšími výchylkami řídicích ploch. To snižuje aerodynamický odpor a zlepšuje výkonnost. Nicméně v krajních případech, pokud je těžiště příliš blízko, nebo dokonce za zadní limitní hodnotou, může dojít k výraznému zhoršení bezpečnosti letu. V takové situaci hrozí ztráta podélné stability a neschopnost vyvést letoun z přetažení, což může vést k nehodě.

Regulace týkající se hmotnosti a vyvážení letounu jsou stanoveny v ICAO Annex 6, z něhož vychází český předpis L-6 a také evropský EASA AIR OPS.

Vztažná rovina

Vztažná rovina (datum) je referenční rovina nebo bod, ke kterému se vztahují momenty jednotlivých momentů. Volba polohy této roviny není vázaná k poloze těžiště, může tedy ležet kdekoli v podélné ose letadla [4].

Moment

Velikost momentu je dána součinem zatížení a jeho vzdáleností od vztažné roviny, tedy momentovým ramenem. Velikost výsledného momentu je pak součtem všech momentů.

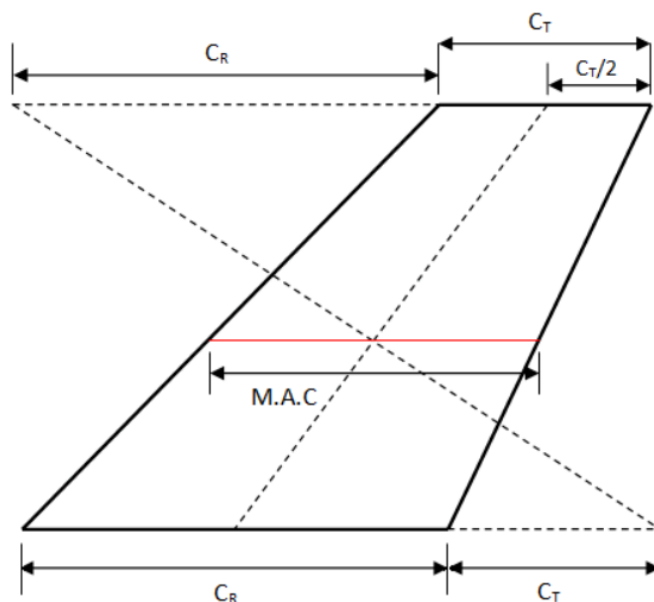
Index

Velikost momentu dosahuje relativně vysokých hodnot, proto se zavádějí momentové indexy. Jedná se o bezrozměrné číslo, které vyjadřuje moment, jenž je daným korekčním činitelem snižen do menších hodnot. Znaménko plus a mínus nám pak udává směr od vztážené roviny.

Střední aerodynamická tětíva

Střední aerodynamická tětíva křídla (SAT, MAC) je definována jako hloubka ekvivalentního obdelníkového křídla se stejnou vztáznou plochou a se stejnými aerodynamickými vlastnostmi [1]. Tento pojem zjednodušuje vyjádření momentových účinků působících na křídlo. Střední aerodynamická tětíva slouží jako referenční prvek při analýze stability a říditelnosti letounu, přičemž její poloha je určena vzdáleností od náběžné hrany kořenné tětívy viz obr. 2. Tento pojem nás pak provází celým výpočtem momentu a stanovením polohy těžiště letounu.

Pojmem centráž pak nazýváme polohu těžiště v procentuální závislosti na MAC. Centráž se tedy musí vždy nacházet uvnitř povoleného rozmezí tak, aby nebylo překročeno [4].



Obrázek 2: Grafické znázornění střední aerodynamické tětívy [5]

1.4 Důležité dokumenty

Dokument o hmotnosti a vyvážení

„Loadsheets“ je nejdůležitějším dokumentem připravovaným pro každý let ve vztahu k hmotnosti a vyvážení viz obrázek 3. Obsahuje podrobné údaje o rozložení a celkové hmotnosti letadla, cestujících, nákladu, paliva na palubě a dalších. Je výsledkem výpočtu hmotnosti a vyvážení letadla a zajišťuje, že je letadlo naloženo v rámci bezpečných limitů těžiště. Tento dokument může být vytvořen buď posádkou letadla, specializovaným pracovištěm provozovatele (load control nebo stowing), nebo handlingovou organizací na

letišti. Je však nezbytné, aby jedna kopie tohoto dokumentu, potvrzená kapitánem letu, byla k dispozici na zemi.

```

*** ONLY FOR DEMO PURPOSES *** NO LOADSHEET APPROVED ***

L O A D S H E E T                CHECKED                APPROVED                EDNO
ALL WEIGHTS IN KG                1755.2/13.3/1742      152.0/152.0/152.0      01
FUTURA B-737-800
DATABASE FEB/08

FROM/TO  FLIGHT      A/C-REG   VERSION   CREW    DATE      TIME
PMI-ORY  FH123T      ECJDU     Y189      2/04    29MAR08   1920

                                WEIGHT DISTRIBUTION
LOAD IN COMPARTMENTS           1755 2/13.3/1742
BAGGAGE PIECES IN HOLDS       2/1.3/134

PASSENGER                      10650 60/70/22/1   TTL 152 + 1
                                Y152                                CAB
TOTAL TRAFFIC LOAD            12405
DRY OPERATING WEIGHT          43672 GRP: COD 6 - WATER : 75 %
ZERO FUEL WEIGHT ACTUAL       56077 MAX 62731  ADJ
TAKE OFF FUEL                  7600
TAKE OFF WEIGHT ACTUAL        63677 MAX 79015  ADJ
TRIP FUEL                      4500
LANDING WEIGHT ACTUAL          59177 MAX 65317 L ADJ

BALANCE AND SEATING CONDITIONS                LAST MINUTE CHANGES
DOI      48.22   DLI      58.58   DEST   SPEC   CL/CPT  + - WEIGHT
LIZFW    51.95   MACZFW   22.81
LITOW    60.45   MACTOW   25.48
LILAW    52.39   MACLAW   22.83

STAB TO 4.76 ( FLAPS 1 & 5 )
STAB TO 3.71 ( FLAPS 10, 15 & 25 )

* TRIM BY CABIN AREA
A40.B42.C36.D34

UNDERLOAD BEFORE L.M.C.    6140                LMC TOTAL + -
-----
LOADMESSAGE AND CAPTAINS INFORMATION BEFORE L.M.C.
FH123T/29.ECJDU.B738.Y189.2/04
-ORY.60/70/22/1.T1755.2/13.3/1742.PAX/152.PRF/2.DHC/0.B135/1755
.DAA0.C0.M0.E0.AVIH/2/13

* LIZFW LIMITS : 16.05 / 69.73 - MACZFW LIMITS : 8.43 / 29.93 - Now 22.81
* LITOW LIMITS : 14.68 / 75.89 - MACTOW LIMITS : 9.33 / 30.92 - Now 25.48

* STANDARD WEIGHTS USED FOR PAX : 76 / 76 / 35 / 0
* STANDARD WEIGHT USED FOR BAGS : 11

* NOTOC YES / NO

SI : EET 0135 - 01 UM

LOADSHEET CHECKED BY THE AUTHORISED GROUND-HANDLING AGENT :

```

Obrázek 3: Dokument o hmotnosti a vyvážení

Nakládací instrukce

Je dokument zajišťující přesný popis rozložení nákladu. Vyhotovuje ho stejná osoba, nebo oddělení jako „loadsheets“. Po správné nakládce letounu podle nakládacích instrukcí se na jeho základě vyhotovuje „loadsheets“.

Seznam cestujících

Seznam cestujících obsahuje informace o osobách na palubě. Tento dokument není nutný v případě, že je dostatečná informace o cestujících na „loadsheets“u. Tento dokument je však nezbytný pro evidenci cestujících, celní a imigrační kontroly a v případě nouzové situace umožňuje rychlou identifikaci osob na palubě.

NOTOC

NOTOC (Notification to captain) je dokument určený pro kapitána letu, který ho informuje o přítomnosti nebezpečného zboží (Dangerous Goods, DG), nebo jiných neobvyklostí na palubě letadla. Obsahuje podrobné informace o druhu přepravovaného nebezpečného nákladu, jeho umístění v letadle, množství a příslušná bezpečnostní opatření[6].

Tento dokument nemá přímý vliv na vyvážení letounu. Avšak nebezpečné zboží může mít specifické požadavky na umístění v letadle (například kvůli omezením spojeným s požární bezpečností nebo radioaktivním materiálem). NOTOC tedy může ovlivnit nakládací instrukce a následně i „loadsheets“[6].

1.5 Hmotnostní terminologie

V rámci správného zjišťování hmotností a vyvážení vznikla terminologie rozdělující hmotnosti a množství paliva viz obrázek 4. Tyto hodnoty se běžně vyjadřují v kilogramech, případně v librách.

Rozdíl mezi hmotností (mass) a váhou (weight)

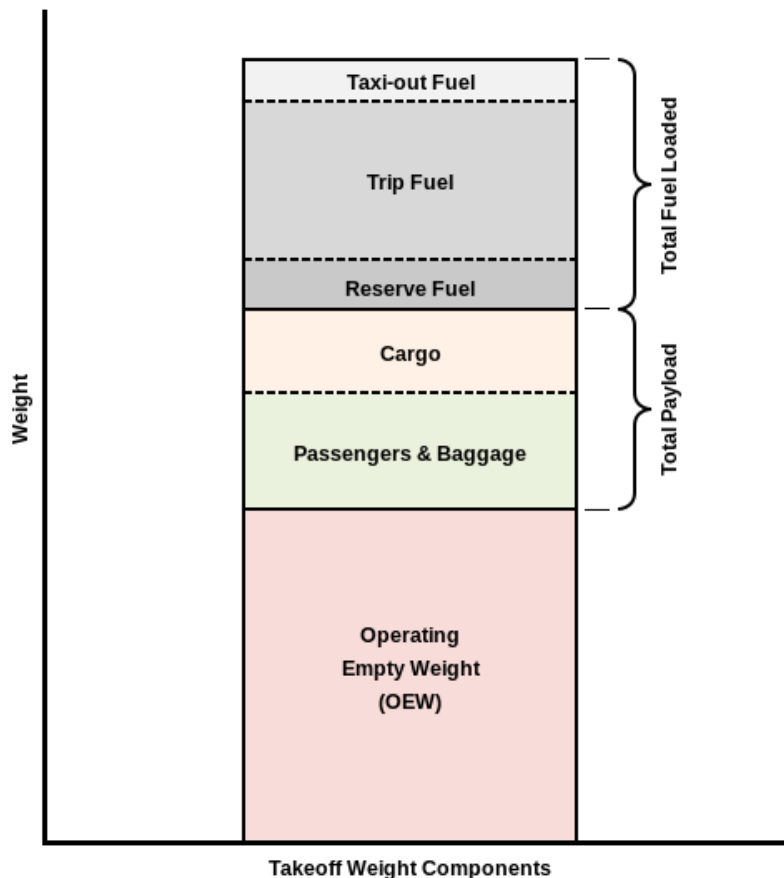
Z fyzikálního hlediska je hmotnost (mass) množství hmoty, nemění se s polohou a měří se v kilogramech (kg). Váha (weight) je síla způsobená gravitačním zrychlením a udává se v newtonech (N). Váha se tedy může lišit například v závislosti na nadmořské výšce nebo při působení jiných sil.

V letectví se ale oba termíny často zaměňují. Dle ICAO se jako standardizovaná jednotka používá hmotnost (mass) v kilogramech (kg), ale termín „weight“ je v praxi tolerován. Zaměnitelnost těchto termínů nezpůsobuje v každodenním odbavení letadel problémy, proto se jejich zaměnitelnost akceptuje. Z tohoto důvodu se podle EASA i ICAO oba výrazy „mass“ a „weight“ vyjadřují pomocí jednotky kilogram (případně libry) a vyjadřují stejné hodnoty[7].

Prázdná hmotnost

Při výpočtech hmotnosti a vyvážení je první potřebnou hodnotou prázdná hmotnost letounu. Prázdná hmotnost (Empty Weight) je hmotnost samotného letounu, tak jak byl dodán výrobcem, doplněná o nutné a doplňkové vybavení provozovatele (například rozšířené vybavení kuchyněk, rozšířené vybavení avioniky, atd.)[4]. Prázdná hmotnost a její odpovídající poloha těžiště jsou důležitými hodnotami, která se zjišťuje ihned po finální

kompletaci u výrobce. Provádět opravy prázdné hmotnosti a polohy těžiště je nutné i při jakýchkoliv opravách a modifikacích. Tento údaj je zapsán v letecké příručce letadla. Letecká společnost vlastníci několik stejných letadel ve stejné konfiguraci může také mít jednotnou hmotnost pro celou flotilu.



Obrázek 4: Hmotnostní terminologie[8]

Pohotovostní prázdná hmotnost bez paliva

Pohotovostní hmotnost bez paliva (Dry Operating Weight – DOW) je hmotnost letounu bez paliva a přepravovaného nákladu. K prázdné hmotnosti letounu je tedy přičtena hmotnost posádky letu, hmotnost náplně toalet, cateringu a nutného vybavení pro let (záchranné vesty, lékárničky, atd.). Tato hodnota a jí odpovídající poloha těžiště (Dry operating index - DOI) se používají jako hlavní vstup pro samotné provozní výpočty těžiště[4]. Některé letecké společnosti také používají termín Operační hmotnost (Operating weight), Tato hmotnost představuje DOW, ke které je přičteno celkové množství paliva při vzletu[9].

Hmotnost bez paliva

Hmotnost bez paliva (Zero Fuel Weight - ZFW) je termín používaný se k vyjádření hmotnosti DOW zvýšené o hmotnost přepravovaného zatížení (cestující, zavazadla, pošta a další náklad). Tato hmotnost má své maximální omezení, tzv. Maximum Zero Fuel

Weight, z důvodu přetížení konstrukce letounu přepravovaným nákladem a zabránění konstrukčním porušením[10].

Hmotnost před zahájením pojíždění

Hmotnost před zahájením pojíždění (Ramp weight) je hmotnost letadla těsně před začátkem pojíždění. Tato hmotnost zahrnuje hmotnost bez paliva (ZFW), plus celkové množství paliva (Block fuel). Taxi Weight má konstrukční limit, který nesmí být překročen, označovaný jako Maximum Taxi weight (MTW). Tento limit je určen konstrukcí letadla, především omezením nosnosti podvozku a křídel. Množství celkového paliva je také omezeno velikostí palivových nádrží[4].

Celková hmotnost paliva (Block fuel) je množství paliva potřebné pro daný let, ale také palivo spotřebované při spouštění motorů a pojíždění, ale také rezervní palivo. Více bude popsáno v kapitole 2.2.4.

Vzletová hmotnost

Vzletová hmotnost (Take-Off Weight - TOW) je pak celková hmotnost letadla těsně před vzletem. Tedy hmotnost snížena o palivo, které bylo spotřebováno během pojíždění, spouštění motorů a případného čekání na vzlet včetně klimatizace, vytápění kabiny a dalších funkcí palubních systémů. Palivo pro vzlet (Take off fuel) pak vyjadřuje množství paliva v této fázi.

Maximální vzletová hmotnost (Maximal Take-off weight – MTOW) je nejvyšší hmotnost, při které může letadlo vzlétnout.

Přistávací hmotnost

Přistávací hmotnost (Landing weight) je hmotnost snižena o spotřebované palivo za letu (Trip fuel). Tato hmotnost má také své limity. Jedná se především o pevnostní omezení konstrukce, ale také výkonová omezení přistávací hmotnosti. Ta je dána několika faktory: délkou, sklonem a stavem dráhy, meteorologickými podmínkami a dalšími.

Palivo pro let (Trip fuel) je vypočítané množství paliva spotřebované během letu na základě trasy, výšky, počasí.

