



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta dopravní
Ústav letecké dopravy**

Závislost spotřeby paliva na poloze těžiště

Fuel Consumption Based on Position of CG

bakalářská práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích
Studijní obor: Profesionální pilot

Vedoucí práce: Ing. Ota Hajzler
Doc. Ing. Bc. Jakub Hospodka, Ph.D.

Martina Čechalová

Praha 2016



K621..... Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Martina Čechalová

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Závislost spotřeby paliva na poloze těžiště**

Název tématu (anglicky): Fuel Consumption Based on Position of CG

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Vymezení základních pojmů
- Formuláře pro hmotnost a vyvážení
- Určení optimální polohy těžiště
- Nakládací instrukce



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Jeppesen EASA ATPL Mass and Balance
Jeppesen JAA ATPL Mass and Balance
CERM Hmotnost a vyvážení
Aircraft Weight and Balance Handbook
Flight Crew Training Manual B738

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Bc. Jakub Hospodka, Ph.D.**

Datum zadání bakalářské práce: **25. října 2015**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **30. listopadu 2016**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

.....
doc. Ing. Stanislav Szabo, PhD. MBA
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



.....
prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

.....
Martina Čechalová
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 25. září 2016

Poděkování

Největší poděkování patří vedoucímu této bakalářské práce Ing. Otovi Hajzlerovi za jeho čas, rady a připomínky v průběhu tvoření práce a díky jehož nadšení a stylu výuky se stal předmět Hmotnost a vyvážení mým oblíbeným. Velký dík patří také doc. Ing. Bc. Jakobovi Hospodkovi, Ph.D. za korekce a doc. Ing. Ivanu Nagyovi CSc., který mi byl nápomocen při statistickém vyhodnocování dat.

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně, a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 30.11.2016

Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

ZÁVISLOST SPOTŘEBY PALIVA NA POLOZE TĚŽIŠTĚ

Bakalářská práce

listopad 2016

Martina Čechalová

Abstrakt

V této práci jsem se zaměřila na zkoumání závislosti spotřeby paliva na poloze těžiště.

Ke zkoumání závislosti těchto dvou veličin byla použita statistická metoda, konkrétně pak lineární regrese. Ke zpracování dat bylo použito programů Excel a Scilab.

Provedenou analýzou dat jsem úspěšně dokázala předpoklad, že spotřeba paliva klesá s posunem těžiště dozadu.

Na základě tohoto potvrzeného předpokladu a podrobnější studie si myslím, že by se dalo více zefektivnit nakládání dopravních letadel z pohledu právě spotřeby paliva.

Abstract

The subject of this thesis was to explore the effect of the position of center of gravity on the fuel consumption.

The investigation of dependence of these two variables was done using the statistical method linear regression. Software Microsoft Excel and Scilab were used to process the data.

Using this analysis, I have successfully managed to prove the assumption that fuel consumption decreases with the shift of the center of gravity backwards.

Based on this assumption and more detailed study, I think the management of loading aircraft in terms of fuel consumption could be more efficient.

Klíčová slova

Těžiště, Spotřeba paliva, Hmotnost a vyvážení, Nakládání letadel, Handling, Loadsheet, Lineární regrese

Keywords

Center of gravity, Fuel consumption, Weight and balance, Loading aircraft, Handling, Linear regression

Obsah

| | |
|--|----|
| Obsah | 9 |
| Seznam použitých zkratk | 10 |
| Úvod..... | 11 |
| 1. Vymezení základních pojmů | 12 |
| 1.1 Myšlené body | 12 |
| 1.1.1 Střední aerodynamická tětíva | 12 |
| 1.1.2 Těžiště..... | 13 |
| 1.1.3 Aerodynamický střed | 13 |
| 1.1.4 Neutrální bod..... | 16 |
| 1.2 Centráž | 16 |
| 1.2.1 Přední centráž..... | 17 |
| 1.2.2 Zadní centráž | 17 |
| 1.3 Hmotnosti letadel..... | 18 |
| 1.3.1 Basic Weight | 18 |
| 1.3.2 Dry Operating Weight | 18 |
| 1.3.3 Zero Fuel Weight | 18 |
| 1.3.4 Landing Weight..... | 19 |
| 1.3.5 Take off Weight..... | 19 |
| 1.4 Účinky přetížení..... | 21 |
| 1.5 Řešení přetížení | 21 |
| 2. Formuláře pro hmotnost a vyvážení | 23 |
| 2.1 Palivové figury | 23 |
| 2.2 Loadsheet..... | 23 |
| 2.2.1 Palivo..... | 27 |
| 3. Nakládací instrukce | 29 |
| 3.1 Nakládací instrukce pro standardní vyvážení..... | 29 |
| 3.2 Nakládací instrukce pro optimální vyvážení | 32 |
| 4. Určení optimální polohy těžiště | 34 |
| 4.1 Statistické metody | 34 |
| 4.1.1 Korelace | 34 |
| 4.1.2 Lineární regrese..... | 35 |
| 4.1.3 Korelace vs. Regrese | 36 |
| 4.2 Vyhodnocení dat | 36 |
| 4.2.1 Použitá data | 37 |
| 4.2.2 Zpracování dat..... | 37 |
| Závěr..... | 42 |
| Použité zdroje | 44 |
| Seznam obrázků..... | 46 |

Seznam použitých zkratk

| | | |
|--------|---|---|
| AAL | Above aerodrome level | Nad úrovní letiště |
| ADF | Additional Fuel | Přídavné palivo |
| ALF | Alternate Fuel | Palivo na záložní letiště |
| BW | Basic Weight | Základní hmotnost |
| CGF | Contingency Fuel | Palivo pro další spotřebu způsobenou např. větrem, změnou trati či povolení ATC |
| CPT | Compartment | část zavazadlového prostoru |
| CG | Center of Gravity | Těžiště |
| DA/MDA | Decision/Minimum Descent Altitude | Výška rozhodnutí |
| DOW | Dry Operating Weight | Hmotnost letounu bez paliva |
| F/O | First Officer | První důstojník |
| FRF | Final Reserve Fuel | Konečná rezerva paliva |
| IATA | International Air Transport Association | Mezinárodní asociace leteckých dopravců |
| LAW | Landing Weight | Přistávací hmotnost |
| LIRF | Loading Instruction Report Form | Nakládací instrukce |
| LMC | Last Minute Change | Možnost změnit určité údaje na load-sheetu bez nutnosti tisku nového |
| MAC | Mean Aerodynamic Chord | Střední aerodynamická tětíva |
| OFP | Operation Flight Plan | |
| ŘLP | | Řízení letového provozu |
| SID | Standard Instrument Departure | Standardní postup odletu podle přístrojů |
| STAR | Standard Instrument Arrival | Standardní postup příletu podle přístrojů |
| TIF | Trip Fuel | Traťové palivo |
| TOD | Top of Descent | Bod, ve kterém zahájíme klesání |
| TOW | Take-off Weight | Vzletová hmotnost |
| TXF | Taxi Fuel | Palivo určené pro pojíždění |
| ZFW | Zero Fuel Weight | Hmotnost letounu včetně payloadu, ale bez paliva |

Úvod

Hmotnost a vyvážení je jednou z nejdůležitějších součástí předletové přípravy. Pro bezpečné provedení letu je nutností, aby byly dodrženy limity jak hmotnosti, tak polohy těžiště, a to v každé části letu.

Polohou těžiště jsme také schopni ovlivnit říditelnost letounu, letové vlastnosti a z pohledu této práce hlavně spotřebu paliva.

K zpracování tohoto tématu mě vedla zkušenost handling a ramp agenta, kdy mi pod rukama prošly stovky loadsheetů a já si tak mohla všimnout poměrně velkého rozdílu v poloze CG. Napadlo mě, zda by se dalo ušetřit palivo přesnějším rozmístěním cestujících a zavazadel, popř. carga či pošty.

Předmětem mé bakalářské práce je tedy zkoumání závislosti spotřeby paliva na poloze CG a za cíl si kladu důkaz klesající spotřeby paliva s posunem těžiště vzad.

Aby byl výsledek práce co nejpřesnější, snažila jsem se eliminovat faktory jako je genderové rozdělení a typ cestujících, jejich příruční zavazadla a z toho pramenící rozpor mezi použitými a skutečnými hmotnostmi, dále rozdíl hmotností jednotlivých kusů letounů. Proto je praktická část zaměřena na linku PRG-TLV a letoun Boeing 737-800.

1. Vymezení základních pojmů

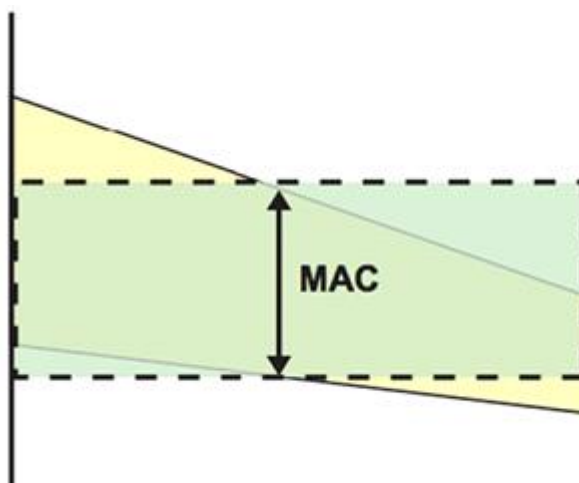
V první kapitole bych ráda zmínila základní pojmy týkající se předmětu Hmotnost a vyváženosti. Z mého pohledu je důležité definovat pojmy, se kterými budeme dále pracovat. Dalším důvodem je sjednocení znalostí čtenáře, kterému by pravděpodobně nedávala smysl praktická část bez předchozího studia.

1.1 Myšlené body

Myšleným bodem rozumíme místo, kterým buď nahrazujeme velký celek, ať už kvůli zanedbání tvaru, rozměrů nebo do něj umístíme působíště síly či momentu kvůli zjednodušení.

1.1.1 Střední aerodynamická tětíva

Střední aerodynamická tětíva (angl. MAC – Mean Aerodynamic Chord) je taková hloubka křídla libovolného půdorysu, která je ekvivalentní hloubce profilu obdélníkového křídla a má stejnou plochu a klopivé momenty. [1]



Obrázek 1 - Střední aerodynamická tětíva [2]

Jinými slovy lze říci, že střední aerodynamická tětíva je řez křídlem v takovém místě rozpětí, kde profil právě v tomto řezu udává vlastnosti celého křídla.

1.1.2 Těžiště

Poloha těžiště je dána rozložením látky v tělese. Těžiště tuhého tělesa je definováno jako myšlený bod – působíště tíhové síly, která na těleso působí. [3]

Polohu těžiště určujeme vzhledem k podélné ose letounu, většinou v procentech střední aerodynamické tětiny. [3] [8]

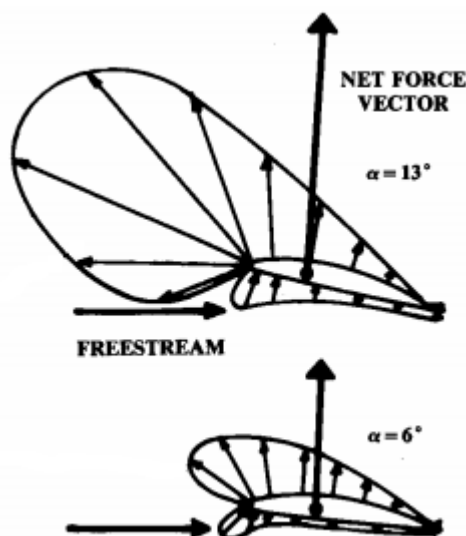
Poloha těžiště není pevně dána, ale mění se v průběhu letu. Tato změna je dána mnoha faktory, které posun těžiště ovlivňují více či méně. Hlavní příčinou změny polohy těžiště je úbytek paliva. Šípovitost křídla letounu B738 má za následek posun těžiště dopředu. Důvodem je úbytek paliva od konců křídla, které jsou více vzadu než část křídla u trupu letounu.

1.1.3 Aerodynamický střed

Pro jeden konkrétní úhel náběhu existuje jedno konkrétní místo, kde působí vztlaková síla. Z toho vyplývá, že se s měnícím úhlem náběhu nemění pouze velikost, ale také působíště vztlaku. Dále existuje jeden úhel náběhu, pro který je vztlak nulový. Ve skutečnosti jde však o dvojici sil. Takto vzniklá dvojice sil vytváří moment. [4]

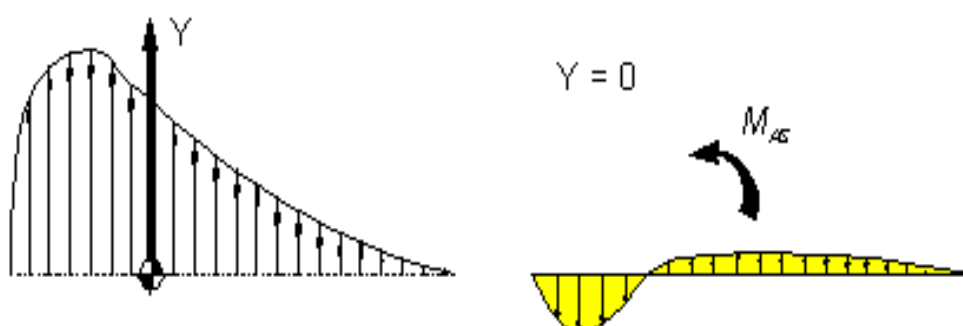
Na profilu existuje ještě jeden bod. Jedná se o tzv. aerodynamický střed. Tento bod je charakteristický tím, že jeho poloha zůstává stále stejná nezávisle na změně úhlu náběhu. [4]

Podívejme se nyní na rozložení sil na povrchu křídla při dvou různých úhlech náběhu.



Obrázek 2 - Rozložení sil na povrchu křídla [Zdroj: <[http://aerospace.fsik.cvut.cz/letadla1/Zatizeni%20křídla.pdf](http://aerospace.fsik.cvut.cz/letadla1/Zatizeni%20kridla.pdf)>]

Nyní sečteme v každém bodě tětiny vertikální složky působící na horní i spodní povrch křídla. Nakonec vyneseme výslednice sil v jednotlivých bodech tětiny na vodorovnou čáru, dostaneme následující průběhy a celkovou výslednici vztlaku. [4]



Obrázek 3 - Výslednice sil v jednotlivých bodech SAT [4]

Výsledná vztlková síla je tedy součtem všech elementárních sil, které působí na horní a spodní povrch křídla. Působíště je určeno těžištěm této vzniklé plochy. Jak jsem již uvedla dříve, při změně úhlu náběhu se mění velikost vztlkové síly. Se změnou úhlu náběhu

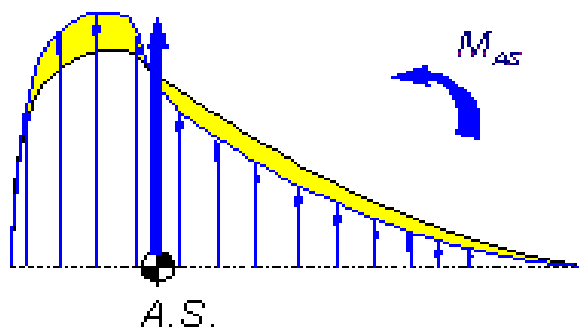
se však mění i tvar vzniklé plochy. Tím je vysvětleno, proč se mění i působíště vztlakové síly. [4]

Z pravého obrázku je vidět, že i když na křídlo působí aerodynamické síly, jejich výslednice je nulová, a právě tyto síly způsobují onen klopivý moment, který má tendenci měnit úhel náběhu. [4]

Pokud k ploše S1 přičteme a znovu odečteme plochu S2, logicky se velikost plochy S1 nezmění. Zkusme tento princip aplikovat na naše plochy výše. [4]

Žlutá plocha na obrázku vpravo má celkový obsah nulový. Z toho vyplývá, že pokud přičteme žlutou plochu z pravého obrázku k ploše z levého obrázku, neměla by se změnit velikost výslednice, ale pouze její působíště. [4]

Žlutou plochu nahradíme ekvivalentním klopivým momentem. Jakmile přičítáme plochu, která je zodpovědná za klopivý moment, výsledná plocha bude mít podobný tvar jako plocha původní. [4]



Obrázek 4 - Změna působíště síly [4]

Z toho plyne, že útvary budou tvarově podobné a změní se pouze jejich velikost.

Tím pádem se poloha těžiště se změnou úhlu náběhu nebude měnit a působíště zůstane pořád na stejném místě. Právě toto místo nazýváme aerodynamický střed. [4]

Aerodynamický střed má tu vlastnost, že do něj můžeme umístit všechny výslednice vztlaku a nahradit je jednou silou, která bude působit právě v aerodynamickém středu, a

konstantním klopivým momentem, který je shodný s momentem při nulovém vztlaku. Tento klopivý moment zůstává konstantní i při změně úhlu náběhu. Velikost vztlaku v aerodynamickém středu se samozřejmě bude měnit s úhlem náběhu. [4]

Znalost aerodynamického středu je velmi výhodné při výpočtech výkonů a vlastností aeroplánů. Dovolí nám nahradit stále se měnící polohu působíště vztlakové síly. Poloha vztlaku je tak stále v jednom místě (aerodynamický střed) a moment při nulovém vztlaku konstantní. [4]

Velikost klopivého momentu při nulovém vztlaku je závislá pouze na tvaru prohnutí profilu. Proto klasický prohnutý profil má moment záporný, tzv. na hlavu (destabilizující). Pro symetrický profil platí, že má moment nulový. [4]

Poloha aerodynamického středu je často udávána v jedné čtvrtině hloubky profilu od náběžné hrany. Ve skutečnosti však není přesně v jedné čtvrtině a ani neleží na jeho těživě. Mění se také s odtrháváním proudnic. Při úplném odtrhnutí je jeho poloha přibližně v polovině hloubky profilu křídla. [4]

1.1.4 Neutrální bod

Pro letadlo jako celek se udává tzv. neutrální bod. Ten můžeme svými vlastnostmi připodobnit k aerodynamickému středu křídla. [5]

Z definice plyne, že neutrální bod letounu je takový bod, vůči němuž je výsledná změna momentu při změně úhlu náběhu nulová. [5]