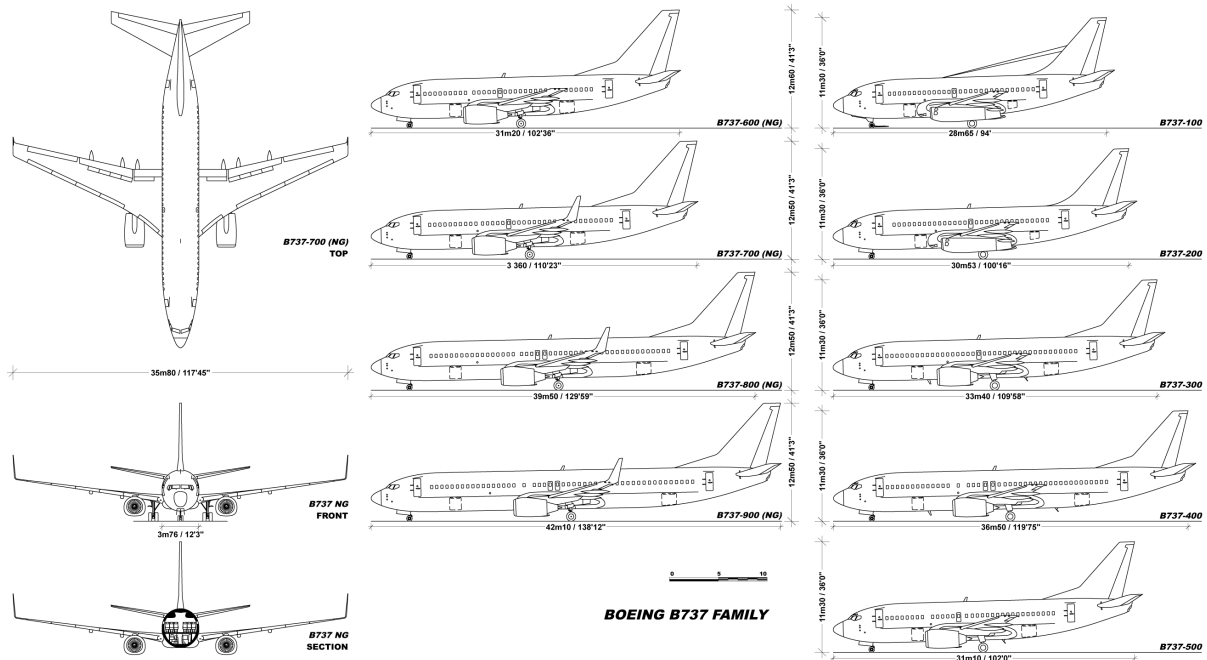
Taxi fuel je množství paliva určené pro pojíždění letadla na letišti před vzletem. Letecké společnosti obvykle stanovují hodnotu paliva pro pojíždění na základě průměrné spotřeby motorů při nízkém tahu a předpokládané doby pojíždění.

1.6 Boeing 737-800

Boeing 737-800 je jedním z nejrozšířenějších modelů středně velkých dopravních letadel. Letoun typu B737 s více než 10 000 vyrobenými kusy tvoří jednu z nejúspěšnějších sérií komerčních letounů vůbec[11]. Tento úzkotrupý letoun je navržen pro krátké až středně dlouhé tratě a vyniká kombinací provozní efektivity, spolehlivosti a relativně vysoké kapacity až 189 cestujících. Využívají jej například společnosti Ryanair, Lufthansa nebo Smartwings na frekventovaných evropských trasách. [12].

Vývoj typu 737 začal v 60. letech v reakci na rostoucí poptávku po menších proudových letounech pro vnitrostátní a regionální lety. První verze, 737-100, vstoupila do služby v roce 1968 u Lufthansy [11]. Následně byla řada rozšířena o modely Classic (737-300/400/500). V roce 1997 byla představena generace Next Generation (NG), kam

spadá právě i model 737-800. Tato verze přinesla nové motory CFM56-7BE, modernizovanou avioniku a prodloužený trup s vyšší přepravní kapacitou. Z hlediska technických parametrů má Boeing 737-800 rozpětí křídel 35,8 metru a délku trupu 39,5 metru. Maximální dolet činí přibližně 5 665 km[12].



Obrázek 5: Přehled verzí Boeingu 737[13]

2 Výpočet hmotnosti a vyvážení Boeingu 737-800

Následující kapitola se věnuje praktickému výpočtu hmotnosti a vyvážení komerčního letounu Boeing 737-800. Představuje standardní postup používaný k sestavování loadsheetu a poskytuje tak přehled metodiky výpočtu hmotnosti a vyvážení. Z teoretického principu vycházejí dvě základní metody výpočtu.

2.1 Princip stanovení hmotnosti a vyvážení letadla

Základním principem určení centráže letounu je princip momentové rovnováhy, tedy jednoduchého fyzikálního stroje. Z fyziky víme, že páka je v rovnováze tehdy, když je výsledný moment sil vzhledem k jejímu otočnému bodu nulový. Podobně se při určování centráže letounu počítá těžiště jako místo, kde se vyrovnávají momenty hmot jednotlivých částí letounu vůči zvolené vztažné rovině.

$$CG = \frac{\sum(W_i \cdot Sta_i)}{\sum W_i}, \quad (2.1)$$

kde CG je hledaná poloha těžiště od vztažné roviny, W_i je hmotnost daného zatížení a Sta_i určuje vzdálenost působíště zatížení od vztažného bodu[4].

Jak je uvedeno v předchozí kapitole, letecké společnosti používají k vyjádření momentu bezrozměrné číslo indexu. Jeho výpočet je dán výrobcem nebo operátorem letadla a je dán vztahem[4]:

$$Index = \frac{W \cdot (Sta. - Ref.Sta.)}{C} + K, \quad (2.2)$$

kde W je hmotnost zatížení, $Sta.$ určuje vzdálenost působíště zatížení od vztažného bodu, $Ref.Sta.$ je vztažná rovina, K je uměle vytvořená konstanta použitá k eliminaci záporných hodnot indexu stejně jako C , což je konstanta použitá jako jmenovatel k převodu momentových hodnot na indexové hodnoty[9].

Pro vyjádření polohy těžiště je nejvýhodnější určení v % délky střední aerodynamické tětiny (%MAC). Pro přepočítání polohy těžiště na %MAC je pak jednodušší, je-li počátek střední aerodynamické tětiny vztažen k referenční rovině. Tento výpočet je opět dán výrobcem letadla a vychází z dokumentu AHM (Airport Handling Manual):

$$\%MAC = \frac{\left(\frac{C \cdot (Index - K)}{W}\right) + Ref.Sta. - LEMAC}{\frac{MAC}{100}} \quad (2.3)$$

%MAC je hledanou procentuální délkou střední aerodynamické tětiny a $LEMAC$ určuje horizontální vzdálenost v palcích, nebo metrech od referenčního bodu k náběžné hraně střední aerodynamické tětiny[9].

Tyto výpočty jsou specifikované jak v provozních dokumentech výrobce letounu, tak v interních dokumentech letecké společnosti. K těmto výpočtům jsou také vyjádřeny dané hodnoty konstant.

| | | |
|------------------|-------|------------------|
| Reference Arm at | 658.3 | inches from zero |
| K (constant) | 45 | |
| C (constant) | 35000 | |
| Length of MAC | 155.8 | inches |
| LEMAC | 627.1 | inches from zero |

Tabulka 1: Konstanty a parametry pro výpočet[9]

2.2 Elektronický výpočet hmotnosti a vyvážení

Samotný výpočet vychází ze vzorců z předchozí kapitoly. Tyto vzorce se dále opírají o standardizované tabulkové hodnoty, které má letecká společnost opět popsány v Airport Handling Manual (AHM). Dále jsou potřeba aktuální údaje o počtu cestujících, jejich rozmístění a rozložení zavazadel, stejně jako informace o nákladu a palivu. Tyto hodnoty se mohou měnit v závislosti na konkrétním letu a konfiguraci letadla.

V současnosti jsou tyto výpočty často součástí sofistikovaných softwarových systémů, jako jsou Departure Control Systems (DCS), například Altea DCS od společnosti Amadeus nebo LIDO společnosti Lufthansa. Tyto systémy integrují data z odbavení, plánování letů a zatížení letadla, čímž zajišťují přesné výpočty v reálném čase. V případě potřeby mohou být výsledky manuálně upraveny odpovědným pracovníkem za hmotnost a vyvážení letadla.

V rámci této bakalářské práce je vytvořen výpočet, který podobně jako profesionální výpočetní systémy umožňuje přesné určení centráže letounu. Jednotlivé operace jsou členěny do kroků odpovídajících postupům běžně používaným v praxi. Vzhledem k tomu, že nejsou veřejně dostupné přesné statistiky rozdělení cestujících podle pohlaví ani údaje o počtu přepravovaných dětí, je toto rozdělení v modelu uvažováno jako rovnoměrné. Zároveň reflektuje obecné trendy zaznamenané na evropských linkách. Tabulkové hodnoty použité při výpočtech vycházejí z dokumentu AHM 560 jedné z českých leteckých společností [14].

2.2.1 Vstupní hodnoty

Mezi vstupní informace patří prázdná hmotnost letounu (BW, Basic Empty Weight) a její index (BI), která zahrnuje doplňkové vybavení operátora. Mezi toto vybavení patří veškerá zabudovaná avionika nebo vybavení kuchyněk. Většina leteckých společností využívá několik konfigurací vybavenosti kuchyněk, které jsou podle hmotnosti rozděleny do kategorií. Specifikace těchto kategorií jsou uvedeny v dokumentu AHM[10, 4].

| | |
|----------------|-----------|
| BW [kg] | BI |
| 42153 | 45,33 |

Tabulka 2: Basic Empty weight a odpovídající index

| Crew Position | Cockpit | FWD Cabin | AWD Cabin |
|----------------------|----------------|------------------|------------------|
| Crew Members | 2 | 2 | 2 |

Tabulka 3: Rozdělení posádky

2.2.2 Provozní prázdná hmotnost a index letounu

Provozní prázdná hmotnost letounu (Dry Operating Weight, DOW), zahrnuje hmotnost samotného letounu včetně pevného vybavení, provozních kapalin (kromě paliva) a množství pitné vody v nádržích. Také zahrnuje hmotnost a počet členů posádky včetně jejich rozmístění. K určení DOW je nutné sečíst následující složky:

- **Hmotnost prázdného letounu (Basic Empty Weight, BW)**

- Hmotnost: 42153 kg
- Index: 45,33

- **Pitná voda (Potable Water)**

- Při 100% naplnění: 237 kg
- Ovlivnění indexu: +3,3

- **Vybavení kuchyňky (Pantry)**

- Hmotnost: 635 kg
- Ovlivnění indexu: -1,6

- **Posádka (Crew)**

- Celková hmotnost: 470 kg
- Ovlivnění indexu: -3,1673
- Poznámka:
 - * Letová posádka (Flight Deck Crew): 2 osoby, každá 85 kg
 - * Palubní průvodčí (Cabin Crew): 4 osoby, každá 75 kg [7]

Celková prázdná hmotnost (DOW) se tedy vypočítá součtem těchto hmotností:

$$DOW = EW + \text{Pitná voda} + \text{Pantry} + \text{Posádka} \quad (2.4)$$

$$DOW = 42153 + 237 + 635 + 470 = 43495 \text{ kg} \quad (2.5)$$

Podobně se vypočítá index při provozní prázdné hmotnosti (DOI):

$$DOI = 45,33 + 3,3 - 1,6 - 3,1673 = 43,86 \quad (2.6)$$

V praxi se hodnoty DOW a DOI často považují za výchozí, protože předchozí vstupní údaje jsou považovány za standardní, čímž se zjednodušuje výpočet o jeden krok.

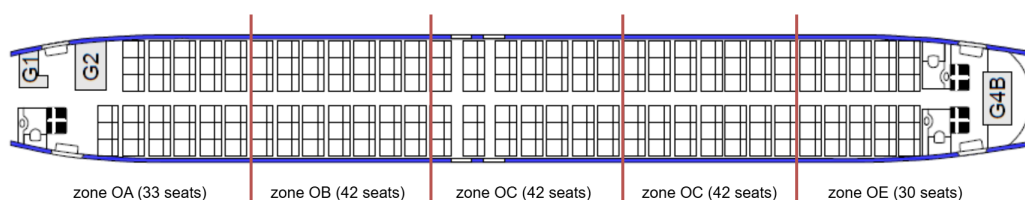
| DOW [kg] | DOI |
|----------|-------|
| 43495 | 43,86 |

Tabulka 4: Dry operating weight a odpovídající index

2.2.3 Cestující a náklad

Dalším klíčovým parametrem při výpočtu hmotnosti a vyvážení letadla je hmotnost bez paliva (Zero Fuel Weight, ZFW) a její index (Loaded Index at Zero Fuel Weight, LIZFW), což je hmotnost letadla včetně cestujících, nákladu, palubního vybavení, cateringových zásob a dalšího užitečného zatížení, ale bez paliva. ZFW je zásadní pro určení množství paliva potřebného pro let a musí respektovat omezení maximální hmotnosti bez paliva (Maximum Zero Fuel Weight, MZFW), stanovená provozními předpisy.

Kromě hmotnosti je důležité i rozmístění cestujících a nákladu, což ovlivňuje polohu těžiště letadla. Letecké společnosti mají v dokumentu AHM (Airport Handling Manual) uvedeny změny indexu, které určují, jak umístění určité hmotnosti v konkrétní zóně kabiny nebo v zavazadlovém prostoru ovlivní těžiště letadla. Každá zóna v kabině i každý zavazadlový prostor má přiřazenou hodnotu, která vyjadřuje změnu indexu na kilogram dané hmotnosti.



Obrázek 6: Zóny sedadel B737-800 v konfiguraci 189Y[14]

Výpočet ZFW a LIZFW

ZFW zahrnuje provozní prázdnou hmotnost (DOW) plus hmotnost cestujících a nákladu. Index LIZFW pak udává hodnotu indexu způsobenou rozmístěním cestujících a zavazadel.

Cestující

Pro zjednodušení se kabina dělí na zóny, v našem modelu má pět zón (viz obr. 6). Tyto zóny odpovídají konkrétním řadám sedaček v kabině a umožňují jednodušší a rychlejší výpočet polohy těžiště. Počet zón je zanesen do provozních dokumentů letecké společnosti, běžně se používá rozdělení na 3-7 zón. Boeing 737-800 obvykle používá konfiguraci 189 (vše ekonomická třída) nebo 18C/150Y (18 business, 150 ekonomická).

Jak už bylo řečeno kabina je rozdělena do pěti zón (0A, 0B, 0C, 0D, 0E). Hmotnosti cestujících vycházejí ze standardních hodnot společností pro charterové lety [14] a rozložení cestujících je dáno pro plně obsazený let:

- Muž: 83 kg
- Žena: 69 kg
- Dítě: 35 kg
- Kojenec (infant): 0 kg

| Zóna | Male | Female | Children | Infants | Hmotnost [kg] | Index |
|---------------|-----------|-----------|-----------|----------|---------------|-----------------|
| Zone OA | 15 | 15 | 3 | 1 | 2385 | -27,21285 |
| Zone OB | 20 | 19 | 3 | 1 | 3076 | -18,20992 |
| Zone OC | 19 | 20 | 3 | 0 | 3062 | 0,67364 |
| Zone OD | 20 | 19 | 3 | 1 | 3076 | 19,31728 |
| Zone OE | 13 | 14 | 3 | 1 | 2150 | 24,252 |
| Celkem | 87 | 87 | 15 | 4 | 13749 | -1,17985 |

Tabulka 5: Rozložení cestujících zónách, celková hmotnost a odpovídající index

- Celková hmotnost cestujících:

$$2385 + 3076 + 3062 + 3076 + 2150 = 13749 \text{ kg} \quad (2.7)$$

- Celkový index cestujících:

$$-27,21285 + (-18,20992) + 0,67364 + 19,31728 + 24,252 = -1,17985 \quad (2.8)$$

Zavazadla

Stejný princip platí i pro rozložení zavazadel a nákladu v zavazadlových prostorech (compartmentech). Letoun Boeing 737-800 má čtyři hlavní zavazadlové prostory – dva v přední a dva v zadní části trupu letadla. Každý z těchto prostorů má jiný vliv na polohu těžiště letadla v závislosti na tom, kde je náklad umístěn.