1.2 Centráž

Správná poloha těžiště je pro let velmi důležitá, a proto je třeba zajistit jeho umístění v povolených mezích ve všech fázích letu. Poloha těžiště má vliv na stabilitu, říditelnost a v neposlední řadě také na výkonnost a spotřebu paliva. Síla působící v určité vzdálenosti od těžiště vytváří otáčivý moment. Aby byl letoun v rovnovážném stavu, musí být momenty jednotlivých sil okolo těžiště stejné. [6] [7]

Pro zajištění podélné stability letounu je nutno dodržet podmínku umístění těžiště před neutrálním bodem. V opačném případě by byl letoun instabilní. [6] [7]

Těžiště tedy musí být umístěno v určitých mezích, které jsou vyjádřeny předním a zadním limitem na podélné ose letounu. Přední mezí se rozumí největší přijatelná vzdálenost mezi těžištěm a neutrálním bodem, limitována je účinností výškového kormidla. Zadní mez polohy těžiště je naopak nejmenší přijatelná vzdálenost mezi těžištěm a neutrálním bodem a v tomto případě je limitována požadavkem na statickou stabilitu. [6] [7]

1.2.1 Přední centráž

Pokud leží těžiště v blízkosti přední meze, jedná se o přední centráž. Letoun je stabilnější, ale má zhoršenou ovladatelnost. [6]

Větší klopivý moment letounu „na hlavu“ tedy musí být kompenzován zvýšením záporného vztlaku na horizontálním stabilizátoru a dojde tak ke zhoršení výkonnosti letounu. [6]

Důsledky přední centráže jsou především větší stabilita, zhoršená říditelnost, delší rozjezd (v důsledku vyšší rychlosti rotace), menší úhel náběhu (v důsledku nižší rychlosti stoupání), vyšší pádová rychlost, snížená cestovní rychlost a zvýšená spotřeba paliva (důsledkem je menší dolet a výdrž). [6]

1.2.2 Zadní centráž

Pokud leží těžiště v blízkosti zadní meze, jedná se o zadní centráž a letoun je lépe ovladatelný, ale méně stabilní. [6]

Snížený klopivý moment křídla „na hlavu“ vyžaduje menší záporný vztlak na horizontálním stabilizátoru, což se projeví na zvýšené výkonnosti letounu. [6]

Důsledky zadní centráže jsou především nižší stabilita, lepší říditelnost, kratší rozjezd (v důsledku nižší rychlosti rotace), větší úhel náběhu (v důsledku vyšší rychlosti stoupání), vyšší cestovní rychlost, *snížení spotřeby paliva* (což nám umožní větší dolet a výdrž). [6]

1.3 Hmotnosti letadel

Během procesu odbavení a během letu se mění hmotnost letounu. Pro každou takovou fázi je určena maximální povolená hmotnost, kterou letoun může mít a je velmi důležité tato maxima dodržet. Pojďme si nyní definovat jednotlivé hmotnosti

1.3.1 Basic Weight

Basic Weight (BW) podle IATA zahrnuje všechna pevná zařízení, systémové kapaliny, nevyužitelné palivo, konfigurace zařízení včetně palubní kuchyňky. Její hodnota je pak uvedena daným dopravcem v manuálu. Pokud společnost uvádí BW, musí také uvádět hmotnosti cateringu. [7]

1.3.2 Dry Operating Weight

Dry Operating Weight (DOW) zahrnuje následující položky. BW – hmotnost samotného letadla včetně všech zařizovacích předmětů (např. sedadla, kuchyň, koberce, skříňky atd.). Posádka – celá operující posádka (piloti, palubní průvodčí) včetně jejich zavazadel. Schody – pokud je letoun vybaven svými vlastními integrovanými schody, jsou také započítány do DOW. Náhradní díly – jejich množství a velikost se liší typem letounu, některé letouny s sebou vozí pouze pojistky a žárovky, jiné můžou mít zvlášť kontejner s náhradní pneumatikou a zvedákem, to je známo pod pojmem „Fly Away Kit“ nebo „Spares Bin“, nejčastěji pokud je v dané destinaci operován daný typ letounu pouze jejich společností. Voda; zahrnuje pitnou vodu a toaletu. Záchranné prostředky – to zahrnuje veškeré prostředky, které jsou určeny pro bezpečnost či záchranu života cestujících (plavací vesty, kyslíkové lahve, hasicí přístroje, čluny). Manuály – veškerá dokumentace, která musí být na palubě v průběhu letu (IATA Dangerous Goods Emergency Response Procedures Manual, Jeppesen Airways Manual, tech log). [7]

1.3.3 Zero Fuel Weight

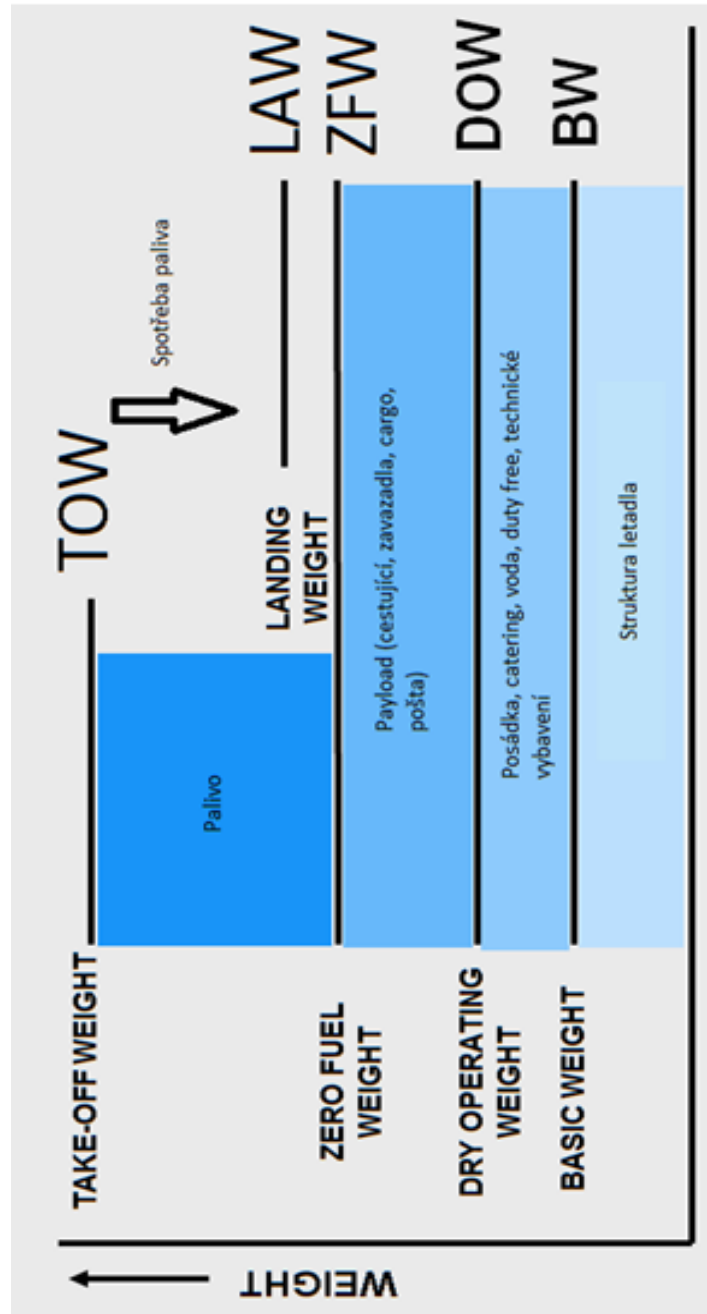
V Zero Fuel Weight (ZFW) je kromě DOW ještě zahrnut payload. Do payloadu počítáme veškeré užitečné zatížení. Tím máme na mysli váhu cestujících, jejich zavazadel včetně zavazadel příručních, které jsou součástí hmotnosti pasažéra, váhu carga a pošty. [7]

1.3.4 Landing Weight

Landing Weight (LAW) je váha přistávajícího letounu. Tím se rozumí TOW bez traťového paliva, které je spáleno během letu do destinace. [7]

1.3.5 Take off Weight

Take off Weight (TOW) je jednou z nejdůležitějších hodnot, co se týče hmotnosti a vyvážení a performance. Jde o váhu, kterou má letoun těsně před vzletem na vyčkávacím místě. Tuto váhu bereme v úvahu při počítání rychlostí a délky potřebné dráhy pro vzlet. [7]



Obrázek 5 - Hmotnosti letadel [Zdroj: přednášky]

1.4 Účinky přetížení

a) vyšší vzletová rychlost, větší délka rozjezdu

Čím těžší letadlo je, tím větší je potřebný vztlak pro jeho vzlet. Větší vztlak bude vytvářen rychlejším obtékáním profilu křídla vzduchem a tím pádem je potřeba vyšší rychlost. [6]

b) snížený gradient stoupání

Čím těžší letadlo je, tím větší je potřebný vztlak pro jeho vzlet a následné stoupání. To znamená, že rychlost stoupání letadla bude nižší, protože vztlak musí překonávat větší hmotnost. [6]

c) nižší dolet, menší vytrvalost, vyšší spotřeba paliva

Čím těžší letadlo je, tím vyšší odpor bude klást. Pro překonání tohoto odporu je třeba zvýšit potřebný tah, což povede ke zvýšené spotřebě paliva. Tím, že je letadlo schopno pojmout pouze omezené množství paliva, dolet a vytrvalost se bude zkracovat. [6]

d) vyšší přistávací rychlost, delší potřebná dráha

Pádová rychlost letadla roste s jeho rostoucí hmotností. Nutností je tedy zvýšená přistávací a vzletová rychlost. To znamená, že potřebná délka k rozjezdu a zastavení bude větší. [6]

e) horší manévrovací schopnost

Čím těžší letadlo je, tím se mu zhoršuje jeho manévrovatelnost. To je dáno tím, že síly potřebné ke změně rychlosti či směru pohybujícího se letadla rostou s hmotností. [6]

f) vyšší požadavky na účinnost brzd

Čím těžší letadlo je, tím větší přistávací a vzletová rychlost musí být. Tím roste brzdná síla k zastavení letounu. To musíme brát v potaz při úvaze, zda jsme schopni na dráze dané délky vůbec zastavit. [6]

1.5 Řešení přetížení

a) Zero Fuel Weight

Pokud je letadlo přetíženo na Zero Fuel Weight (ZFW), máme dvě možnosti. ZFW se skládá z DOW a payloadu. DOW můžeme snížit tím, že snížíme procento vody na palubě či množství cateringu. To však záleží na specifikách dané společnosti. Častějším způsobem snížení ZFW je tak vyložení části payloadu. Vykládání payloadu začíná poštou, přes cargo a na závěr může dojít i k vyložení části zavazadel cestujících. [7]

b) Take off Weight

V Take off Weight (TOW) je zahrnuta ZFW a TOF (take off fuel). Nabízí se nám tedy možnost snížit množství paliva na stojánce, ale vždy tak, aby byly zachovány požadavky na minimum paliva dle OFP. Další možností je zvýšení množství paliva pro pojiždění. Nakonec můžeme ještě snížit ZFW, jako je uvedeno v předchozím odstavci. [7]

c) Landing Weight

Landing Weight (LDW) dostaneme, když od TOW odečteme TIF¹. Nejjednodušší možností je snížení TOW, viz předchozí odstavec. Jako další možnost se nám nabízí zvýšení TIF, čímž snížíme hodnotu LDW. K takové úpravě může dojít v případě, že byl letoun již naplněn palivem a poté mu byla přiřazena jiná trať (kratší). Odčerpávání paliva je náročný proces, proto se mu snažíme vyhnout. Při této změně je nutno vytvořit nový OFP. [7]

¹ TIF – trip fuel; viz kapitola 2.2.1.2

2. Formuláře pro hmotnost a vyvážení

2.1 Palivové figury

Fuel figures (palivové figury) jsou podkladem pro agenta, potažmo load control. Na základě palivových figur pak počítá load control loadsheet.

Tyto figury vyplňuje během předletové přípravy F/O a svým podpisem potvrdí správnost údajů kapitán. Figury jsou následně předány handling agentovi, který údaje předá load controlu.

Palivové figury by měly obsahovat následující údaje. Číslo letu, registraci letadla, konfiguraci posádky, DOW, DOI, ramp (block) fuel, trip fuel, taxi fuel, popř. množství vody. Číslo letu a registrace letadla slouží k ověření, zda opravdu mluví agent a load control o stejném letu s daným letounem.

Na základě těchto údajů a předpokladu pro ZFW, který je vytvářen na základě předpokládaného payloadu (carga, pošty, počtu cestujících, zavazadel, posádky) vydá load control pokyny pro naložení (Loading Instruction).

U některých společností, které load control nemají, si nakládací instrukce určuje společnost nebo posádka. Agent vychází např. z procentuálního rozložení nákladu, kdy je např. v holdu 2 umístěno 30 % a v holdu 3 70 % celkového nákladu.

2.2 Loadsheet

Loadsheet je konečný dokument, který obsahuje informace o hmotnosti a vyvážení letadla. Můžeme na něm nalézt údaje o počtu cestujících, jejich rozmístění a hmotnostech, počtu členů posádky, druh a hmotnost cateringu, hmotnostech paliva, hmotnostech letounu jako celku ve všech fázích letu. Součástí některých typů loadsheetu může být také tzv. trimsheet. Jedná se o výpočet a grafické znázornění polohy těžiště.

Loadsheet je jedním z nejdůležitějších dokumentů, a kromě paluby daného letadla zůstává i na zemi, kde se po nějakou dobu archivuje u dané handlingové společnosti.

Tento dokument podepisují dvě osoby. Kapitán a handling agent. Agent podpisem stvrzuje správnost a korespondenci údajů na loadsheetu s reálným naložením letadla. Kapitán pak svým podpisem potvrzuje převzetí letounu a dává tak souhlas s jeho naložením.

Loadsheet obsahuje také kolonku LMC². Tato kolonka slouží k posledním úpravám v počtu cestujících či zavazadel bez nutnosti generace nového loadsheetu. Každá společnost má omezenou takovou změnu buď počtem cestujících na sekci, popř. kufrů, a/nebo váhou na daný CPT.³

² LMC – Last Minute Change

³ CPT – Compartment. Jedná se o část zavazadlového prostoru. B737 má compartmenty. Dva přední compartmenty tvoří FWD hold a zbývající zadní pak tvoří AFT hold.

BOEING 737-700 BALANCE CHART

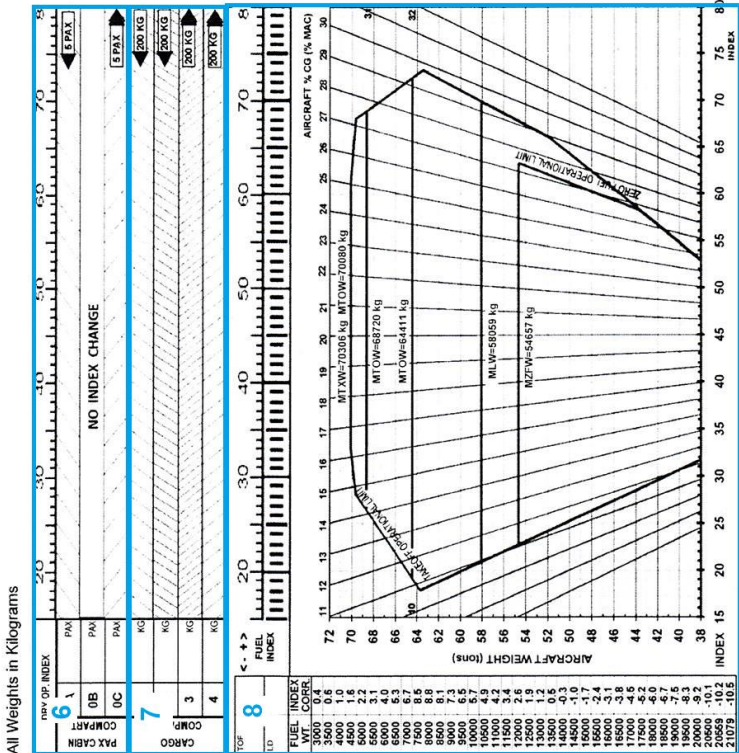


VALID FOR ALL TRAVEL SERVICE / SMARTWINGS CONFIGURATIONS AND FLAPS SETTINGS

NUMBER OF SEATS AND ROW NUMBERS FOR EACH CABIN SECTION YOU CAN FIND IN DOW/DOI DATASHEETS FOR EACH REGISTRATION AND CONFIGURATION AND IN OMB-B.

INDEX FORMULA:
 $\text{Index} = \frac{\text{Weight (kg)} \times \text{Arm (in)}}{33,000} + 45$

| ALL WEIGHTS IN KILOGRAMS | | | | | | | | | |
|--------------------------|--|--------------------------------------|--|-----------------|--|-------------|--|-------------------|--|
| From: _____ | | Origin: _____ | | A/C reg.: _____ | | Crew: _____ | | Date: _____ | |
| To: _____ | | Flight: _____ | | Version: _____ | | Date: _____ | | Date: _____ | |
| BASIC WEIGHT | | 2 MAXIMUM WEIGHTS FOR | | ZERO FUEL | | TAKE-OFF | | LANDING | |
| BASIC 1 GHT CORRECTED | | Take-off Fuel | | = | | = | | = | |
| Crew () + baggage | | Max. allowed TOW lowest of a, b or c | | a) = | | b) = | | c) = | |
| Pantry () | | Operating Weight | | - | | - | | - | |
| DRY OPERATING WEIGHT | | Allowed Traffic Load | | = | | = | | = | |
| Take-off Fuel (Taxi) | | OPERATING WEIGHT | | = | | = | | = | |
| OPERATING WEIGHT | | Distribution - Weight | | = | | = | | = | |
| No. of Passengers | | Cab Bag | | Pcs of Bags | | Remarks | | Cabin Baggage | |
| Dest. 3 | | TOTAL | | 1 2 3 4 | | | | Fwd Aft | |
| Tr | | Tr | | Tr | | | | Flight attendants | |
| B | | B | | B | | | | Fwd Aft | |
| C | | C | | C | | | | | |
| M | | M | | M | | | | | |
| T | | T | | T | | | | | |
| TOTAL | | TOTAL | | TOTAL | | | | | |
| Totals | | Totals | | Totals | | | | | |
| 4 bag. Weight | | 5 Traffic load | | = | | | | | |
| Total Passengers Weight | | Total Traffic Load | | - | | | | | |
| Total Traffic Load | | Underload before LMC | | = | | | | | |
| DRY OPERATING WEIGHT | | LAST MINUTE CHANGES | | = | | | | | |
| ZERO FUEL WEIGHT | | Specification | | Cptr./ weight | | | | | |
| MAX. LMC +/- | | Dest. | | = | | | | | |
| Take-off Fuel | | BI | | = | | | | | |
| TAKE-OFF WEIGHT | | DOA | | = | | | | | |
| MAX. LMC +/- | | OB | | = | | | | | |
| Trip Fuel | | OC | | = | | | | | |
| LANDING WEIGHT | | Pax | | = | | | | | |
| MAX. LMC +/- | | Crew | | = | | | | | |
| Remarks: | | C. Bag | | = | | | | | |
| | | Seats | | = | | | | | |
| | | LMC TOTAL | | = | | | | | |
| | | Total passengers | | = | | | | | |
| | | PAX | | = | | | | | |
| | | INF | | = | | | | | |
| | | Prepared by: | | = | | | | | |
| | | Approved by: | | = | | | | | |



Obrázek 6 - Loadsheet [Zdroj: Travel Service a. s.]