Kromě cestujících musíme také určit, jakým způsobem budou rozdělena zavazadla mezi jednotlivé zavazadlové prostory (compartmety). Předpokládáme zavazadlo na každého muže a ženu o hmotnosti 15 kg, zatímco děti a kojenci nemají žádné. Celkem je na palubě 87 mužů a 87 žen:

- Hmotnost zavazadel: $174 \times 15 = 2610 \text{ kg}$
- Rozložení: 87 kusů (135 kg) v Forward Compartment 2, 87 kusů v Aft Compartment 3
- Index:

$$(1305 \times -0.00743) + (1305 \times 0.00597) = -9,69615 + 7,79085 = -1,9053$$

Celkový ZFW a LIZFW

- $ZFW = DOW + \text{Cestující} + \text{Zavazadla}$

$$ZFW = 43495 + 13749 + 2610 = 59854 \text{ kg} \quad (2.9)$$

- $LIZFW = DOI + \text{Index cestujících} + \text{Index zavazadel}$

$$LIZFW = 43,86 + (-1,17985) + (-1,9053) = 40,77 \quad (2.10)$$

| Zavazadlový prostor | Hmotnost [kg] | Index |
|---------------------|---------------|----------------|
| Fwd Compartment 1 | 0 | 0 |
| Fwd Compartment 2 | 1305 | -9,69615 |
| Aft Compartment 3 | 1305 | 7,79085 |
| Aft Compartment 4 | 0 | 0 |
| Celkem | 2610 | -1,9053 |

Tabulka 6: Rozložení zavazadel v zavazadlových prostorech

- %MAC zjistíme pomocí vzorečku 2.3

$$\%MAC = \frac{\left(\frac{35000 \cdot (40,77 - 45)}{59854}\right) + 658,3 - 627,1}{\frac{155,8}{100}} = 18,44 \quad (2.11)$$

| ZFW [kg] | LIZFW | % MAC |
|----------|-------|-------|
| 59854 | 40,77 | 18,44 |

Tabulka 7: Zero Fuel Weight, odpovídající index a %MAC

2.2.4 Palivo

Posledním krokem při výpočtu hmotnosti a vyvážení letadla je stanovení vzletové hmotnosti, tedy zohlednění množství paliva. Potřebné množství paliva není dáno pouze délkou letu, ale ovlivňují ho i další faktory, jako jsou meteorologické podmínky na trase, síla a směr větru, vzdálenost k alternativním letištím v případě neplánované změny trasy či přerušení letu a provozní omezení letadla, například maximální přistávací hmotnost. Tyto faktory musí být při plánování množství paliva zohledněny, aby bylo dosaženo optimální rovnováhy mezi dostatečnou rezervou a ekonomickou efektivitou letu.

Množství paliva

O celkovém množství paliva, označovaném jako block fuel, rozhoduje kapitán letu. Block fuel představuje celkové množství paliva na palubě letadla před spuštěním motorů. To se dělí na několik složek podle účelu a fáze letu:

- Taxi Fuel – palivo potřebné pro spuštění motorů, provoz pomocné energetické jednotky (APU) a pojezdění na dráhu.
- Trip Fuel – palivo spotřebované během samotného letu z výchozího do cílového letiště.
- Contingency Fuel – rezerva pro nepředvídané okolnosti, např. odchylky od plánované trasy nebo zpoždění.
- Alternate Fuel – palivo potřebné pro dolet na náhradní letiště, pokud přistání na plánovaném cíli není možné.

- Final Reserve Fuel – minimální rezerva pro let 30 minut ve výšce 1 500 stop nad náhradním letištěm při průměrné spotřebě.
- Extra Fuel – nepovinné dodatečné palivo přidané dle uvážení kapitána, např. s ohledem na očekávané počasí nebo provozní komplikace.

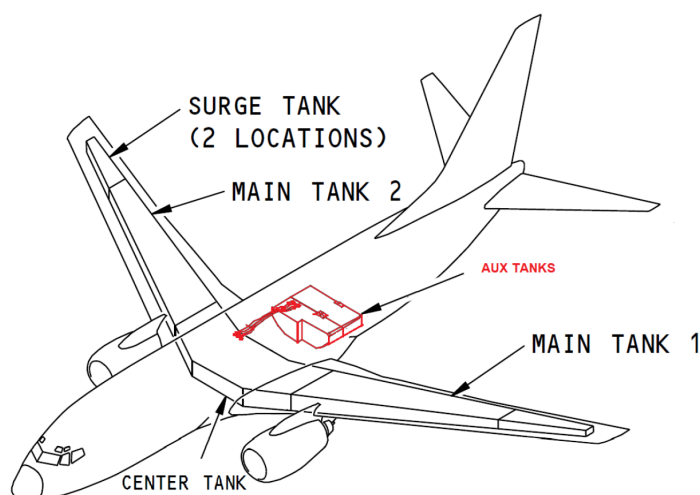
Některé složky (např. alternate fuel a final reserve fuel) se souhrnně označují jako „Reserve fuel”[2]. Celkový block fuel pro náš ilustrační model je uveden v tabulce 8. Pro úplnost uvádíme, že taxi fuel činí 200 kg.

Rozložení paliva

U letounu Boeing 737-800 je palivo ukládáno do tří hlavních nádrží:

- Havní nádrže (Wing Tanks) - umístěné v křídlech letadla,
- Centrální nádrž (Center Tank) – umístěná v trupu letadla.

Palivo je při plnění obvykle rozdělováno tak, že nejprve dochází k plnění křídelních nádrží a teprve poté centrální nádrže. Během letu je možné přecerpávat palivo mezi nádržemi za účelem korekce vyvážení letounu při změně hmotnosti v důsledku spotřeby paliva.



Obrázek 7: Rozmístění palivových nádrží v B737[14]

Rozložení paliva v nádržích je uvedeno v tabulce 8. Indexy paliva jsou určeny pomocí lineární interpolace na základě referenčních hodnot z dokumentu AHM[10].

| Parametr | Hmotnost [kg] | Index |
|------------------------|---------------|--------|
| Block Fuel | 11 000 | - |
| Hlavní nádrže (křídla) | 7 830 | 9,4 |
| Centrální nádrž | 3 170 | -4,523 |

Tabulka 8: Rozložení paliva letounu Boeing 737-800

Celkový množství paliva (Block fuel) je dán součtem hmotností paliva v jednotlivých nádržích:

$$\text{Block Fuel} = \text{Levý hlavní nádrž} + \text{Pravý hlavní nádrž} + \text{Centrální nádrž} \quad (2.12)$$

$$Fuel = 3\,915 + 3\,915 + 3\,170 = 11\,000 \text{ kg} \quad (2.13)$$

Celkový index paliva se vypočítá jako součet indexů jednotlivých nádrží, kde indexy jsou určeny lineární interpolací podle následujících dat. Nesmíme také zapomenout na odečtení paliva spotřebovaného při pojiždění (Taxi Fuel). To budeme odečítat z centrální nádrže.

- $Taxi Fuel = 200 \text{ kg}$.

$$Central = 3170 - 200 = 2970 \text{ kg} \quad (2.14)$$

Pro křídelní nádrže (celkem 7 830 kg, tedy 3 915 kg na každou) není interpolace nutná, obě nádrže jsou plné, a tedy dosahují i nejvyššího indexu.

$$\text{Index} = 9,4 \quad (2.15)$$

Pro centrální nádrž (2 970 kg):

- Lineární interpolace:

| Značka veličiny | Hmotnost (kg) | Index |
|-----------------|---------------|-------|
| m_0/I_0 | 2891 | -4,4 |
| m_1/I_1 | 3212 | -4,9 |
| m/I | 2970 | ? |

Tabulka 9: Tabulka interpolace paliva [14]

$$Index = -I_0 + (m - m_0) \frac{I_1 - I_0}{m_1 - m_0} \quad (2.16)$$

$$Index = -4,4 + (2\,970 - 2\,891) \frac{-4,9 - (-4,4)}{3\,212 - 2\,891} = -4,835 \quad (2.17)$$

- Celkový index paliva:

$$Index_{paliva} = 9,4 + (-4,835) = 4,565 \quad (2.18)$$

Vzletová hmotnost (Takeoff Weight, TOW) je pak součet všech hmotností (ZFW z předchozí kapitoly plus Block Fuel) s odečtením paliva pro spouštění motorů a pojiždění (Taxi Fuel). Výpočet indexu paliva se provádí pomocí lineární interpolace/extrapolace, jak je uvedeno výše.

Výpočet TOW a LITOW:

- ZFW = 59 854 kg a LIZFW = 46,60385 z předchozí kapitoly.
- TOW = ZFW + Block Fuel - Taxi Fuel

$$TOW = 59\,854 + 11\,000 - 200 = 70\,854 \text{ kg} \quad (2.19)$$

- LITOW = LIZFW + Index paliva

$$LITOW = 40,77 + 4,565 = 45,335 \quad (2.20)$$

- %MAC zjistíme pomocí vzorečku 2.3

$$\%MAC = \frac{\left(\frac{35000 \cdot (47,015 - 45)}{70854}\right) + 658,3 - 627,1}{\frac{155,8}{100}} = 20,14 \quad (2.21)$$

| Takeoff Weight (TOW) [kg] | LITOW | % MAC |
|---------------------------|-------|-------|
| 70 854 | 45,34 | 20,14 |

Tabulka 10: Takeoff Weight, odpovídající index a %MAC

Kromě hlavních nádrží je letoun vybaven také vyrovnávacími (Surge) nádržemi, které se nacházejí na koncích křídel. U některých variant letounu mohou být instalovány také přídatné (Auxiliary) nádrže, které se umísťují do podpalubního prostoru. Tyto nádrže slouží ke zvýšení celkové kapacity paliva a tím i doletu letounu[10].

2.2.5 Let a přistání

Samotný let a přistání vychází z výpočtů hmotnosti a vyvážení z předchozích kapitol. K těmto údajům přidáme dynamické změny během letu, které ovlivňují polohu těžiště letadla. Tyto změny jsou způsobeny především spotřebou paliva, ale také drobnými vlivy, jako je plnění odpadní nádrže. Výsledky jsou zaneseny do loadsheetu a slouží k zajištění bezpečného provozu letadla.

Spotřeba paliva během letu

Jakmile letoun dosáhne cestovní letové hladiny, vyvážení se upravuje automaticky pomocí stabilizátoru, který udržuje správnou podélnou stabilitu letadla. Hlavním faktorem, který během letu ovlivňuje rozložení hmotnosti, je postupná spotřeba paliva, jež snižuje celkovou hmotnost letadla. Oproti některým velkým dálkovým letounům Boeing 737-800 nemá ocasní palivovou nádrž, a proto je úprava polohy těžiště pomocí přesunu paliva omezená na přečerpávání mezi křídelními a centrální nádrží.

Tento přirozený úbytek hmotnosti je žádoucí i z hlediska přistání. Vzletová hmotnost (Takeoff Weight, TOW) bývá často vyšší než maximální přistávací hmotnost (Maximum Landing Weight, MLW). Pokud by bylo nutné přistát dříve, například z důvodu nouzové

situace, musí letoun snížit svou hmotnost spálením paliva, nebo v krajním případě přistát s vyšší přistávací hmotností.

Přistávací hmotnost (LW)

Přistávací hmotnost (Landing Weight, LW) je definována jako vzletová hmotnost (TOW) minus palivo spotřebované během letu (Trip Fuel). Pro ilustraci je předpokládána hodnota paliva spotřebovaného během letu 7 000 kg, což odpovídá běžnému letu střední vzdálenosti v rámci evropského prostoru u letounu Boeing 737-800.

Celkový výpočet přistávací hmotnosti a indexu vychází z následujících kroků:

1. Výpočet LW:

$$LW = TOW - \text{Trip Fuel} \quad (2.22)$$

$$LW = 70\,854 - 7\,000 = 63\,854 \text{ kg} \quad (2.23)$$

2. Zbývající palivo při přistání:

$$\text{Zbývající palivo} = \text{Block Fuel} - \text{Taxi Fuel} - \text{Trip Fuel} \quad (2.24)$$

$$\text{Zbývající palivo} = 10\,000 - 200 - 7\,000 = 2\,800 \text{ kg} \quad (2.25)$$

3. Rozložení zbývajícího paliva: Předpokládá se, že centrální nádrž je při přistání prázdná (spotřebována jako první) a zbývající palivo je rovnoměrně rozděleno do křídelních nádrží (1 400 kg v každé). Index pro křídelní nádrže při 2 800 kg (1 400 kg na nádrž) je určen lineární interpolací z referenčních hodnot AHM560. Pro tuto hmotnost je předpokládána hodnota indexu 3,5 (odvozeno interpolací mezi 0 kg a 7 830 kg s indexem 9,4).

4. LILAW - Index při přistávací hmotnosti (Load Index at Landing Weight):

$$LILAW = LIZFW + \text{Index zbývajícího paliva} \quad (2.26)$$

$$LILAW = 40,77 + 3,5 = 44,27 \quad (2.27)$$

5. %MAC: Použitím stejného vzorce (2.3):

$$\%MAC = 20,37 \quad (2.28)$$

Výsledky:

| LW [kg] | LILAW | % MAC |
|---------|-------|-------|
| 62 654 | 44,27 | 20,37 |

Tabulka 11: Přistávací hmotnost, odpovídající index a %MAC

Další faktory ovlivňující vyvážení

Dalším faktorem, který během letu ovlivňuje vyvážení letadla, je odpadní nádrž (Waste Water Tank) umístěná v zadní části letounu. Ta se postupně plní podle toho, jak cestující během letu využívají palubní toalety, což mírně posouvá těžiště směrem dozadu. Tento vliv je však obvykle minimální a v praxi se nezohledňuje.

2.2.6 Kontrola výsledků

Po dokončení výpočtů hmotnosti a vyvážení je nezbytné ověřit, zda výsledné hodnoty spadají do povolených provozních mezí letounu Boeing 737-800. Tento proces zahrnuje kontrolu vůči obálce vyvážení a stanoveným hmotnostním limitům, aby byla zajištěna bezpečnost letu. Výsledky jsou porovnávány s daty od výrobce a interními dokumenty letecké společnosti.

Obálka vyvážení

Obálka vyvážení (Weight and Balance Envelope) je grafické znázornění přípustných kombinací hmotnosti letadla a polohy těžiště, vyjádřené v %MAC. Tato obálka je definována výrobcem letadla a zohledňuje aerodynamické a konstrukční vlastnosti letounu. V praxi se kontroluje, zda vypočtené hodnoty TOW, ZFW a LW leží uvnitř obálky pro danou fázi letu (vzlet, let, přistání). Podrobnější vysvětlení obálky vyvážení bude uvedeno v kapitole Princip grafické metody 2.3 [4]. Kontroly na základě předchozích výpočtů:

- ZFW = 59 854 kg, %MAC = 18,44 (tabulka 7),
- TOW = 69 654 kg, %MAC = 20,14 (tabulka 10),
- LW = 62 654 kg, %MAC = 20,37 (tabulka 11).

Tyto hodnoty jsou porovnány s obálkou vyvážení. Meze %MAC pro letoun B737-800 v počítané konfiguraci jsou mezi 6 a 36 (podle nastavení stabilizátoru z AHM560). Tyto meze jsou také patrné ze vzletové obálky, hodnota 21,18 je tedy v dovoleném rozpětí. Stejně tak ZFW a LW spadají do povoleného rozsahu, což potvrzuje soulad s požadavky.

Hmotnostní limity

Hmotnostní limity zahrnují:

- Ramp/Taxi Weight: Maximální hmotnost před spouštěním motorů, 79 242 kg,
- Maximum Takeoff Weight (MTOW): Maximální vzletová hmotnost, 79 015 kg,
- Maximum Zero Fuel Weight (MZFW): Maximální hmotnost bez paliva, 62 731 kg,
- Maximum Landing Weight (MLW): Maximální přistávací hmotnost, 66 360 kg.

Hmotnostní limity jsou pevně dané a vycházejí z certifikace letadla podle norem výrobce[9]. Kontrola probíhá porovnáním vypočtených hodnot s těmito maximy:

- Ramp/Taxi Weight není přímo vypočteno, ale $TOW = 69\,654\text{ kg} < MTOW (79\,015\text{ kg})$ a zohledňuje Taxi Fuel 200 kg, což je v mezích,
- $TOW = 69\,654\text{ kg} < MTOW (79\,015\text{ kg})$ – v mezích,
- $LW = 62\,654\text{ kg} < MLW (66\,360\text{ kg})$ – v mezích,
- $ZFW = 59\,854\text{ kg} < MZFW (62\,731\text{ kg})$ – v mezích.