Vysvětlivky k obr. 6:

- 1 – Basic/ Operating hmotnosti
- 2 – Přípustná provozní zatížení
- 3 – Rozmístění payloadu
- 4 – Váhy letadla
- 5 – Under Load⁴ a LMC
- 6 – Vliv cestujících na sekci na vyvážení letounu
- 7 – Vliv zavazadel/ carga na hold na vyvážení letounu
- 8 – Vliv paliva na vyvážení letounu + trim sheet

⁴ Under Load – taková hmotnost, kterou bychom mohli ještě naložit, aby nebyly překročeny maximální povolené hmotnosti

2.2.1 Palivo

Požadavkem na všechny lety je nutnost dodržení minimálního množství paliva. Při určování takového množství paliva musíme brát v úvahu počasí, váhy, reálnou spotřebu, letové postupy, očekávanou letovou hladinu, omezení ŘLP. [8]

2.2.1.1 Taxi

Taxi fuel neboli palivo pro pojiždění je takové množství paliva, jehož spotřeba se předpokládá do okamžiku zahájení vzletu. Do TXF uvažujeme stání na stojánci za použití zdroje energie APU, spotřebu motorů během spouštění a pojiždění, které je ovlivněno uspořádáním letiště a hustotou provozu. [8]

2.2.1.2 Trip

Traťové palivo (TIF) je množství paliva, které musí zahrnovat:

- vzlet a stoupání do cestovní hladiny s přihlédnutím k SID
- let v letové hladině, zahrnující veškeré změny letových hladin až do bodu zahájení klesání TOD
- klesání od bodu TOD do bodu zahájení přiblížení s přihlédnutím k příletové trati STAR
- přiblížení a přistání na letišti [8]

2.2.1.3 Reserve

a) Contingency

Palivo pro nepředvídané události (CGF) zahrnuje buď:

- 5 % z traťového paliva nebo 5 % ze zbývajících traťového paliva v případě přeplánování za letu,
- 3 % z traťového paliva v případě tzv. en-route alternate, kdy je použitelné náhradní letiště na trati,
- nebo množství paliva potřebné pro let po dobu 5 min ve výšce 1500 ft nad cílovým letišťem za standardních podmínek.

b) Alternate

Palivo pro let na náhradní letiště (ALF) zahrnuje:

- go-around, čili postup nezdařeného přiblížení z výšky DA/MDA do go-around altitude, čili do výšky nezdařeného přiblížení,

- stoupání do cestovní hladiny s uvážením SID,
- traťový let na náhradní letiště v cestovní hladině,
- klesání z TOD do bodu zahájení přiblížení na náhradním letišti s uvážením STAR,
- přiblížení a přistání na náhradním letišti.

Pokud jsou požadována dvě náhradní letiště, palivo musí být počítáno na to vzdálenější z nich.

c) Final reserve

Konečná záloha paliva (FRF) je množství paliva potřebné pro let 45 min pro letadla s pístovými motory a let 30 min ve výšce 1500 ft nad úrovní letiště za standardních podmínek pro motory proudové.

d) Additional

Dodatečné palivo (ADF) zahrnuje:

- palivo potřebné pro postup po vysazení motoru nebo postup při ztrátě přetlaku, tj. klesání do potřebné výšky, let na vhodné letiště, holding ve výšce 1500 ft AAL za standardních podmínek, provedení přiblížení a přistání,
- nebo 15 min holding ve výšce 1500 ft AAL pro lety bez náhradního letiště.

2.2.1.4 Extra

Mimořádné množství paliva na základě rozhodnutí velitele letadla. [8]

3. Nakládací instrukce

Nakládací instrukce (Loading Instruction Report Form) jsou podkladem k naložení letadla. Takové instrukce si buď vytváří sám agent na základě doporučení společnosti nebo ve spolupráci s load controlem, který má k dispozici elektronický loadsheet a je tak schopen určit naložení přesněji.

Za svou práci handling agenta jsem se setkala se dvěma typy nakládacích instrukcí. Prvním z nich jsou nakládací instrukce pro standardní vyvážení a tím druhým jsou nakládací instrukce pro vyvážení optimální.

3.1 Nakládací instrukce pro standardní vyvážení

Takové nakládací instrukce spočívají ve stejném naložení všech letadel stejného typu. Buď jsou formulovány jako procentuální zastoupení kusů zavazadel v jednotlivých compartmentech nebo jako pevně daný počet zavazadel v jednom zavazadlovém prostoru s tím, že zbytek se naloží do druhého zavazadlového prostoru.

Právě tento typ nakládacích instrukcí je většinou využíván společnostmi, které mají na odbavení letu, tzv. turnaround velmi krátkou dobu (30 min).

Velkou výhodou vidím v nezávislosti agenta na load controlu. Agent tak ušetří čas, během kterého by se musel spojit s load controlem, jde k letadlu s tím, že ví dopředu, jak bude letadlo naloženo. Výhodou pro společnost jsou ušetřené náklady za služby load controlu.

Final Figures B737-300 & B737-800

Form shall be filled out and delivered to the CMDR or F/O 10 min prior to ETD. Total values in cargo compartments and passenger load shall be calculated by the handling agent prior to delivering the form to the aircraft. Values shall include all cargo and items placed in the cargo compartments. This form shall be stored by the handling agent.

| | | | |
|---------------|--|--------------|--|
| FLIGHT | | DATE: | |
|---------------|--|--------------|--|

PASSENGER LOAD/DISTRIBUTION:

| | |
|------------------|-------|
| Adults: | |
| Children: | |
| TOTAL: | + inf |

| | | | | |
|-------------|---------|-----------|------------|------------|
| B737 | -300 | Sec A | Sec B | Sec C |
| | 800Y189 | Row 1-8: | Row 9-16: | Row 17-25: |
| | 800Y185 | Row 1-10: | Row 11-23: | Row 24-32: |
| | | Row 1-9: | Row 10-22: | Row 23-31: |

LOAD POLICY & DISTRIBUTION:

Use primary Actual Weights (AW).

B737-300/800: Distribute load with 70% AFT and 30% FWD as a general rule unless otherwise stated by the commander. If total load is 500kg or less all load can be loaded AFT.

Valid for B737-800W: If total load is more than 500 kilos, always start loading FWD hold first.

When offloading, offload AFT holds first. If offloading FWD and AFT in parallel, leave at least 400kg or 35 bags in FWD holds until AFT compartments are empty.

If AFT stairs are used for boarding/deboarding, the above mentioned limitation may be omitted.

| | | |
|--|-------------|-------------------------------|
| Weight of Bags: AW/44 (13) / 15 | | (Circle which factor is used) |
| Cpt. 1 | Bags: pcs = | KG |
| | Cargo: | KG |
| | Mail: | KG |
| | | Tot Cpt 1: |
| | | Kg |
| Cpt. 2 | Bags: pcs = | KG |
| | Cargo: | KG |
| | Mail: | KG |
| | | Tot Cpt 2: |
| | | Kg |
| Cpt. 3 | Bags: pcs = | KG |
| | Cargo: | KG |
| | Mail: | KG |
| | | Tot Cpt 3: |
| | | Kg |
| Cpt. 4 | Bags: pcs = | KG |
| | Cargo: | KG |
| | Mail: | KG |
| | | Tot Cpt 4: |
| | | Kg |

| | | | | |
|------------------------|--|----------------------|--------------------|--------------------------|
| Name & Sign | | Cargo loaded: | Delay code: | FF 10 min pr.dep: |
| Gate Agent: | | ___YES___NO | | ___YES___NO |
| Form reviewed | | | LMC: | Stairs Aft: |
| CMDR/FO: | | | (Max 500kg) | ___YES___NO |
| Special Load/ | | | | |
| Remarks: | | | | |

Final Figures B737-300/800

Ver 25

2011 0330

Obrázek 7 - Nakládací instrukce pro standardní vyvážení B737 [Zdroj: Menzies Aviation s.r.o.]

MASTER COPY

| | | | | |
|---------------------------------|--|--------------------|--------------|--------------|
| LOADING INSTRUCTION REPORT FORM | | DATE: | A/C REG: | FLT. NO. |
| | | DEPARTURE STATION: | DESTINATION: | PREPARED BY: |

| | | | |
|---|--|---|---|
| <p>A319</p> <p>Overspill bags should be loaded in HOLD 1</p> <p>Up to the first 150 bags should be loaded in the rear holds with MAX 50 HOLD 5</p> | <p>Loading Instruction</p> <p>HOLD 1 max. 2268 kg</p> <p>HOLD 4 max. 3021 kg</p> <p>HOLD 5 max. 1497 kg</p> | <p>A319</p> <p>1</p> <p>4</p> <p>5</p> | <p>Loading Report (Actual Loading)</p> <p>HOLD 1</p> <p>HOLD 4</p> <p>HOLD 5</p> |
|---|--|---|---|

Special Instructions: (Including any deviations)

I confirm that the aircraft has been loaded as per these instructions, including the deviations shown. Bulk load has been secured, including netting of holds, in accordance with Company Regulations. All holds (forward and aft) have been visually inspected and were empty prior to loading.

"MAX. LOADING HEIGHT" RESPECTED?

Print name: _____

Signature: _____

All Electric Mobility Aids must be secured and loaded in accordance with GHM and with Electric Mobility Aid Loading Form attached

| | |
|---|----------------------|
| Hold Baggage Manifest Declaration Form | |
| Check-in figure (From DCS System) | <input type="text"/> |
| Total Number of Bags actually loaded: | |
| Number of accompanied Hold bags: (Bag tags on bingo cards, gate/crew and limited release bags) | <input type="text"/> |
| + | |
| Number of unaccompanied (Rush) Hold bags: | <input type="text"/> |
| = | |
| TOTAL BAGS: | <input type="text"/> |
| APPOINTED PERSONS DECLARATION | |
| I am satisfied that all reasonable steps have been taken to ensure that: | |
| A. All hold baggage loaded has been accounted for. | |
| B. All hold baggage loaded is appropriate for the flight and has been identified as accompanied / unaccompanied. | |
| C. All checked in passengers have boarded the aircraft for where they have not, the associated hold baggage has been removed from the aircraft. | |
| D. Where unaccompanied hold baggage is being carried it has been clearly identified as such on the manifest and | |
| E. Each item of unaccompanied hold baggage has been subjected to the appropriate security controls. Confirmation of this is included on the manifest. | |
| Manifest Declaration Form must be completed and signed immediately before pushback. | |
| PRINT NAME: | _____ |
| SIGNATURE: | _____ |
| DATE: | _____ |
| easyJet LIRF/MDF319 05/2014 | |

INTERNAL COPY

| | | | | |
|---------------------------------|--|--------------------|--------------|--------------|
| LOADING INSTRUCTION REPORT FORM | | DATE: | A/C REG: | FLT. NO. |
| | | DEPARTURE STATION: | DESTINATION: | PREPARED BY: |

| | | | |
|---|--|---|---|
| <p>A319</p> <p>Overspill bags should be loaded in HOLD 1</p> <p>Up to the first 150 bags should be loaded in the rear holds with MAX 50 HOLD 5</p> | <p>Loading Instruction</p> <p>HOLD 1 max. 2268 kg</p> <p>HOLD 4 max. 3021 kg</p> <p>HOLD 5 max. 1497 kg</p> | <p>A319</p> <p>1</p> <p>4</p> <p>5</p> | <p>Loading Report (Actual Loading)</p> <p>HOLD 1</p> <p>HOLD 4</p> <p>HOLD 5</p> |
|---|--|---|---|

Special Instructions: (Including any deviations)

I confirm that the aircraft has been loaded as per these instructions, including the deviations shown. Bulk load has been secured, including netting of holds, in accordance with Company Regulations. All holds (forward and aft) have been visually inspected and were empty prior to loading.

"MAX. LOADING HEIGHT" RESPECTED?

Print name: _____

Signature: _____

All Electric Mobility Aids must be secured and loaded in accordance with GHM and with Electric Mobility Aid Loading Form attached

BULK **AFT HOLD** **FWD HOLD**

Circle as appropriate

This aircraft has been loaded in accordance with these instructions, except for deviations record and load secured in accordance with procedures.

| | | | |
|-----------------|-----------|------|----|
| Name (printed): | Signature | Date | ID |
| | | | |

BULK **AFT HOLD** **FWD HOLD**

Circle as appropriate

This aircraft has been loaded in accordance with these instructions, except for deviations record and load secured in accordance with procedures.

| | | | |
|-----------------|-----------|------|----|
| Name (printed): | Signature | Date | ID |
| | | | |

Obrázek 8 - Nakládací instrukce pro standardní vyvážení A319 [Zdroj: Menzies Aviation s.r.o.]

3.2 Nakládací instrukce pro optimální vyvážení

Tyto nakládací instrukce jsou zhotoveny na míru pro jeden konkrétní let. To znamená, že si společnost určí rozmezí, v jakém se má těžiště pohybovat a na load control zbývá určit rozmístění nákladu tak, aby vyhověl danému rozmezí.

Takové nakládací instrukce jsou časově náročnější. Load control pracuje s konkrétním rozmístěním cestujících a s konkrétním počtem zavazadel či hmotností carga. Z toho vyplývá, že není možné určit rozmístění nákladu dopředu, ale až po skončení odbavování cestujících. Znamená to mnohdy zpoždění zahájení nakládání a z toho plynoucí nedodržení času, který pro turnaround máme k dispozici.

Ze své zkušenosti můžu říct, že u složitějších letů, kde bylo navíc cargo i pošta, docházelo ke změně nakládacích instrukcí i v průběhu nakládky, což mnohdy vedlo k narůstání zpoždění. Nakládací instrukce musí nakonec obsahovat přesně tu hmotnost, která je reálně v dané části letounu naložena. Další nevýhodou je z mého pohledu fakt, že při nakládání carga známe pouze celkovou hmotnost, kterou rozdělujeme do jednotlivých sekcí. Z toho plyne povinnost agenta sčítat hmotnosti jednotlivých kusů, abychom přesně věděli, kolik máme aktuálně naloženo a kolik do dané sekce můžeme ještě přidat. Takovéto sčítání také velmi zpomaluje proces nakládání.

Nicméně tyto nakládací instrukce jsou přesnější, a co se týče spotřeby paliva i efektivnější.

PRGOPXH

QD PRGRCQS 300814

LOADING INSTRUCTION/REPORT CONFIG PREPARED BY EDNO
ALL WEIGHTS IN KG Y148 02

FROM/TO FLIGHT A-C/REG D/V VERSION CREW DATE TIME
PRGSXB QS 4529 OKSWW B737-700A 2/04 30OCT 0814

PLANNED LOAD

SXB Y 50 C 000000 M 000000 B 000800 E 000000

JOINING SPECS

TRANSIT SPECS

RELOADS

CPT 1 FWD MAX 000814 ::CPT TOTAL :

CPT 2 FWD MAX 001021 1+2 001835 ::CPT 1 TOTAL :

CPT 3 AFT MAX 002409 ::CPT 2 TOTAL :

:3 :
:ONLOAD SXB B/00800 :
:REPORT

CPT 4 AFT MAX 000763 +4 003172 ::CPT 3 TOTAL :

::CPT 4 TOTAL :

SI

THIS AIRCRAFT HAS BEEN LOADED IN ACCORDANCE WITH THESE
INSTRUCTIONS AND THE DEVIATIONS SHOWN ON THIS REPORT. THE
CONTAINER/PALLETS AND BULK LOAD HAVE BEEN SECURED IN
ACCORDANCE WITH COMPANY INSTRUCTIONS.

SIGNATURE:

End of message

Obrázek 9 - Nakládací instrukce pro optimální vyvážení B737-700
[Zdroj: Menzies Aviation s.r.o.]

4. Určení optimální polohy těžiště

Když jsem se rozhodla svou bakalářskou práci věnovat zkoumání závislosti spotřeby paliva na poloze těžiště, přemýšlela jsem o více metodách, kterými by bylo možno dojít k závěru. Jako první mě napadlo naložit jedno letadlo s přední centráží, druhé se zadní a následně je porovnat. Bylo by to však technicky náročné, velmi nepřesné a také velmi nespolehlivé.

Druhou možností bylo spočítat odpor výškového kormidla při různých úhlech náběhu. Takováto metoda by byla matematicky přesná, nicméně velmi náročná a hodně teoretická.

Nejlepším řešením tedy bylo statistické zpracování dat jednotlivých letů.

4.1 Statistické metody

Statistika je metoda analýzy dat. Základem pro statistiku je její matematická část (matematická statistika), která je větví aplikované matematiky. Jejím cílem je najít ty nejlepší informace, které jsme schopni z dostupných dat získat. [10] [11]

Teorie statistiky je založena na teorii pravděpodobnosti. Praxí ve statistice pak rozumíme např. plánování, analýzu nepřesných pozorování či dat, sumarizaci. [10] [11]

Statistiku jako takovou lze rozdělit na dvě hlavní skupiny podle užití metody analýzy. Jedná se o explorační a konfirmační analýzu, do které patří i právě námi použitá regresní analýza. U konfirmační analýzy jde v podstatě o to, že předem formulujeme nějakou naši hypotézu a tuto metodu pak použijeme k vyvrácení či potvrzení naší domněnky. [12] [13]

4.1.1 Korelace

Ve statistice je korelace metodou, která nám určuje vzájemný vztah mezi veličinami x a y . Platí pro ně následující vztah

$$y = kx \tag{4.1}$$

kde y je jedna veličina, x druhá a k je směrnice, která určuje sklon grafu.