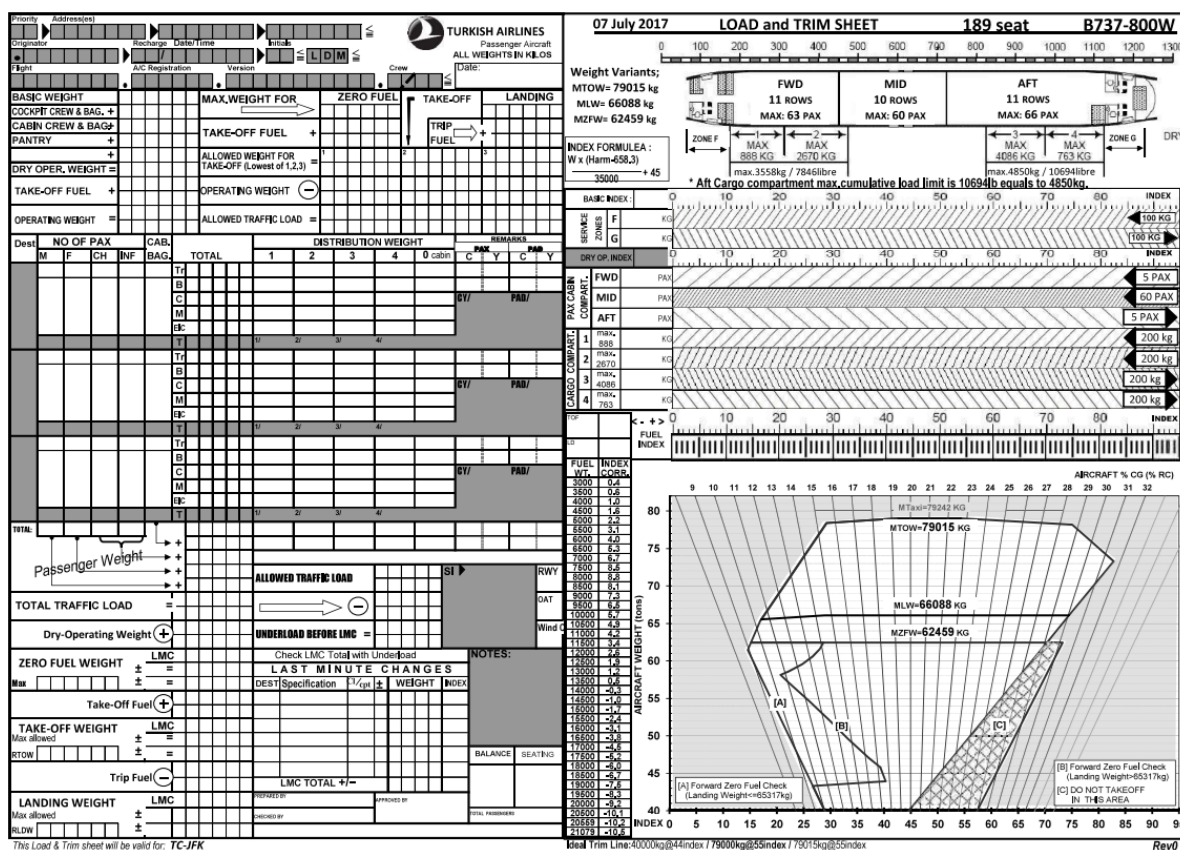
Pokud by některá hodnota limit překročila, je nutné upravit zatížení letadla (např. snížit počet cestujících, náklad nebo palivo).

| Fáze letu | Hmotnost [kg] | %MAC | Limit | Rozpětí %MAC |
|-----------|---------------|-------|-------------|--------------|
| ZFW | 59 854 | 18,44 | < 62 731 kg | 6-36 |
| TOW | 69 654 | 20,14 | < 79 015 kg | 6-36 |
| LW | 62 654 | 20,37 | < 66 360 kg | 6-36 |

Tabulka 12: Kontrola hmotnosti a vyvážení vůči limitům podle AHM560

2.3 Princip grafické metody

Další variantou pro zjištění hmotnosti a vyvážení je možnost vyplnění loadsheetu ručně, tedy bez použití moderních softwarů. Jedná se většinou o předpřipravený formulář vytvořený leteckou společností jako na obrázku 8. Grafická část dokumentu se pak ve výpočetní metodě používá především jako kontrolní nástroj, zatímco v grafické metodě slouží jako hlavní prostředek zjištění centráže. Jedná se o předchůdce moderních výpočtů prováděných pomocí výpočetní techniky. V dnešní době se využívá zejména jako záložní možnost, přičemž jeho použití zvyšuje pravděpodobnost chyby vlivem lidského faktoru. Tento dokument kombinuje tabulkové údaje o hmotnosti s grafickým znázorněním polohy těžiště pomocí vyvažovací obálky.



Obrázek 8: „Load and Trim sheet“ B737-800 Turkish airlines[9]

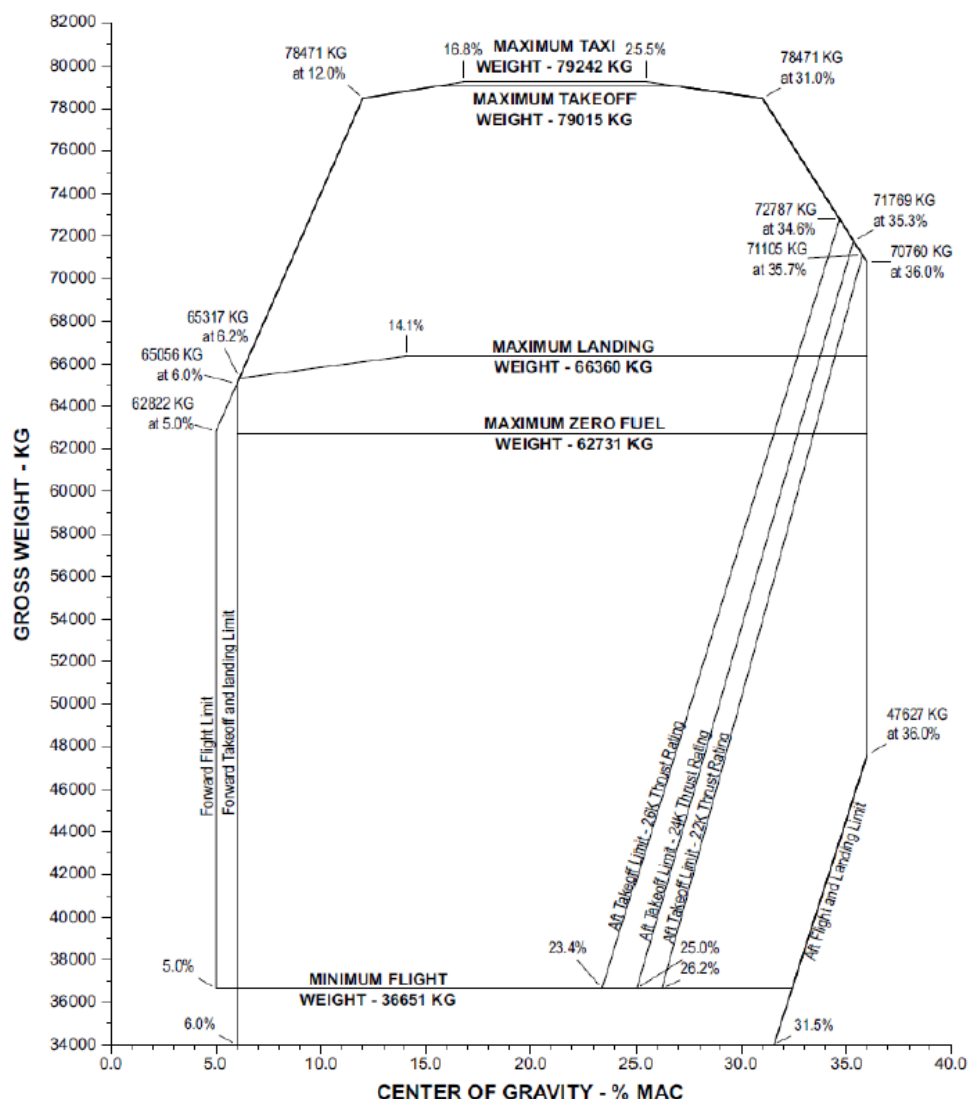
Tato metoda se používá pro velká dopravní letadla jako je Boeing 737-800. Ruční výpočty a grafické metody, například „Load and Trim sheet“, také umožňují personálu na zemi a posádce rychle zkontrolovat, zda je letadlo v souladu s limity stanovenými výrobcem. Navíc tato technika zůstává relevantní i v situacích, kdy elektronické systémy

selžou, nebo nejsou dostupné. Obecně ale lze říct, že je tato metoda na ústupu, i přesto ji každý pilot nebo jiná osoba odpovědná za vyvážení letadla musí znát a umět použít.

Obálka vyvážení

Obálka vyvážení, označovaná jako „Weight and Balance Envelope“, je grafické znázornění rozsahu, v němž musí být umístěno těžiště letadla, aby bylo zajištěno bezpečné provozování. Dle kapitoly 9 z příručky FAA Aircraft Weight and Balance Handbook[15], zabývající se velkými letadly, slouží tato obálka jako nástroj pro určení, zda je naložení letadla, jako je Boeing 737-800, v souladu s certifikačními požadavky.

Definuje se jako uzavřená oblast na grafu, kde osa x představuje polohu těžiště v procentech střední aerodynamické tětiny (%MAC) a osa y vyjadřuje hmotnost nebo momentový index. Také tam jsou zaznamenány důležité maximální hodnoty hmotnosti: MTOW, MLW, MZFW.



Obrázek 9: Vyvažovací obálka B737-800[10]

Hlavním účelem obálky je zajistit, aby poloha těžiště zůstala v mezích. FAA zdůrazňuje, že u velkých letadel, že je třeba zohlednit různé fáze letu, jako je vzlet, let a přistání, které mají odlišné limity hmotností a rozsahy těžiště. Tato obálka je založena na konstrukčních testech a letových zkouškách, jak je popsáno v kapitole 1, a je součástí dokumentace poskytované výrobcem, jako je Type Certificate Data Sheet.[15]

2.3.1 Grafické znázornění vyvažovací obálky

Praktický příklad grafického zobrazení vyvažovací obálky bude ukázán na „Load and Trim sheetu“ letecké společnosti Turkish Airlines viz obr. 8. Turkish Airlines používá, oproti numericky počítanému příkladu s pěti zónami jak bylo počítáno v předchozích výpočtech, rozdělení paluby na tři zóny paluby. Rozložení cestujících, zavazadel i množství paliva však bude obdobné.

2.3.2 Úvodní informace a údaje

Jak je zobrazeno na obrázku 10, tak prvním krokem při vyplňování „Load and Trim sheetu“ je vyplnění hlavičky dokumentu. Hlavička obsahuje základní informace o letu, jako je název provozovatele, datum a čas vydání, číslo letu, registrace letadla a jeho verze. Dále se uvádí počet členů posádky, v našem případě 2/4, tedy 2 piloti a 4 palubní průvodčí.

V další části se zapisují hmotnosti, což představuje druhou sekci „Load and Trim sheetu“. Nejprve se zadávají vstupní hodnoty, jako je prázdná hmotnost letadla (Basic Empty Weight), hmotnost posádky a hmotnost zásob pro cestující (Pantry), na základě čehož se vypočítá provozní hmotnost bez nákladu (Dry Operating Weight, DOW). Po přičtení paliva se určí operační hmotnost (Operating Weight), tedy hmotnost letadla se vším vybavením, ale bez cestujících a nákladu. V této části se také zapisují maximální hmotnosti, jako je maximální hmotnost bez paliva (MZFW), maximální přistávací hmotnost (MLW) a maximální vzletová hmotnost (MTOW), které získáme z dokumentu AHM565.[9].

Dále vypočítáme dovolenou vzletovou hmotnost (Allowed Weight for Takeoff) ze tří možných limitů: maximální hmotnosti bez paliva (Zero Fuel Weight, ZFW), maximální přistávací hmotnosti (Landing Weight, LW) a maximální vzletové hmotnosti (Takeoff Weight, TOW). Nejnižší hodnota z těchto tří limitů se bere jako výsledná dovolená vzletová hmotnost. Na základě této hodnoty se poté určuje dovolené platící zatížení (Allowed Traffic Load) odečtením operační hmotnosti (Operating Weight).

| Priority | Address(es) | | Originator | | Recharge | Date/Time | Initials | TURKISH AIRLINES | | Passenger Aircraft | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|---|------------------|---|-----------------|---|-----------|------------------|---------|----------------------|---|-------------|---|---|---|---|---|
| GG | I S T T K Y A | | B R Q C Z 7 X | | TK | 200325 | RL | L D M | | ALL WEIGHTS IN KILOS | | | | | | | |
| Flight | | | A/C Registration | | Version | | Crew | | Date: | | | | | | | | |
| T H Y 1 2 3 4 | | | T C - J F K | | M S N 2 9 7 7 3 | | 2 / 4 | | 200325 | | | | | | | | |
| BASIC WEIGHT | 4 | 2 | 1 | 5 | 3 | MAX.WEIGHT FOR | ZERO FUEL | TAKE-OFF | LANDING | | | | | | | | |
| COCKPIT CREW & BAG. + | | | 1 | 7 | 0 | | 6 | 2 | 7 | 3 | 1 | 6 | 6 | 3 | 6 | 0 | |
| CABIN CREW & BAG. + | | | 3 | 0 | 0 | TAKE-OFF FUEL + | 1 | 0 | 8 | 0 | 0 | TRIP FUEL + | 7 | 0 | 0 | 0 | |
| PANTRY + | | | 6 | 3 | 5 | | | | | | | | | | | | |
| POT. WATER + | | | 2 | 3 | 7 | ALLOWED WEIGHT FOR TAKE-OFF (Lowest of 1,2,3) = | 7 | 3 | 5 | 3 | 1 | 7 | 9 | 0 | 1 | 5 | |
| DRY OPER. WEIGHT = | 4 | 3 | 4 | 9 | 5 | | | | | | | | | | | | |
| TAKE-OFF FUEL + | 1 | 0 | 8 | 0 | 0 | OPERATING WEIGHT (-) | | | | | | | 5 | 4 | 2 | 9 | 5 |
| OPERATING WEIGHT = | 5 | 4 | 2 | 9 | 5 | ALLOWED TRAFFIC LOAD = | | | | | | | 1 | 9 | 0 | 6 | 5 |

Obrázek 10: Hlavička a vstupní údaje „Load and Trim sheetu“ Turkish Airlines[9]

2.3.3 Cestující, náklad a dovolená dopravní zátěž

Třetí sekci „Load and Trim sheetu“ Turkish Airlines, zobrazené na obrázku 11, je podrobný rozpis cestujících do zón a distribuce nákladu v podpalubních prostorách. Nejprve se zadávají hmotnosti cestujících, kteří jsou rozděleni do tří zón paluby (přední, střední, zadní). Cestující jsou kategorizováni na dospělé, děti a kojence (děti do 2 let), přičemž podle dokumentu AHM565 Turkish Airlines má kojeneček standardní hmotnost 10 kg [9], což je odlišné od předchozího numerického příkladu, kde je tato hodnota rovna 0 kg. Pro ostatní kategorie se používají stejné hmotnosti jako v předchozím příkladě dle AHM560 české letecké společnosti.

Následuje tabulka hmotnost nákladu a zavazadel, která se nachází vedle. Tyto hodnoty jsou opět kategorizované: hmotnost zavazadel tranzitních cestujících (Tr), odbavená zavazadla (B), komerční náklad (C), pošta (M) a speciální náklad, jako je například elektrický invalidní vozík (EIC). Tyto kategorie se rozdělují do podpalubních zavazadlových prostorů (compartmentů). Pro zjednodušení výpočtu opět zadáváme každému dospělému zavazadlu o hmotnosti 15 kg, zatímco hmotnost pošty, nákladu nebo speciálního vybavení se určuje podle skutečných hodnot. V našem příkladu počítáme s charterovým letem, kde je malá pravděpodobnost přepravy pošty, komerčního nákladu nebo jiného speciálního carga, takže kategorie jako M (pošta) nebo C (náklad) budou nulové.