Hodnota korelačního koeficientu může nabývat hodnot od -1 do +1. Pokud dosáhne hodnota koeficientu -1, můžeme říct, že jde mezi veličinami x a y o zcela nepřímou závislost

neboli antikorelaci. Jinými slovy čím více se zmenší hodnoty x , tím více se zvětší hodnoty y a naopak. Příkladem antikorelace může být vztah mezi zbývajícím a uplynulým časem. Pokud dosáhne hodnota korelačního koeficientu $+1$, mezi veličinami existuje zcela přímá závislost. Může nastat ještě třetí extrémní případ, kdy se koeficient rovná 0 . V tomto případě není mezi veličinami žádná statisticky zjiřitelná lineární závislost. [14] [15]

Pomocí korelace jsme tedy schopni určit závislost veličin na sobě navzájem. Nejsme však schopni určit kauzalitu, tedy zda je jeden příčinou a druhý následkem. [14] [15]

4.1.2 Lineární regrese

Další ze statistických metod zpracování dat je lineární regrese. Je to matematická metoda, která se používá v případě, že chceme stanovit závislost veličiny y , jejíž měření je obtížné a nepříliš přesné na veličině x . Základním předpokladem je možnost grafického znázornění veličiny y na x přímkou. [16]

Měřené hodnoty jsou následně proloženy přímkou tak, že mezi naměřenou hodnotou veličiny y a hodnotou veličiny y ležící na přímce vznikne odchylka. Lineární regrese je založena na snaze mít součet druhých mocnin těchto odchylek co možná nejmenší. Jinými slovy lze říci, že je lineární regrese jakousi aproximací naměřených hodnot přímkou. Tato přímka lze vyjádřit klasickou rovnicí přímky

$$y = ax + b \tag{4.2}$$

kde y je první veličina, x je druhá veličina, a je tzv. směrnice a b je průsečík přímky s osou y .

Důležitá je pro nás hodnota směrnice. Ta určuje sklon vzniklé přímky.

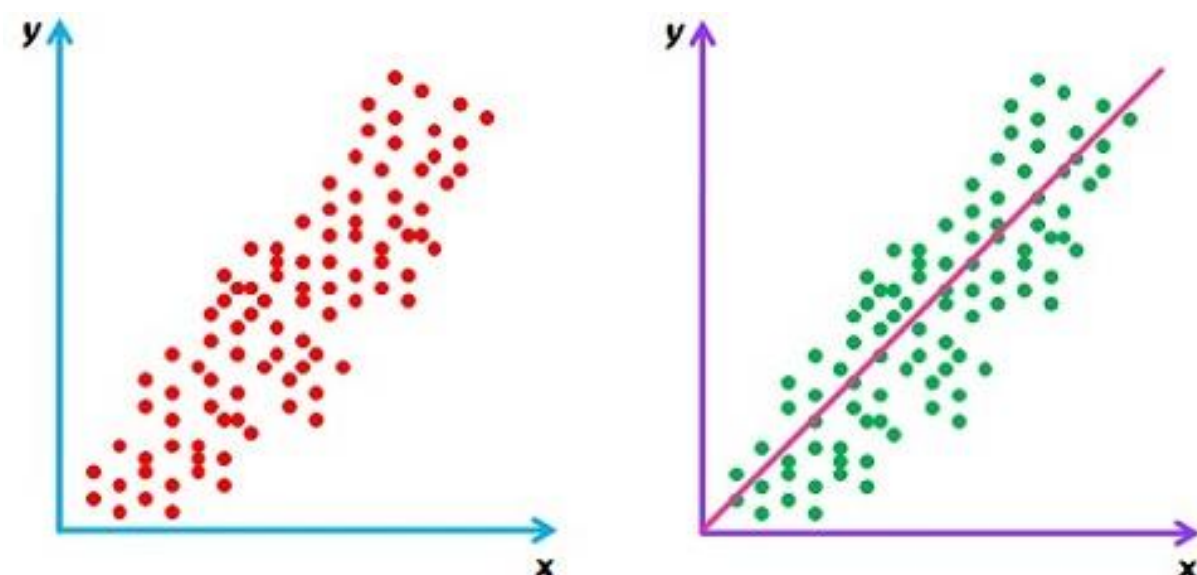
Dosazením za hodnoty x a y získáme soustavu rovnic, ze které můžeme tak sestavit matici a vypočítat hledané koeficienty a a b .

Výhoda regrese spočívá také v tom, že má schopnost predikce. Můžeme tak předpovědět následující vývoj hodnot, jakýsi trend, kam by přímka následně pokračovala pro další hodnoty. [16] [17]

4.1.3 Korelace vs. Regrese

Pojďme si nyní porovnat korelaci a regresi. Korelace nám pouze určí, zda je mezi měřenými veličinami nějaký vztah. Proměnné bereme jako sobě rovné a není mezi nimi rozdíl. Předpokládáme, že obě tyto veličiny jsou náhodné. [18]

Regresí jsme schopni nejen zjistit, zda je jedna veličina závislá na druhé, ale můžeme ji také použít k předpovědi a extrapolaci⁵ dat. Hlavním předpokladem je, že hodnoty veličiny y jsou získány statisticky, náhodně či stochasticky⁶, zatímco hodnoty veličiny x jsou přesné. [18]



Obrázek 10 - Korelace vs. Regrese [Zdroj: <<http://keydifferences.com/wp-content/uploads/2016/05/correlation-vs-regression1.jpg>>]

4.2 Vyhodnocení dat

V této části práce bych chtěla popsat způsob vyhodnocení dat. V první části se zaměřím na typ dat, podle jakých znaků jsem je vybrala a odkud jsou získány. Ve druhé části konkrétně popisují zpracování v programu Excel a následnou generaci grafu.

⁵ Extrapolace – „Výpočet hodnot funkce v bodě ležícím vně intervalu z hodnot funkce v krajních, příp. i některých vnitřních bodech intervalu.“ [Zdroj: <<http://slovník-cizich-slov.abz.cz/web.php/slovo/extrapolace>>]

⁶ Stochastika je matematický obor zabývající se zkoumáním a modelováním náhodných jevů.

4.2.1 Použitá data

K dispozici jsem měla data, ze kterých jsem vybrala data z 34 letů, a to na lince PRG-TLV, letounu B737-800. Pro každý let máme k dispozici hodnotu o počtu cestujících, TOW, váze carga, EZFW, ZFW, vítr, CG.

Část těchto dat je získána ze zapisovače, jsou to tzv. Stable Cruise Reporty a na každý let je jeden takový report. V případě, že DMU (Data Management Unit), popř. FDIMU (Flight Data Interface and Management Unit) vyhodnotí, že právě nastaly podmínky, které definují tzv. Stable Cruise, je generována zpráva Stable Cruise Report.

Po dosažení cestovní hladiny následuje monitorování některých parametrů letadla. Je-li změna těchto parametrů v rozmezí definovaném pro každý z nich, pak jsou zaznamenány podmínky Stable Cruise a je generována zpráva Stable Cruise Report.

Další částí jsou data zpracována Boeingovým softwarem APM (Airplane Performance Monitoring). Hodnota, která nás nejvíce zajímala je označena jako Thrust Required. Zjednodušeně odpovídá relativnímu odporu letadla vůči tabulkovým hodnotám za daných podmínek a můžeme ji brát jako směrodatný koeficient spotřeby paliva.

4.2.2 Zpracování dat

V odstavci 4.1.3 jsem porovnávala dvě statistické metody, kterými by bylo možno zmíněná data vyhodnotit. Pro zpracování následujících dat jsem využila lineární regresi, která je dostupná v programu Excel po instalaci jistých doplňků, konkrétně pak aktivní doplněk aplikace s názvem Analytické nástroje. Doplněk se po instalaci zobrazí pod lištou Data.