Pod touto tabulkou se sčítají všechny hmotnosti nákladu, což umožňuje vypočítat celkové platící zatížení (Total Traffic Load). Tato hodnota zahrnuje hmotnost všech cestujících, zavazadel a dalšího nákladu na palubě. Celková dopravní zátěž (Total Traffic Load) se pak porovnává s dovolenou dopravní zátěží (Allowed Traffic Load), aby se ověřilo, zda letadlo nepřekračuje stanovené limity a zda je třeba provést poslední změny (Last Minute Changes, LMC).

| Dest | NO OF PAX | | | | CAB. BAG. | TOTAL | DISTRIBUTION WEIGHT | | | | | REMARKS | | | | | | | |
|---------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-------|---------------------|----------|----------|----------|---------|---------|----|-----|--|--|--|--|--|
| | M | F | CH | INF | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 0 cabin | PAX | | PAD | | | | | |
| | | | | | | Tr | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | B | 8 | 7 | 0 | | 29 | 29 | | | | | | | |
| | 29 | 29 | 5 | 1 | 0 | C | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | M | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | EIC | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | T | 8 | 7 | 0 | 1/ | 2/ 29 | 3/ 29 | 4/ | | | | | | |
| | | | | | | Tr | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | B | 8 | 7 | 0 | | 29 | 29 | | | | | | | |
| | 29 | 29 | 5 | 1 | 0 | C | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | M | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | EIC | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | T | 8 | 7 | 0 | 1/ | 2/ 29 | 3/ 29 | 4/ | | | | | | |
| | | | | | | Tr | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | B | 8 | 7 | 0 | | 29 | 29 | | | | | | | |
| | 29 | 29 | 5 | 1 | 0 | C | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | M | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | EIC | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | T | 8 | 7 | 0 | 1/ | 2/ 29 | 3/ 29 | 4/ | | | | | | |
| TOTAL: | 87 | 87 | 15 | 4 | | | 2 | 6 | 1 | 0 | | | | | | | | | |

Obrázek 11: Rozpis cestujících a nákladu v „Load and Trim sheetu“ Turkish Airlines[9]

2.3.4 Výsledné výpočty hmotností

Čtvrtou a poslední sekci na levé straně „Load and Trim sheetu“ Turkish Airlines je finální součet a výpočet hmotností letadla, které můžeme vidět na obrázku 12. K hodnotě celko-

vého platícího zatížení (Total Traffic Load) se přičte pohotovostní prázdná hmotnost bez nákladu (DOW), čímž získáme maximální hmotnost bez paliva (ZFW). Následně se přičte množství paliva na palubě (Block Fuel), což dává vzletovou hmotnost (TOW). Nakonec se od vzletové hmotnosti odečte palivo spotřebované během letu (Trip Fuel), čímž se vypočítá přistávací hmotnost (LW). Dále se počítá rozdíl zatížení (Underload), což je rozdíl mezi dovoleným platícím zátížením (Allowed Traffic Load) a celkovým platícím zatížením (Total Traffic Load).

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| TOTAL: | 87 | 87 | 15 | 4 | | 2 | 6 | 1 | 0 | | | | | | | | | | |
| Passenger Weight | | | | | + | | 5 | 6 | 5 | | | | | | | | | | |
| | | | | | + | 6 | 0 | 0 | 3 | | | | | | | | | | |
| | | | | | + | 7 | 2 | 2 | 1 | | | | | | | | | | |
| TOTAL TRAFFIC LOAD | = | | | | | 1 | 6 | 3 | 9 | 9 | | | | | | | | | |
| Dry-Operating Weight (+) | | | | | | 4 | 3 | 4 | 9 | 5 | | | | | | | | | |
| ZERO FUEL WEIGHT | | | | | | 5 | 9 | 8 | 9 | 4 | | | | | | | | | |
| Max | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Take-Off Fuel (+) | | | | | | 1 | 0 | 8 | 0 | 0 | | | | | | | | | |
| TAKE-OFF WEIGHT | | | | | | 7 | 0 | 6 | 9 | 4 | | | | | | | | | |
| Max allowed | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RTOW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Trip Fuel (-) | | | | | | 7 | 0 | 0 | 0 | | | | | | | | | | |
| LANDING WEIGHT | | | | | | 6 | 3 | 6 | 9 | 4 | | | | | | | | | |
| Max allowed | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| RLDW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

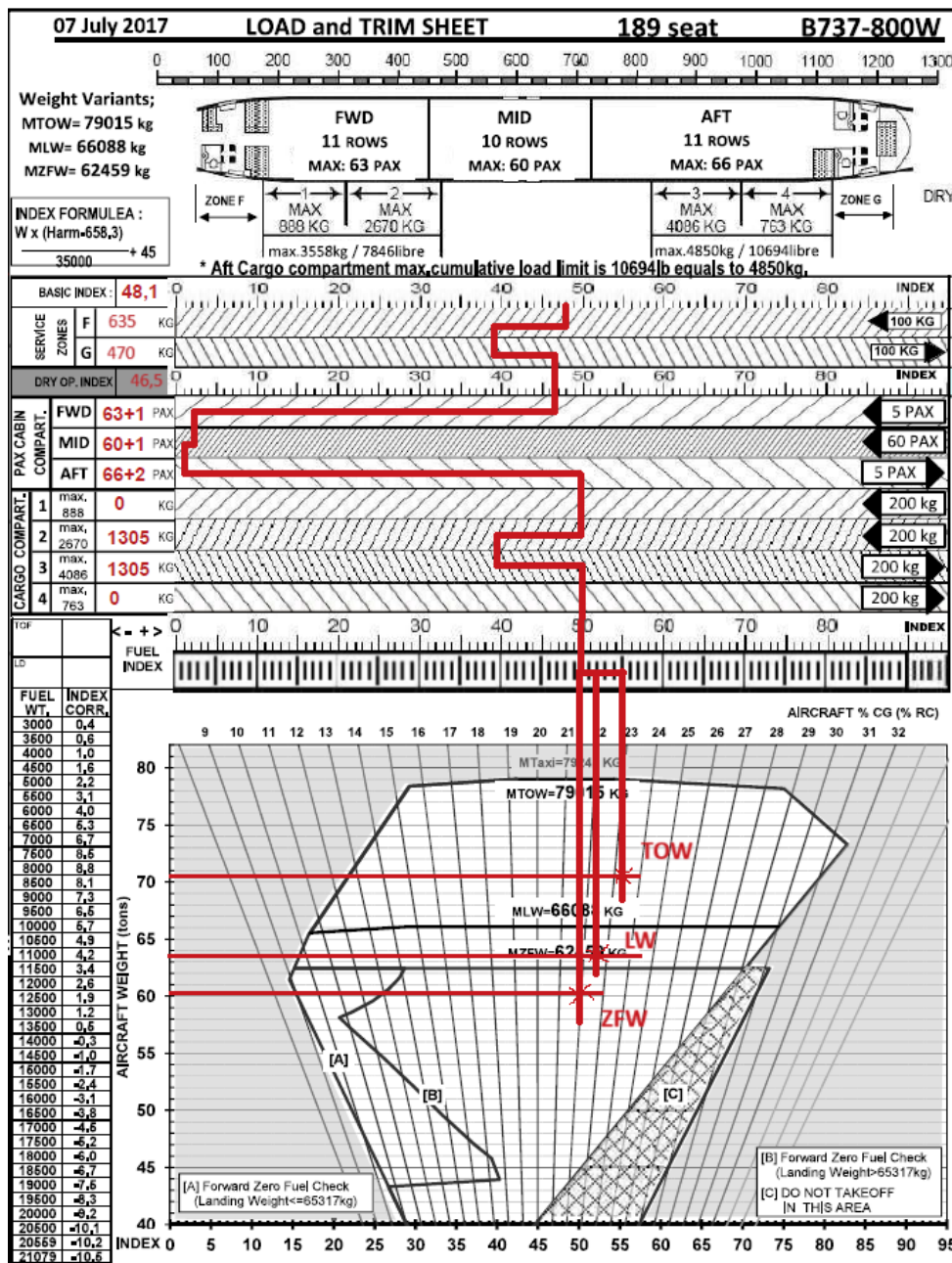
Obrázek 12: Finální výpočty hmotností v „Load and Trim sheet“u Turkish Airlines[9]

2.3.5 Grafické určení indexu a %MAC

Pravá grafická část „Load and Trim sheetu“ Turkish Airlines slouží ke grafickému určení indexu a procenta střední aerodynamické tětiny (%MAC) viz obrázek 13. Vstupním údajem je základní index (Basic Index), který zjistíme z dokumentu AHM565 [9]. Následně se provádí korekce tohoto indexu na základě různých hmotností a jejich rozložení. Nejprve se zohledňují servisní zóny, které zahrnují hmotnosti personálu, galley a zásob pro cestující (pantry), jež jsou rozdělené na přední (F) a zadní (G) část letadla. Dále se přidává počet cestujících v jednotlivých zónách paluby (přední, střední, zadní) a rozložení nákladu v podpalubních prostorech (compartments).

Dle obrázku 13 můžeme pozorovat, že se vytváří svíslá křivka, která prochází jednotlivými řádky. V každém řádku se tato křivka vodorovně koriguje podle hmotnosti dané kategorie. Posledním řádkem je korekce palivového indexu (Fuel Index Correction). Ta se však pro maximální hmotnost bez paliva (ZFW) ze své definice neprovádí, protože ZFW nezahrnuje palivo. Pro vzletovou hmotnost (TOW) a přistávací hmotnost (LW) se tato korekce provádí podle množství paliva v dané fázi letu: pro TOW se křivka posune podle korekce odpovídající množství paliva při vzletu (Takeoff Fuel), zatímco pro LW se

křivka posune podle korekce odpovídající množství paliva, které zůstane při přistání. K těmto korekcím paliva je vedle vyvažovací obálky umístěna tabulka, kde jsou k hodnotám množství paliva přiřazeny odpovídající korekční indexy (Correction Index).



Obrázek 13: Grafické určení indexu a %MAC v „Load and Trim sheetu“ Turkish Airlines [9]

Do samotné vyvažovací obálky se poté prodlouží křivky, které prošly těmito korekcemi. Na svislé ose grafu se nakreslí vodorovné křivky odpovídající maximální hmotnosti bez paliva (ZFW), vzletové hmotnosti (TOW) a přistávací hmotnosti (LW). Průsečíky těchto vodorovných křivek s křivkami po korekci určují konečné hodnoty procenta střední aerodynamické tětiny (%MAC) a indexu pro jednotlivé fáze letu.

2.4 Porovnání numerické a grafické metody

Numerická a grafická metoda představují v zásadě stejný výpočet hmotnosti a vyvážení letounu, liší se však způsobem zpracování dat. Grafická metoda, založená na ručním vyplňování „Load and Trim sheetu“, představuje předchůdce moderní numerické metody, která využívá elektronické výpočetní systémy. Numerická metoda bývá rychlejší pro uživatele, kteří jsou s výpočtem obeznámeni, zatímco grafické určování indexu a hodnoty %MAC může být méně přesné kvůli nutnosti vizuální interpretace křivek.

Nejvýraznějším rozdílem mezi metodami je použití vyvažovací obálky. Zatímco v grafické metodě představuje hlavní výstup celého procesu, v numerické metodě slouží pouze jako kontrolní nástroj. Ruční výpočty navíc zvyšují riziko vzniku chyb vlivem lidského faktoru. Přesto zůstává zvládnutí grafické metody nezbytné, protože v případě výpadku elektronických systémů je nutné „Load and Trim sheet“ vyplnit ručně.

3 Obsazenost letu a rozmístění hmotnosti

Obsazenost letadla, rozložení cestujících a zavazadel výrazně ovlivňují polohu těžiště, což má přímý dopad na stabilitu letadla a hodnotu %MAC. Problematika je znázorněna na příkladu letounu Boeing 737-800.

3.1 Obsazenost a rozmístění cestujících

Hmotnost cestujících tvoří podstatnou část celkové hmotnosti letadla. Při plné obsazenosti může tato hodnota hmotnosti představovat i pětinu maximální vzletové hmotnosti (MTOW). Tyto rozdíly mohou vést k výrazným posunům těžiště, zejména pokud je rozložení cestujících nerovnoměrné. V krajních případech, kdy jsou překročeny limity %MAC nebo indexu, může kapitán rozhodnout o přesazení cestujících, aby bylo letadlo správně vyváženo a zajištěna bezpečnost letu. Jedná se také o nejjednodušší možnost, jak zamezit překročení těchto limitů.

| Zóna cestujících | Počet sedadel | Index na 1 kg |
|------------------|---------------|---------------|
| OA | 33 | -0.01141 |
| OB | 42 | -0,005920 |
| OC | 42 | +0.00022 |
| OD | 42 | +0.00628 |
| OE | 30 | +0.01128 |

Tabulka 13: Počet sedadel v zónách a vliv na index [14]

3.2 Vliv rozmístění zavazadel

Rozmístění zavazadel v nákladových prostorech představuje jeden z hlavních nástrojů, jak optimalizovat polohu těžiště letounu. Zatímco rozmístění cestujících je často obtížnější proveditelné, zavazadla jsou využívána k rychlé kompenzaci vyvážení a dosažení požadovaného indexu.

Z praxe je známo, že zavazadla jsou záměrně nakládána do nákladových prostorů nejen při nevyváženém obsazení kabiny, aby bylo těžiště posunuto do vhodnější polohy. Tento postup je považován za běžnou součást výpočtu hmotnosti a vyvážení a je podrobně popsán v dokumentech, jako je Weight and Balance Manual dopravce [10].

Pro model Boeing 737-800 jsou standardně využívány čtyři hlavní nákladové prostory označované jako Forward Compartment 1, Forward Compartment 2, Aft Compartment 3 a Aft Compartment 4. Každý z těchto prostorů má odlišný vliv na moment letadla, což je předem definováno hodnotami indexu na kilogram, které jsou používány při výpočtu celkového momentu [9]. Tyto hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

Rozhodování o umístění zavazadel do nákladových prostorů je běžně zajišťováno handlingovou společností, přičemž konečné rozhodnutí o rozložení nákladu v zavazadlových

| Zavazadlový prostor | Maximální hmotnost [kg] | Index na 1 kg |
|-----------------------|-------------------------|---------------|
| Forward Compartment 1 | 741 | -0.0121 |
| Forward Compartment 2 | 2209 | -0.00743 |
| Aft Compartment 3 | 3157 | +0.00567 |
| Aft Compartment 4 | 474 | +0.01204 |

Tabulka 14: Maximální hmotnost v zavazadlových prostorech a vliv na index [9]

prostorech musí být vždy schváleno kapitánem letu [4]. V digitálních systémech, jako je například Altea DCS, může být rozložení zavazadel navrhováno automaticky, čímž je práce handlingového personálu výrazně zjednodušena. Případné úpravy podle potřeby mohou být provedeny odpovědnou osobou.

Již z maximálních hodnot uvedených v tabulce 14 je patrné, že prostory Forward Compartment 1 a Aft Compartment 4 jsou omezeny nižší maximální hmotností a vykazují vyšší vliv na index (-0.0121, resp. +0.01204). Z těchto důvodů nejsou tyto prostory pro běžná odbavená zavazadla příliš využívány, protože by mohly příliš ovlivnit vyvážení letadla při relativně nízké hmotnosti nákladu. Místo toho jsou v těchto prostorech častěji ukládány například náhradní díly pro letadlo, kočárky, které jsou po příletu rychle vykládány, nebo speciální náklady. Mezi tyto speciální náklady jsou řazeny elektrické invalidní vozíky, domácí zvířata nebo nebezpečné materiály (Dangerous Goods), jejichž umístění je přísně regulováno podle směrnic IATA [6].

3.3 Případy rozložení hmotnosti

Tato sekce se zaměřuje na analýzu různých scénářů rozložení cestujících a zavazadel u letounu Boeing 737-800 s důrazem na jejich vliv na parametr %MAC vypočtený pro vzletovou hmotnost (TOW). Kapitola zkoumá pouze dopad obsazenosti, a proto vychází ze standardizovaných hodnot hmotnosti podle předpisů [14], což umožňuje srovnatelnost výsledků při různých konfiguracích.

3.3.1 Extrémní případy

Pro analýzu extrémních případů a jejich porovnání je zvoleno pět hypotetických scénářů:

- Prázdné letadlo (bez cestujících a zavazadel).
- Cestující a zavazadla v přední části (zóny 0A a 0B, zavazadla v přední části).
- Cestující v zadní části (zóny 0D a 0E, zavazadla v zadní části).
- Rovnoměrné rozložení cestujících i zavazadel.
- Plná obsazenost (hodnoty z kapitoly 2.2).

Pro výpočty jsou předpokládány stejné vstupní hodnoty jako v kapitole 2.2. Každý cestující má standardní zavazadlo o hmotnosti 15 kg. Pro maximalizaci účinku jsou zavazadla rozmístěna podobně jako cestující. Tak je zachováno stejné množství paliva pro

všechny scénáře: Block Fuel 11 000 kg, Trip Fuel 7 000 kg a Taxi Fuel 200 kg. Tento předpoklad zjednodušuje srovnání, i když v reálných podmínkách by nižší hmotnost cestujících a nákladu pravděpodobně vedla k úpravě množství paliva.

Výpočty %MAC jsou provedeny pro vzletovou hmotnost (TOW), který je považován za nejměrodatnější stav pro posouzení vyvážení letounu před vzletem. Tyto výpočty vycházejí z numerické metody popsané v kapitole 2.2, přičemž hmotnosti cestujících odpovídají standardním hodnotám: muž 83 kg, žena 69 kg, dítě 35 kg, kojeneček 0 kg [14]. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 15, která zahrnuje parametry indexu %MAC.

| Rozmístění | Prázdné | Přední | Zadní | 50% rovn. | Plné |
|-------------------|---------|--------|-------|-----------|-------|
| Rozpětí %MAC [14] | 6–36 | | | | |
| %MAC | 18,29 | 1,60 | 39,7 | 20,71 | 20,66 |

Tabulka 15: %MAC při různé obsazenosti

Z tabulky 15 vyplývá, že rozložení cestujících a zavazadel výrazně ovlivňuje polohu centra. Při 50% obsazenosti s cestujícími v přední části dosahuje %MAC hodnoty 1,60, což je pod dolní hranicí bezpečné obálky (6–36 %MAC podle [9]), zatímco u zadního rozložení je %MAC 39,7, tedy nad horní hranicí. Rovnoměrné rozložení a plná obsazenost vedou k hodnotám %MAC blízkým optimálnímu středu obálky (20,71 a 20,66). Tyto limity jsou pevně stanoveny certifikací letadla podle norem výrobce. Kontrola ukázala, že scénáře s 50% obsazeností v přední a zadní části tyto limity překračují [7]. V této analýze se zaměřujeme výhradně na %MAC při take-off weight (TOW), protože tato hodnota je považována za nejměrodatnější pro posouzení vyvážení letounu před vzletem.

3.3.2 Kompenzace momentu

Jak bylo řečeno v kapitole 3.2, zavazadla se často používají jako kompenzace momentu špatného rozmístění cestujících na palubě.

Pro analýzu případů kompenzace momentu jsou zvoleny dva extrémní scénáře z předchozí kapitoly 3.3.1, tyto scénáře jsou rozšířeny o dvě možnosti hmotnosti zavazadla na cestujícího (15/30 kg):

- Cestující a zavazadla v přední části (zóny 0A a 0B, zavazadla v přední části).
- Cestující v zadní části (zóny 0D a 0E, zavazadla v zadní části).

| Rozmístění cestujících | Přední | Přední | Zadní | Zadní |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Rozmístění zavazadel | Zadní | Zadní | Přední | Přední |
| Hmotnost zavazadla(kg) | 15 | 30 | 15 | 30 |
| Rozpětí %MAC [14] | 6–36 | | | |
| %MAC | 7,81 | 10,27 | 33,50 | 30,59 |

Tabulka 16: %MAC při kompenzaci momentu s různou hmotností zavazadel

I když jsou výsledky oproti hodnotám v kapitole 3.3.1 v mezích bezpečné obálky %MAC (6–36) dle dokumentu AHM[14], hodnoty z tabulky 16 zůstávají příliš blízko těmto

limitům, což může zvyšovat citlivost letounu na změny těžiště během letu. V reálném provozu by k takovému extrémnímu rozmístění pravděpodobně nedošlo, a pokud ano, kapitán by zřejmě rozhodl o přemístění cestujících, aby zajistil bezpečnější vyvážení [7].

3.4 Převrácení letadla na zemi (Tipping)

Při nakládání, vykládání nebo manipulaci s letadlem na zemi může být riziko převrácení na záď, označované v angličtině jako „tipping“ nebo „tail tipping“, považováno za vážný bezpečnostní problém, který je způsoben nesprávným rozložením hmotnosti. K tomuto jevu dochází, pokud je těžiště letadla posunuto příliš dozadu, což může vést k převrácení letounu na zadní část trupu. U letadel s úzkým trupem, jako je Boeing 737-800, je toto riziko přítomné, avšak tato varianta není k převrácení tak náchylná jako delší verze, například Boeing 737-900, u níž je větší délka trupu a tedy i větší potenciál pro posun těžiště směrem dozadu [10].

Riziko převrácení je ovlivňováno několika faktory, které jsou v handlingových postupech pečlivě zohledňovány. Mezi situace, které mohou přispět k převrácení, jsou řazeny zejména následující [10]:

- Nízká hmotnost letadla, například při nízké hladině paliva nebo při plných hlavních nádržích a prázdné středové nádrži.
- Nerovnoměrné rozložení cestujících, například zadní polovina kabiny plná a přední polovina prázdná během nastupování nebo vystupování.
- Vysoká hmotnost v zadních nákladových prostorech při prázdných předních prostorech.
- Přítomnost posádky a pozemního personálu na specifických místech letadla.
- Vnější podmínky jako je sklon rampy (např. 3% sklon), povrch dráhy, čelní vítr (např. 40 uzlů), sníh nebo další povětrnostní podmínky.

Například u Boeingu 737-800 je absolutní limit převrácení stanoven na 50,8 % MAC, což je hodnota značně vzadu za limitem stability na zemi. Limity stability na zemi a jejich závislost na větru a sklonu rampy jsou podrobněji popsány v diagramech uvedených v dokumentaci [10].

Příkladem převrácení letadla při pozemním odbavení je incident letu PS781 společnosti Ukraine Airlines, ke kterému došlo na letišti Ben Gurion v Tel Avivu z obrázku 14. Letoun Boeing 737-900 začal nekontrolovaně překlápět směrem dozadu poté, co byla vyložena zavazadla z předního nákladového prostoru, zatímco vykládka zadního prostoru byla přerušena kvůli technické závadě. Zároveň vystupovali cestující pouze předními dveřmi, což způsobilo nerovnoměrné zatížení a vedlo k tomu, že se letoun zvedl na předovém podvozku a opřel se ocasem o zem. Došlo k poškození trupu i dveří. Tento incident ilustruje, jak zásadní je správná koordinace vykládky a pohybu cestujících pro udržení rovnováhy letadla na stojánce [16].

K minimalizaci rizika převrácení jsou v praxi uplatňována specifická opatření, která jsou zaměřena na udržení těžiště před limitem stability na zemi. Přední nákladové prostory (Forward Compartment 1 a 2) jsou doporučovány k nakládání jako první a vykládání jako poslední, aby bylo zajištěno vyvážení směrem dopředu. Dále je doporučováno řídit

nastupování a vystupování cestujících tak, aby nedošlo k velkému posunu těžiště směrem dozadu, například zadržením cestujících u předních dveří v případě zácpy v uličce. Kromě toho může být horizontální stabilizátor nastaven na trim +4 jednotky, čímž je těžiště udržováno více vpředu. Tyto postupy jsou navrženy tak, aby bylo zajištěno, že těžiště zůstane před zadním limitem převrácení, a tím je situace převrácení zcela vyloučena [10].



Obrázek 14: Převrácení letadla Ukraine International Airlines na ocas při vykládce na letišti v Tel Avivu[16].

4 Tabulkové hodnoty

Zjištění přesné hmotnosti každého jednotlivého cestujícího před každým letem je v reálných podmínkách letecké dopravy logisticky náročné a ekonomicky nevýhodné. Z tohoto důvodu se v letectví zavádějí standardizované hmotnosti, které se vztahují na posádku, cestující a jejich zavazadla. Letecké společnosti jsou povinny tyto standardní hodnoty stanovovat, aktualizovat a dodržovat v souladu s předpisy Evropské agentury pro bezpečnost letectví (EASA). Standardizované hodnoty jsou stanoveny na základě statistického zpracování dat, přičemž vstupní údaje pocházejí z pravidelného dobrovolného vážení cestujících na vybraných letištích [7].

Pravidla EASA, doplněná metodickými pokyny jako ty v (AHM), stanovují postupy pro použití těchto hmotností při plánování letů. Jejich cílem je zajistit, aby letadlo bylo vždy v souladu s povolenými limity hmotnosti a těžiště, čímž se minimalizují rizika spojená s přetížením nebo nevyváženým rozložením hmotnosti [7].

4.1 Hmotnost posádky

Hmotnost posádky je jednou z prvních hodnot určujících se při výpočtu. Pro určení hmotnosti posádky může letecká společnost využít buď skutečné hmotnosti jednotlivých členů včetně jejich zavazadel, nebo standardní hodnoty stanovené EASA, či samotnou leteckou společností. Standardní hmotnost pro letovou a technickou posádku je dle EASA stanovena na 85 kg včetně příručních zavazadel, zatímco pro palubní personál činí 75 kg [7].

4.2 Hmotnost cestujících a zavazadel

Hmotnost cestujících a jejich zavazadel se v letectví obvykle určuje pomocí standardizovaných tabulkových hodnot, které letecké společnosti upravují v souladu s požadavky EASA, aby zajistily přesné plánování zatížení. Tyto hodnoty zahrnují jak cestující, tak jejich zavazadla a jsou podrobně popsány ve směrnících EASA [7].

4.2.1 Postup pro stanovení standardních hmotnostních hodnot pro cestující

Průměrná hmotnost cestujících včetně jejich osobních věcí se stanovuje vážením náhodných vzorků, které musejí být reprezentativní pro daný typ operací, frekvenci letů na různých trasách, sezónu a kapacitu letadla. Podle EASA je minimální počet vážených cestujících stanoven na 2 000 pro letadla s kapacitou 40 a více sedadel, případně 50násobek kapacity pro menší letadla, s dodržením statistických zásad. Vážení by mělo probíhat co nejbližší k letadlu, aby se minimalizovaly změny hmotnosti, a použité zařízení musí mít kapacitu alespoň 150 kg a odchylku přesnosti maximálně 0,5 % nebo 200 g [7].

Záznamy z vážení obsahují hmotnosti jednotlivých cestujících, jejich kategorizaci podle pohlaví a věku (děti a dospělí) a číslo letu, což slouží k výpočtu průměrných hmotností. Tyto průměry tvoří základ pro revidované standardní hodnoty, které se revidují každých pět let a zohledňují poměr mužů a žen (80/20 na pravidelné lety a 50/50 na charterové lety). Hmotnosti cestujících se zaokrouhlují na celé kilogramy. Pokud hmotnosti cestujících

výrazně odchylní od standardů, například u vojenských jednotek nebo sportovních týmů, musí personál odbavení a palubní posádka přijmout opatření. [7].

4.2.2 Standardní hmotnost zavazadel

Standardní hmotnost odbavených zavazadel se podle předpisů EASA liší v závislosti na druhu letu. Pro velká dopravní letadla, jako je například i Boeing 737-800, jsou stanoveny následující průměrné hmotnosti:

- Vnitrostátní lety: 11 kg,
- Lety v rámci evropského regionu: 13 kg,
- Interkontinentální lety: 15 kg,
- Ostatní mezinárodní lety: 13 kg,

které platí pro letadla s více než dvaceti sedadly [7].

Záznamy z vážení cestujících a jejich zavazadel se evidují společně. Jediný rozdíl spočívá ve způsobu zaokrouhlování zjištěných hmotností, kdy se hmotnost cestujících uvádí v celých kilogramech, zatímco u zavazadel se zaokrouhluje na půlkilogramy.

Pokud letecká společnost očekává výrazné odchylny od těchto hodnot (například při přepravě sportovních týmů nebo cestujících s nadměrným zavazadlem), musí být zavazadla zvážena individuálně, nebo se přičítá vhodný hmotnostní přírůstek [7].

4.2.3 Statistické vyhodnocení údajů o cestujících a zavazadlech

Veškeré následující výpočty a metodické postupy pro stanovení průměrné hmotnosti cestujících a jejich zavazadel vycházejí z dokumentu Air Operations Evropské agentury pro bezpečnost letectví [7]. Pro určení potřebné velikosti statistického vzorku je nezbytné odhadnout směrodatnou odchylku na základě dat z podobných populací nebo předběžných průzkumů. Podle EASA se přesnost tohoto odhadu stanovuje s 95% spolehlivostí, což znamená, že skutečná průměrná hmotnost musí ležet v definovaném intervalu.

Velikost vzorku n se vypočítá pomocí vzorce:

$$n \geq \frac{(1.96 \cdot \sigma' \cdot 100)^2}{(e'_r \cdot \mu')^2}, \quad (4.1)$$

kde e'_r je povolená relativní odchylka (např. 1% pro celkovou hmotnost), σ' udává směrodatnou odchylku, μ' vyjadřuje odhadovaná průměrná hmotnost a 1.96 odpovídá 95% hladině spolehlivosti.

Průměrná hmotnost vzorku \bar{x} se vypočítá jako:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_j}{n}, \quad (4.2)$$

kde x_j vyjadřuje hmotnosti jednotlivých cestujících.

Vzorec:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_j - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (4.3)$$

pak určuje směrodatnou odchylku S .

Relativní chyba e_r se ověřuje vzorcem:

$$e_r = \frac{1.96 \cdot S \cdot 100}{\sqrt{n} \cdot \bar{x}}, \quad (4.4)$$

kteřá pokud přesahuje 1% pro celkovou hmotnost nebo 2% pro muže a ženy zvlášť, je nutné zvětšit vzorek.

Interval spolehlivosti je dán:

$$\bar{x} \pm \frac{1.96 \cdot S}{\sqrt{n}}, \quad (4.5)$$

který vyjadřuje s 95% pravděpodobností rozmezí skutečné průměrné hmotnosti.

4.3 Průzkum

V rámci bakalářské práce byl proveden samostatný anonymní průzkum zaměřený na sběr údajů o hmotnostech cestujících. Cílem bylo zjistit, jak se reálné hmotnosti liší od standardních hodnot podle EASA. V průzkumu byly zahrnuty pouze osoby starší 12 let, čímž byly vyloučeny děti, jejichž hmotnosti jsou podle EASA standardně stanoveny na 35 kg [7].

Průzkum zahrnoval 90 respondentů, z toho 50 mužů a 40 žen, s daty sesbíranými v rozmezí od 11. listopadu 2024 do 17. února 2025. Průměrné věky jsou nižší (muži 30 let, ženy 37 let, celkem 33 let), což je dáno tím, že největší skupinu tvořili studenti. Tyto hodnoty byly srovnány se standardními hmotnostmi [9], přičemž byly zvoleny hodnoty pro charterové lety (83 kg pro muže a 69 kg pro ženy). Tyto hodnoty, typické pro charterové lety, lépe reflektují samotnou hmotnost cestujících, což je podrobněji rozebráno v kapitole 5.1 [7]. Průměrné hmotnosti z průzkumu – muži 83,8 kg a ženy 69,5 kg, s celkovým průměrem 77,5 kg – ukazují, že muži mají hmotnost o 0,8 kg vyšší a ženy o 0,5 kg nižší než tyto standardy. Tyto odchylky mohou být ovlivněny menším vzorkem nebo specifickým populačním profilem, zejména mladším věkem respondentů.

| Pohlaví | Počet respondentů | Průměrná hmotnost (kg) | Průměrný věk (let) |
|---------|-------------------|------------------------|--------------------|
| Muži | 50 | 83,8 | 30 |
| Ženy | 40 | 69,5 | 37 |
| Celkem | 90 | 77,5 | 33 |

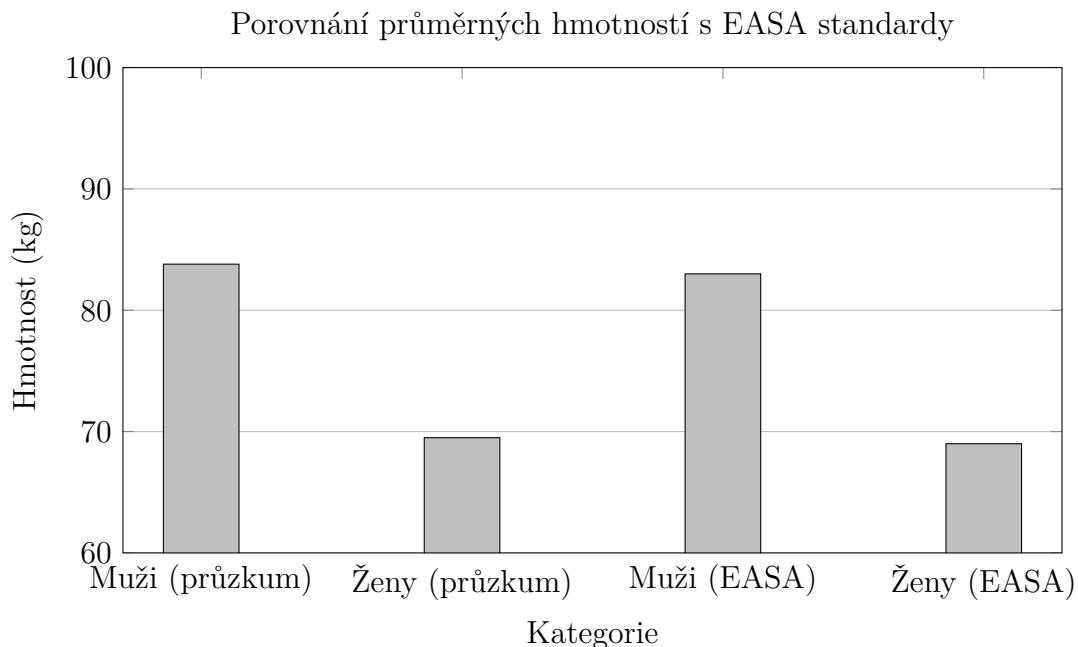
Tabulka 17: Průměrné hmotnosti a věk respondentů podle pohlaví.

Metodika výpočtu průměrů byla zjednodušena: pro každé hmotnostní rozmezí byla použita střední hodnota (např. 80-89 kg = 84,5 kg), a poté byl vypočten aritmetický průměr jako součet všech středních hodnot dělený počtem respondentů. Tento přístup nezohledňuje statistickou váhu nebo směrodatnou odchylku, což by bylo ideální podle EASA, ale kvůli malému vzorku (90 respondentů oproti doporučeným 2 000) bylo zvoleno

toto zjednodušení. Pro přesnější výsledky by byl potřeba rozšířený vzorek a pokročilejší statistické metody [7].

Tabulka níže shrnuje průměrné hmotnosti a věk podle pohlaví:

Pro lepší vizualizaci jsou průměrné hmotnosti znázorněny na následujícím grafu, kde jsou porovnány se standardy EASA:



Obrázek 15: Graf průměrných hmotností respondentů ve srovnání se standardy EASA.

Rozdíly mezi průměry z průzkumu a standardy EASA mohou být způsobeny různými faktory, jako je geografická distribuce respondentů, věková struktura s převahou studentů nebo absence pokročilých statistických analýz. Tyto faktory si lépe rozebereme v kapitole 5. EASA doporučuje pro reprezentativní výsledek vzorek alespoň 2 000 respondentů, což náš průzkum nepokryl, a proto jsou výsledky spíše přibližné.

Jako zajímavost lze zmínit, že frekvence létání respondentů vykazala následující distribuci: 44 % létá zřídka (jednou za rok nebo méně), 22 % nikdy, 19 % občas (několikrát ročně), 8 % často (alespoň jednou za měsíc) a 7 % velmi často (několikrát za měsíc).

5 Faktory a odchylky hmotnosti

Při používání standardních tabulkových hodnot hmotnosti cestujících a zavazadel je třeba zohlednit řadu faktorů a odchylek, které mohou výsledné hodnoty ovlivnit. Kromě parametrů, jako je typ letu, sezóna nebo provozní podmínky, hraje roli také etnický původ cestujících, geografické rozdíly či dlouhodobé změny v průměrné hmotnosti populace. Narůstající trend obezity ve vyspělých zemích vede k postupnému zvyšování průměrné hmotnosti cestujících, což může mít dopad na přesnost standardních hmotnostních tabulek [17]. Tato kapitola analyzuje hlavní faktory ovlivňující hmotnost cestujících a zavazadel a v závěru zkoumá dopad těchto odchylek na polohu centráže letounu Boeing 737-800.

5.1 Vliv druhu letu

Letecké společnosti rozlišují mezi různými typy letů, zejména mezi pravidelnými linkovými lety, charterovými lety, nízkonákladovými lety a speciálními lety. Každý z těchto typů letů se liší složením cestujících, množstvím a typem zavazadel, což ovlivňuje standardní hmotnosti používané při výpočtech *loadsheetu*. Důležitou informací je, že hmotnost příručních zavazadel je zahrnuta do průměrné hmotnosti cestujícího, zatímco odbavená zavazadla se evidují samostatně [7].

Pravidelné linkové lety

Pravidelné linkové lety jsou charakteristické vyšším podílem obchodních cestujících, kteří často cestují s minimem zavazadel. Typicky preferují větší příruční zavazadlo na úkor odbaveného zavazadla, což vede k vyšší průměrné hmotnosti cestujícího včetně příručních zavazadel [18]. Tento trend je výraznější u mužů než u žen. Podle studie EASA z roku 2022 mají cestující na pravidelných linkách u tradičních dopravců (FSC) průměrnou váhu příručních zavazadel 7,6–8,1 kg, což je vyšší hodnota než u nízkonákladových dopravců (LCC) [19]. Pravidelné linkové lety propojují destinace s obousměrným pohybem cestujících na rozdíl od charterových letů.

Nízkonákladové pravidelné lety

Nízkonákladové společnosti, jako například Ryanair nebo EasyJet, nabízejí cenově dostupné lety s omezenými službami. Cestující mají obvykle zahrnuto pouze malé příruční zavazadlo (do 10 kg), přičemž další služby jsou zpoplatněny. Tento model vede k nižší průměrné váze odbavených zavazadel, která podle EASA činí přibližně 16 kg, zatímco u tradičních dopravců je o 1–2 kg vyšší [19]. Příruční zavazadla u nízkonákladových dopravců jsou přísněji kontrolována, což vede k nižší průměrné váze (okolo 7 kg) ve srovnání s FSC [19]. Tento model umožňuje efektivní provoz na krátkých a středních trasách, přičemž cestující často volí minimální množství zavazadel.

Charterové lety

Charterové lety jsou nepravidelné spoje, které si objednávají organizace, například cestovní kanceláře, pro přepravu větších skupin do specifických destinací. Cestující na těchto letech obvykle přepravují více odbavených zavazadel, přičemž průměrná váha kufrů se pohybuje mezi 18–20 kg, což je více než u pravidelných letů [20]. Zpráva EASA potvrzuje,

že u nepravidelných (charterových) letů je průměrná váha odbavených zavazadel vyšší než u pravidelných letů, a to v průměru o 2–3 kg, což odráží potřebu většího množství osobních věcí pro dovolenkové cesty [19]. Charterové lety jsou zaměřeny na turistické oblasti a často využívají menší letiště, aby cestující byli dopraveni co nejdříve k cílové destinaci [18].

Speciální lety

Speciální lety zahrnují různé typy přeprav, například humanitární mise nebo VIP přepravy. Tyto lety nemají standardizované parametry pro hmotnost zavazadel a cestujících. Hodnoty jsou přizpůsobeny konkrétním požadavkům dané mise. V některých případech se provádí individuální vážení pasažérů a zavazadel pro přesnější výpočty [18]. Zpráva EASA neobsahuje specifická data o speciálních letech, ale zdůrazňuje potřebu flexibility při stanovování hmotnostních standardů pro nestandardní operace [19].

5.2 Změna v průměrné hmotnosti populace

V posledních desetiletích dochází k významným změnám v průměrné tělesné hmotnosti populace, což má přímý dopad na letectví. Studie *The Effects of Changing Passenger Weight on Aircraft Flight Performance* [17] uvádí, že hmotnost cestujících postupně narůstá, přičemž tento trend je patrný ve většině vyspělých zemí. Tento vývoj je dán zejména změnou životního stylu, stravovacích návyků a sníženou fyzickou aktivitou.

Statistická data ukazují, že průměrná tělesná hmotnost cestujících vzrostla za posledních několik desetiletí o 5–10 %. Tento nárůst se liší podle geografických oblastí, přičemž nejvýraznější změny jsou patrné v Severní Americe a Evropě. V některých regionech se průměrná hmotnost zvýšila až o 15 % oproti hodnotám, které byly standardizovány v minulosti a stále se používají při výpočtech v letectví [21]. Podle zprávy EASA z roku 2022 však v Evropě nedošlo k výraznému nárůstu průměrné hmotnosti cestujících ve srovnání s předchozími studii z let 2008–2009. Průměrná váha dospělých cestujících dosahuje 84 kg (90 kg pro muže, 75 kg pro ženy), což je pouze mírné zvýšení oproti 83,8 kg v roce 2009 [19]. Tento menší nárůst může být ovlivněn faktory, jako je pandemie COVID-19, která změnila složení cestujících (např. méně obchodních cest), nebo další faktory.

Zpráva EASA z roku 2022 dále zdůrazňuje, že přes trendy zvyšující se obezity v Evropě, jak uvádí WHO (59 % dospělých v Evropě trpí nadváhou nebo je obézní) [21], se změny v průměrné hmotnosti cestujících neprojeví tak výrazně, jak se očekávalo. To může být způsobeno tím, že letecká populace není plně reprezentativní pro celkovou populaci, protože zahrnuje spíše aktivní a mobilní jedince. Nicméně pravidelné aktualizace hmotnostních standardů jsou nezbytné, aby odrážely dlouhodobé trendy [19].

Různá tělesná hmotnost cestujících se promítá také do komfortu a uspořádání kabiny, což je zvláště patrné v souvislosti s rostoucí průměrnou hmotností populace. Letecké společnosti jsou nuceny přizpůsobovat velikost sedadel a konfiguraci interiéru podle cílového trhu, aby vyhověly antropometrickým potřebám cestujících. Zatímco v Evropě jsou standardní sedadla s roztečí 30–32 palců často dostatečná, v oblastech s vyšší průměrnou hmotností a většími tělesnými proporcemi, jako jsou lety mezi Severní Amerikou a Pacifikem, je větší tlak na širší sedadla a větší rozestupy mezi sedadly, ideálně 34–40 palců, což odpovídá optimálnímu komfortu dle antropometrických studií [22, 19]. Například v Severní Americe, kde 42 % dospělých trpí obezitou [21], tradiční dopravci (FSC), jako je

United Airlines, často nabízejí na trasách, jako je Los Angeles–Tokio, ekonomickou plus třídu s roztečí až 36 palců, aby zajistili vyšší komfort [22]. Tyto úpravy nejen zlepšují pohodlu cestujících, ale také reagují na zvýšené nároky na přesné hmotnostní odhady, které jsou klíčové pro bezpečnost letu a optimalizaci spotřeby paliva [19]. Tento trend je zvláště výrazný na dlouhých trasách, kde je komfort prioritou a kde rozdíly v tělesné hmotnosti a proporcích cestujících vyžadují specifické úpravy kabiny.

5.3 Geografie a etnický vliv

Letecká doprava čelí rozdílům v průměrné hmotnosti cestujících, které jsou ovlivněny geografickými a etnickými faktory. Výzkum Ceesa Bila a Grega Hanlona, prezentovaný na 30. kongresu ICAS v roce 2016, ukázal, že mezi různými regiony existují výrazné rozdíly, přičemž tělesná hmotnost cestujících může kolísat až o 20 kg v závislosti na původu [23]. Studie provedené v asijsko-pacifickém regionu se zaměřily na populaci jihovýchodní Asie, Austrálie, Nového Zélandu a Pacifických ostrovů. Výsledky ukázaly, že cestující pocházející z Pacifických ostrovů vykazují významně vyšší průměrnou hmotnost než lidé z jihovýchodní Asie, což se odráží i v plánování leteckého provozu a výpočtech hmotnostních standardů.

Zpráva EASA z roku 2022 sice nezahrnuje podrobnou analýzu etnických rozdílů, ale potvrzuje regionální variabilitu v hmotnosti cestujících v rámci Evropy. Například na letištích v jižní Evropě (např. Atény, Sofie) byly pozorovány mírně nižší průměrné váhy cestujících ve srovnání se severoevropskými letišti (např. Kodaň, Brusel), což může být spojeno s rozdíly v životním stylu a tělesné konstituci [19]. Tyto rozdíly zdůrazňují potřebu regionálně specifických hmotnostních standardů, zejména pro lety s mezinárodními trasami, kde se mísí cestující z různých geografických oblastí.

Tabulka 18: Průměrné hmotnosti mužů a žen podle regionů [24]

| Region | Průměrná hmotnost muže (kg) | Průměrná hmotnost ženy (kg) |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| západní Evropa | 84,2 kg | 68,9 kg |
| Severní Amerika | 88,6 kg | 76,8 kg |
| jihovýchodní Asie | 64,9 kg | 59,2 kg |
| jižní Afrika | 70,1 kg | 74,0 kg |
| Oceánie (Polynésie) | 95,5 kg | 89,2 kg |

Geografické rozdíly jsou ovlivněny několika faktory, včetně životního stylu, genetických predispozic a kulturních návyků. Například v Severní Americe je průměrná hmotnost mužů oproti Evropě vyšší o několik kilogramů [24]. Vliv těchto rozdílů na leteckou dopravu není zanedbatelný. Standardní hmotnostní tabulky, které aerolinky používají pro plánování letů, musí reflektovat skutečné hodnoty cestujících v daném regionu.

Různá tělesná hmotnost cestujících se promítá také do komfortu a uspořádání kabiny. Letecké společnosti musí přizpůsobovat velikost sedadel a konfiguraci interiéru na základě cílového trhu. Zatímco v některých regionech jsou standardní sedadla plně vyhovující, v oblastech s vyšší průměrnou hmotností cestujících se objevuje tlak na větší rozestupy mezi sedadly, ale také širší konstrukci sedadel. To se týká zejména letů mezi Severní Amerikou a Pacifikem, kde jsou tyto rozdíly nejvýraznější.

5.4 Sezónní a pohlavní rozdíly

Dalším faktorem ovlivňujícím hmotnost cestujících je sezónnost letu a pohlaví. Zpráva EASA z roku 2022 ukazuje, že váha cestujících (včetně příručních zavazadel) je v zimě vyšší o přibližně 3 kg ve srovnání s létem, což je způsobeno těžším oblečením a případně větším množstvím příručních zavazadel [19]. Například průměrná váha mužů včetně příručních zavazadel dosahuje v zimě 92,6 kg, zatímco v létě 87,2 kg. U žen je tento rozdíl menší (76,2 kg v zimě vs. 73,5 kg v létě), ale stále patrný.

Rozdíly podle pohlaví jsou rovněž významné. Muži mají průměrnou váhu o přibližně 15 kg vyšší než ženy (90 kg vs. 75 kg), což je konzistentní s obecnými populačními trendy [19]. Tento rozdíl se projevuje i v hmotnosti příručních zavazadel, kde muži mají tendenci přepravovat těžší zavazadla (průměr 7,6–8,1 kg) ve srovnání s ženami (7,0–7,9 kg). Zpráva doporučuje zavést standardní váhy rozlišené podle pohlaví a sezóny, aby byly výpočty hmotnosti a vyvážení přesnější [19].

5.5 Zavazadla

Letecké společnosti používají pro určení hmotnosti odbavených zavazadel dvě základní metody. První metodou je stanovení skutečné hmotnosti, kdy se každé zavazadlo při odbavení váží na pásu vybaveném vahou. Druhou možností je využití standardizovaných hodnot založených na průměrné váze jednoho kusu zavazadla, což zjednodušuje proces, přičemž vážicí pás slouží ke kontrole maximální povolené hmotnosti.

Maximální hmotnosti zavazadel jsou stanoveny z důvodů bezpečnosti, stability letadla, ale také ochrany zdraví pozemního personálu. Podle studie až jeden z dvanácti pracovníků manipulujících se zavazadly utrpí ročně poranění zad, navíc se toto riziko stupňuje zejména při práci v úzkotrupých letadlech, jako je například Boeing 737-800 [25]. V souvislosti s maximální povolenou hmotností je důležité rozlišovat mezi dvěma limity. Bezpečnostní limit, který nelze překročit kvůli pravidlům letecké bezpečnosti, a komerční limit stanovený tarifními podmínkami společnosti, jehož překročení může být zpoplatněno.

Zpráva EASA z roku 2022 poskytuje podrobné údaje o hmotnosti zavazadel. Průměrná váha odbavených zavazadel dosahuje 16 kg, což je pokles o 1 kg oproti předchozí studii z roku 2009, pravděpodobně kvůli přísnějším váhovým limitům a poplatkům za nadváhu [19]. Naopak příruční zavazadla vykazují nárůst váhy, s průměrem 7,3 kg v létě a 7,9 kg v zimě, což je výrazně více než 6,1 kg v roce 2009. Tento trend je spojen s rostoucí tendencí cestujících maximalizovat příruční zavazadla kvůli poplatkům za odbavená zavazadla, zejména u nízkonákladových dopravců [19]. Například u společností jako je Lufthansa je povolená váha příručních zavazadel v ekonomické třídě 8 kg, zatímco u nízkonákladových dopravců (např: Ryanair) je limit často nižší (7–10 kg) [19].

Dalším faktorem ovlivňujícím hmotnost zavazadel je sezónnost. V zimní sezóně jsou příruční zavazadla těžší (o cca 0,6 kg), což je pravděpodobně způsobeno přepravou těžšího oblečení a dalších sezónních předmětů [19]. Tento sezónní rozdíl zdůrazňuje potřebu zohlednit sezónní standardy při výpočtech hmotnosti a vyvážení letadel.

5.6 Dopad na polohu centráže

Určení standardizované hmotnosti cestujících a zavazadel je s ohledem na různé odchylky a faktory jako jsou regionální rozdíly v tělesné hmotnosti, sezónní změny v množství zavazadel nebo složení cestujících velmi obtížné. Přesto je použití standardních hmotnostních odhadů nejjednodušší a nejekonomičtější způsob pro výpočty centráže, i když vyžaduje zvýšenou obezřetnost [19]. Proto nejen EASA pravidelně aktualizuje tyto standardy, aby zohlednily trendy, především nárůst průměrné hmotnosti populace.

Zpráva EASA naznačuje, že 2% nárůst celkové hmotnosti (např. kvůli podcenění váhy cestujících nebo zavazadel) může prodloužit potřebnou vzletovou dráhu o 4 % a přistávací dráhu o 2 % [19]. Pro Boeing 737-800, jehož standardní vzletová dráha je přibližně 2 000–2 500 m (v závislosti na podmínkách), by to znamenalo prodloužení o 80–100 m, což na letištích s krátkými drahami nebo při vysokých teplotách může být problém.

Při výpočtu polohy centráže je třeba zohlednit rozmístění cestujících a zavazadel. Například vyšší váha příručních zavazadel, která jsou uložena v kabinových schránkách (obvykle v přední a střední části letadla), může posunout těžiště směrem dopředu. Naopak těžší odbavená zavazadla v zadním nákladovém prostoru mohou těžiště posunout dozadu. Zpráva EASA zdůrazňuje, že přesné vážení odbavených zavazadel je běžnou praxí, ale příruční zavazadla jsou často podceňována, což může vést k odchylkám v poloze centráže [19].

Pro ilustraci: pokud by průměrná váha cestujícího včetně příručních zavazadel byla podceňena o 3 kg (např. 81 kg namísto skutečných 84 kg), u plně obsazeného Boeingu 737-800 s 189 cestujícími by celková hmotnostní odchylka činila 567 kg. Tato odchylka by mohla posunout těžiště o několik procent délky střední aerodynamické tětiny, což by vyžadovalo úpravu vyvážení, například přemístěním zavazadel nebo paliva. Zpráva doporučuje zavést sezónní a pohlavní standardy, aby se tyto odchylky minimalizovaly [19].

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zpracovat a popsat postup výpočtu centráže dopravního letounu Boeing 737 klasickou metodou a na základě dostupných podkladů stanovit možné odchylky v poloze centráže způsobené variabilitou hmotnosti cestujících a různou obsazeností letounu. Práce rovněž reaguje na aktuální tendence některých leteckých společností, které z důvodu přesnějšího plánování zavádějí dobrovolné vážení cestujících.

Z výsledků bakalářské práce vyplývá, že k odchylkám ve výpočtech hmotnosti a centráže může dojít poměrně snadno. Již samotné porovnání dvou výpočetních metod v kapitole 2 ukazuje, že grafická metoda je výrazně náchylnější k nepřesnostem. Dokumenty typu Load and Trim Sheet, například u Turkish Airlines, ale i u dalších dopravců, připouštějí značnou míru chyb způsobených především lidským faktorem. V tomto ohledu je numerická metoda, která se používá s využitím výpočetní techniky, řádově přesnější a vhodnější pro použití v provozu.

Jak bylo dále ukázáno v kapitole 3, problematika obsazenosti letounu a rozložení hmotnosti je velmi citlivá a vyžaduje zvýšenou pozornost. Přesto je však z důvodu provozních podmínek vyvíjen tlak na rychlé odbavení letadel, což vede k tomu, že přesnost ustupuje efektivitě. Proto se v praxi používá rozdělení kabiny na zóny sedadel, rozdělení podpalubních prostor na čtyři sekce nebo zjednodušené zohlednění momentu cateringových zásob a jiných položek.

Kapitola 4 se věnovala otázce standardizovaných tabulkových hodnot hmotnosti cestujících a zavazadel. Bylo prokázáno, že stanovení těchto hodnot je detailně regulováno a předpisy kladou důraz na co nejpřesnější odhad průměrných hmotností. Průzkum provedený v rámci práce ukázal určitou shodu s hodnotami definovanými Evropskou agenturou pro bezpečnost letectví. Je však třeba přihlídnout k jeho omezenému rozsahu (90 respondentů) a specifickému složení vzorku, zejména s ohledem na nižší průměrný věk účastníků.

V kapitole 5 byla pozornost věnována konkrétním faktorům, které mohou způsobovat odchylky v hmotnosti cestujících a zavazadel a tím ovlivňovat centráž letounu. Ukázalo se, že množství těchto proměnných je natolik rozsáhlé, že sestavení jednoznačného souhrnu a přesného vyjádření jejich vlivu je velmi obtížné. Jedním z aspektů, u kterého lze alespoň částečně předvídat rozdíly, je typ letu nebo geografický původ cestujícího. Například na základě destinace lze odhadnout profil cestujících a tím jejich předpokládanou hmotnost a množství zavazadel.

Zatímco v evropském prostoru se většinou uplatňují průměrné hodnoty definované agenturou EASA, v Severní Americe stanovuje úřad FAA průměrné hmotnosti poněkud vyšší. Naopak v oblasti jihovýchodní Asie jsou obvykle používány nižší průměrné hodnoty. Tyto rozdíly částečně odrážejí tělesné charakteristiky jednotlivých etnických skupin. I přes tuto skutečnost však v současné době není možné rozlišovat průměrnou hmotnost cestujících podle etnického původu při odbavení.

Často se také uvádí, že průměrná tělesná hmotnost populace narůstá a výskyt obezity stoupá. Podle analýzy EASA se však tyto trendy dosud výrazněji neprojevíly ve změnách průměrných hodnot používaných pro výpočty v letectví.

Ačkoliv výpočty centráže využívají standardizované hodnoty, které zjednodušují provoz a zajišťují efektivitu, jejich přesnost je ovlivněna řadou proměnných. Práce ukázala, že i malé odchylky v hmotnosti cestujících nebo jejich rozmístění mohou mít znatelný dopad na polohu těžiště letounu, a tím i na jeho výkon a bezpečnost. Je proto důležité

chápat tato rizika a přistupovat ke stanovení hmotnostních údajů s dostatečnou mírou pozornosti.

I kdyby byly k dispozici přesné údaje o hmotnosti jednotlivých cestujících, vyvstává otázka, zda i ostatní parametry (například délka momentového ramene k jednotlivým zónám nebo k podpalubním prostorům vzhledem k určitému zatížení) jsou určeny s dostatečnou přesností. Z důvodu efektivity, ale i ochrany osobních údajů je dle mého názoru plošné zavedení vážení cestujících obtížně dosažitelné.

Seznam použitých zdrojů

- [1] DANĚK, Vladimír. *Mechanika letu. II, Letové vlastnosti*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2021. ISBN 978-80-7623-059-0.
- [2] DANĚK, Vladimír; FILAKOVSKÝ, Karol. *Základy letu (081 00)*. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-7204-449-4.
- [3] FEHRM, Bjorn. *Bjorn's Corner: Pitch stability, Part 5*. Leeham News a Analysis, 2019. Dostupné také z: <https://leehamnews.com/2019/01/11/bjorns-corner-pitch-stability-part-5/>. [cit. 2025-05-16].
- [4] CHMELÍK, Jakub. *Hmotnost a vyvážení*. Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-7204-438-9.
- [5] CHARALAMBOUS, Varnis. *Final Year Project: Aerodynamic Properties of a Wing-Only Aircraft*. 2013. Dostupné z DOI: [10.13140/RG.2.2.14416.84486](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14416.84486). Dis. pr. School of Aeronautical, Civil a Mechanical Engineering.
- [6] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. *Dangerous Goods Regulations* [Online]. 54th Edition. Montreal – Geneva: International Air Transport Association, 2013. ISBN 978-92-9233-786-5. Produced in consultation with ICAO. Effective 1 January – 31 December 2013.
- [7] EASA. *Air Operation: Easy Access Rules for Air Operations* [Online]. Cologne, Germany, 2025-02. Tech. zpr. European Union Aviation Safety Agency.
- [8] WILLIAMS, Ryan. *How Many Miles Per Gallon Does A Commercial Aircraft Get?* [Online]. London: Simple Flying, 2025-04. Dostupné také z: <https://simpleflying.com/miles-per-gallon-commercial-aircraft/>. [cit. 2025-05-16].
- [9] TURKISH-AIRLINES. *AHM565 / B737-800* [Online]. Istanbul, Turkey, 2021-02. Tech. zpr. Turkish Airlines Inc.
- [10] FLYDUBAI. *Weight and Balance Control and Loading Manual: Boeing 737-800* [Online]. Dubai, United Arab Emirates, 2017. Tech. zpr. Flydubai. Boeing Document No. D043A580-JXB1, Revision No: 23, Jan 18, 2017.
- [11] BROWN, Justin. *How The Early Boeing 737 Models Were Developed* [Online]. London: Simple Flying, 2024. Dostupné také z: <https://simpleflying.com/boeing-737-early-model-development-history/>. [cit. 2025-05-01].
- [12] BOEING. *737 Next Generation Design Highlights* [Online]. Seattle: The Boeing Company, 2024. Dostupné také z: <https://www.boeing.com/commercial/737ng/737-next-generation-design-highlights>. [cit. 2025-05-01].
- [13] STURT, Tobias. *The 737 Platform* [Online]. Medium, 2021. Dostupné také z: <https://medium.com/ingeniouslysimple/the-737-platform-ff811ce6830d>. [cit. 2025-05-16].
- [14] SMARTWINGS. *AHM560 / B737-800*. 2023. Tech. zpr. Smartwings Group. Interní dokumenty.

- [15] FAA. *Aircraft Weight and Balance Handbook (FAA-H-8083-1B)* [Online]. Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2016.
- [16] AEROCHAPTER. *Ukraine Airlines Boeing 737-900 tail tip incident*. 2021. Dostupné také z: <http://aerochapter.com/aero-guide.php?sub=24>. [cit. 2025-05-01].
- [17] MELIS, Damien J.; SILVA, Jose M.; SILVESTRE, Miguel A.; YEUNG, Richard. The Effects of Changing Passenger Weight on Aircraft Flight Performance. *Journal of Transport & Health*. 2019.
- [18] LUNAGROUP-CHARTER. *Charter Flights vs Scheduled Flights: Differences*. 2025. Dostupné také z: <https://www.lunagroupcharter.com/en-gb/news/charter-flights-vs-scheduled-flights-differences>. [cit. 2025-05-02].
- [19] LUFTHANSA CONSULTING, EASA. *Review of Standard Passenger Weights* [Online]. Cologne, Germany, 2022-10. Tech. zpr. European Union Aviation Safety Agency.
- [20] CASTILLO-MANZANO, Jose; LÓPEZ-VALPUESTA, Lourdes. Research Note: Who is the Charter Passenger? Characteristics and Attitudes of the Least-Known Passenger. *Tourism Economics*. 2014, roč. 21. Dostupné z DOI: [10.5367/te.2014.0395](https://doi.org/10.5367/te.2014.0395).
- [21] ORGANIZATION, World Health. *Obesity and Overweight Fact Sheet* [Online]. Geneva, 2025. Dostupné také z: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight>. [cit. 2025-05-09].
- [22] KREMSER, Florian; GUENZKOFER, Fabian; SEDLMEIER, Claudia; SABBAH, Olaf; BENGLER, Klaus. Aircraft seating comfort: The influence of seat pitch on passengers' well-being. *Work*. 2012, roč. 41. Dostupné z DOI: [10.3233/WOR-2012-0789-4936](https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0789-4936).
- [23] BIL, Cees; HANLIN, Greg. Influence of Ethnicity on Passenger Standard Weight. In: *Proceedings of the 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*. Daejeon, South Korea: ICAS, 2016.
- [24] WORLDDATA. *Average body height by country and area* [Online]. WorldData, 2025. Dostupné také z: <https://www.worlddata.info/average-bodyheight.php>. [cit. 2025-05-01].
- [25] KORKMAZ, Sahika Vatan; HOYLE, Jeff A.; KNAPIK, Greg G.; SPLITTSTOESSER, Riley E.; YANG, Gang; TRIPPANY, David R.; LAHOTI, Parul; SOMMERICH, Carolyn M.; LAVENDER, Steven A.; MARRAS, William S. Baggage handling in an airplane cargo hold: An ergonomic intervention study. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2006, č. 4. Dostupné z DOI: [10.1016/j.ergon.2005.12.003](https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.12.003).

Seznam použitých zkratek a symbolů

| Zkratka | Význam (anglicky) | Význam (česky) |
|---------|---------------------------------------|---|
| AHM | Airport Handling Manual | Příručka odbavení letadla |
| CG | Center of Gravity | Těžiště |
| DCS | Departure Control System | Software odbavení letadla |
| DOI | Dry Operating Index | Index prázdného letadla |
| DOW | Dry Operating Weight | Hmotnost prázdného letadla |
| EASA | European Union Aviation Safety Agency | Agentura Evropské unie pro bezpečnost v letectví |
| FAA | Federal Aviation Administration | Federální letecká správa |
| LILAW | Load Index at Landing Weight | Index zatížení při přistávací hmotnosti |
| LITOW | Load Index at Takeoff Weight | Index zatížení při vzletové hmotnosti |
| LIZFW | Load Index at Zero Fuel Weight | Index zatížení při hmotnosti bez paliva |
| LMC | Last Minute Changes | Poslední změny |
| LW | Landing Weight | Přistávací hmotnost |
| MAC | Mean Aerodynamic Chord | Střední aerodynamická tětíva |
| MLW | Maximum Landing Weight | Maximální přistávací hmotnost |
| MTOW | Maximum Takeoff Weight | Maximální vzletová hmotnost |
| MZFW | Maximum Zero Fuel Weight | Maximální hmotnost bez paliva |
| TOW | Takeoff Weight | Vzletová hmotnost |
| WHO | World Health Organization | Světová zdravotnická organizace |
| ZFW | Zero Fuel Weight | Hmotnost bez paliva |
| FSC | Full-Service Carrier | Tradiční dopravce s plným servisem |
| LCC | Low-Cost Carrier | Nízkonákladový dopravce |

| Symbol | Rozměr | Veličina |
|------------|--------|--|
| C | [-] | konstanta pro převod momentů na index |
| F | [N] | síla |
| I | [-] | index (např. index paliva) |
| K | [-] | konstanta pro eliminaci záporných hodnot indexu |
| $LEMAC$ | [in] | vzdálenost náběžné hrany MAC od referenční roviny |
| m | [kg] | hmotnost |
| M | [Nm] | moment |
| MAC | [in] | délka střední aerodynamické tětiny |
| $Ref.Sta.$ | [in] | referenční rovina (vzdálenost od nuly) |
| $Sta.$ | [in] | vzdálenost působiště zatížení od referenčního bodu |
| W | [kg] | hmotnost zatížení |
| $\%MAC$ | [%] | poloha těžiště v procentech střední aerodynamické tětiny |