| FLT num. | Date | Dep. | Dest. | A/C reg. | TOW | PAX | Cargo | EZFW | ZFW | units | WC | CG | Thrst. Req. | TH opraven o WC |
|----------|------------|------|-------|----------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-----|------|-------------|-----------------|
| TVS1286 | 10.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV R | 65345 | 111 | 859 | 61867 | 53650 | kgs | 41 | 19,2 | 3,10 | 0,34 |
| TVS1286 | 1.12.2015 | PRG | TLV | OK-TV S | 64616 | 81 | 2448 | 61867 | 52878 | kgs | 61 | 20,4 | 4,30 | 0,50 |
| TVS1286 | 26.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV S | 65930 | 104 | 2139 | 61867 | 54440 | kgs | 27 | 21,0 | -1,20 | 0,22 |
| TVS1286 | 9.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV S | 74325 | 183 | 0 | 61867 | 60300 | kgs | 63 | 21,5 | 2,70 | 0,52 |
| TVS1286 | 17.10.2015 | PRG | TLV | HA-LKG | 73461 | 190 | 1383 | 61893 | 61084 | kgs | 12 | 22,1 | 3,60 | 0,10 |
| TVS1286 | 17.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV R | 65478 | 109 | 644 | 61867 | 52923 | kgs | 48 | 22,2 | -4,00 | 0,39 |
| TVS1286 | 19.10.2015 | PRG | TLV | OK-TSH | 74409 | 186 | 1700 | 62069 | 60852 | kgs | 20 | 22,5 | 2,50 | 0,16 |
| TVS1286 | 21.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV R | 72801 | 188 | 894 | 61867 | 60258 | kgs | 9 | 22,7 | 4,30 | 0,07 |
| TVS1286 | 8.9.2015 | PRG | TLV | OK-TSC | 73668 | 158 | 2241 | 59901 | 58302 | kgs | 25 | 23,0 | 4,70 | 0,21 |
| TVS1286 | 15.12.2015 | PRG | TLV | OK-TSH | 72843 | 184 | 1032 | 61867 | 59500 | kgs | 25 | 23,4 | 6,60 | 0,21 |
| TVS1286 | 16.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV R | 74161 | 184 | 1665 | 61867 | 60902 | kgs | 32 | 23,5 | 2,60 | 0,26 |
| TVS1286 | 3.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV M | 63426 | 74 | 1773 | 61867 | 51600 | kgs | -9 | 23,7 | -0,60 | -0,07 |
| TVS1286 | 15.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV R | 73166 | 186 | 1250 | 61867 | 61099 | kgs | 29 | 24,0 | 7,00 | 0,24 |
| TVS1286 | 23.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV R | 72620 | 187 | 368 | 61867 | 60200 | kgs | 26 | 24,0 | 0,10 | 0,21 |
| TVS1286 | 26.10.2015 | PRG | TLV | OK-TSH | 75001 | 182 | 2349 | 62499 | 60859 | kgs | 19 | 24,1 | 4,70 | 0,16 |
| TVS1286 | 14.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV U | 72838 | 188 | 1300 | 61867 | 61384 | kgs | 38 | 24,1 | -1,10 | 0,31 |
| TVS1286 | 5.12.2015 | PRG | TLV | OK-TV S | 74289 | 179 | 1285 | 61867 | 60925 | kgs | 17 | 24,1 | 0,60 | 0,14 |
| TVS1286 | 7.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV M | 74206 | 191 | 900 | 61867 | 61448 | kgs | 34 | 24,3 | 3,10 | 0,28 |
| TVS1286 | 25.11.2015 | PRG | TLV | OK-TSE | 73632 | 181 | 1168 | 61867 | 60496 | kgs | 19 | 24,3 | -1,40 | 0,16 |
| TVS1286 | 15.9.2015 | PRG | TLV | OK-TV P | 73645 | 181 | 1702 | 61341 | 60143 | kgs | 6 | 24,4 | 3,00 | 0,05 |
| TVS1286 | 18.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV U | 72368 | 180 | 900 | 61867 | 59823 | kgs | 43 | 24,4 | 3,60 | 0,35 |
| TVS1286 | 2.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV S | 73395 | 186 | 1081 | 61867 | 61508 | kgs | -10 | 24,5 | 1,30 | -0,08 |
| TVS1286 | 8.12.2015 | PRG | TLV | OK-TSH | 62725 | 76 | 1550 | 61867 | 49844 | kgs | -18 | 24,5 | 0,40 | -0,15 |
| TVS1286 | 1.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV S | 73523 | 186 | 1200 | 62142 | 61800 | kgs | -1 | 24,7 | 2,00 | -0,01 |
| TVS1286 | 21.7.2015 | PRG | TLV | OK-TV L | 72720 | 171 | 1540 | 61241 | 60128 | kgs | 22 | 24,8 | 2,30 | 0,18 |
| TVS1286 | 8.11.2015 | PRG | TLV | OK-TSE | 73625 | 185 | 887 | 61867 | 61707 | kgs | 53 | 25,2 | 1,50 | 0,44 |
| TVS1286 | 19.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV V | 70996 | 155 | 1855 | 61867 | 59321 | kgs | 36 | 25,2 | 2,80 | 0,30 |
| TVS1286 | 18.10.2015 | PRG | TLV | OK-TV T | 72997 | 188 | 945 | 61815 | 61800 | kgs | 14 | 25,4 | 0,40 | 0,12 |
| TVS1286 | 24.10.2015 | PRG | TLV | OK-TSH | 72727 | 187 | 1060 | 61226 | 60244 | kgs | 15 | 25,4 | 4,90 | 0,12 |
| TVS1286 | 1.9.2015 | PRG | TLV | OK-TV F | 75408 | 180 | 1242 | 61308 | 60344 | kgs | -4 | 25,7 | 2,30 | -0,03 |
| TVS1286 | 4.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV M | 72236 | 147 | 2015 | 61867 | 57755 | kgs | -10 | 25,7 | -0,30 | -0,08 |
| TVS1286 | 12.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV U | 70680 | 166 | 1030 | 61867 | 59451 | kgs | 36 | 25,9 | 1,60 | 0,30 |
| TVS1286 | 11.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV U | 67112 | 133 | 66 | 61867 | 55547 | kgs | 45 | 26,9 | -1,50 | 0,37 |
| TVS1286 | 5.11.2015 | PRG | TLV | OK-TV M | 71319 | 158 | 917 | 61867 | 58276 | kgs | 1 | 27,4 | 1,30 | 0,01 |

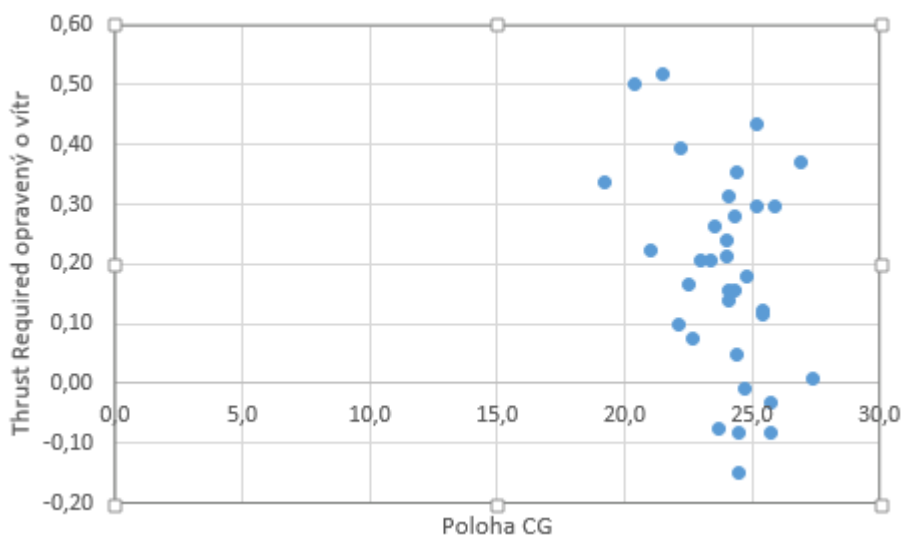
Obrázek 11 - Tabulka dat jednotlivých letů [Zdroj: autor]

Z dostupných dat může spotřeba paliva nejvíce záviset na hmotnosti, větru a poloze CG. Když se podíváme na sloupec větru WC, vidíme velké rozdíly na jednotlivých letech. Tyto rozdíly by mohly vnést do dalších výpočtů velkou chybu, proto je nutné „opravit“ hodnoty Thrust Required o vítr. To jsem provedla následujícím způsobem. Pomocí doplňku Analýza dat v Excelu jsem vytvořila regresi, tedy závislost Thrust Required na větru. V nově vzniklé tabulce (Obr. 11) můžeme vidět modře ohraničený koeficient, který nám udává závislost Thrust Required na větru. Jinými slovy jde o jakési převodní číslo, kterým jsme schopni po vynásobení s hodnotou Thrust Required získat Thrust Required při nulovém větru. Tento výsledek nám již umožňuje porovnávat přímo Thrust Required s polohou CG.

| VÝSLEDEK | | | | | | | | |
|----------------------------|--------------------|----------------------|---------------|------------------|---------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| <i>Regresní statistika</i> | | | | | | | | |
| Násobné R | 0,07012371 | | | | | | | |
| Hodnota spolehliv | 0,004917335 | | | | | | | |
| Nastavená hodno | -0,026178999 | | | | | | | |
| Chyba stř. hodnot | 2,455907447 | | | | | | | |
| Pozorování | 34 | | | | | | | |
| ANOVA | | | | | | | | |
| | <i>Rozdíl</i> | <i>SS</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>Významnost F</i> | | | |
| Regrese | 1 | 0,953772 | 0,953772 | 0,158132 | 0,693522306 | | | |
| Rezidua | 32 | 193,0074 | 6,031481 | | | | | |
| Celkem | 33 | 193,96118 | | | | | | |
| | <i>Koeficienty</i> | <i>ba stř. hodn.</i> | <i>t Stat</i> | <i>Hodnota P</i> | <i>Dolní 95%</i> | <i>Horní 95%</i> | <i>Dolní 95,0%</i> | <i>Horní 95,0%</i> |
| Hranice | 1,791676052 | 0,6271752 | 2,856739 | 0,007461 | 0,514161975 | 3,06919 | 0,514162 | 3,06919 |
| Soubor X 1 | 0,008223841 | 0,0206807 | 0,397659 | 0,693522 | -0,033901285 | 0,050349 | -0,0339 | 0,050349 |

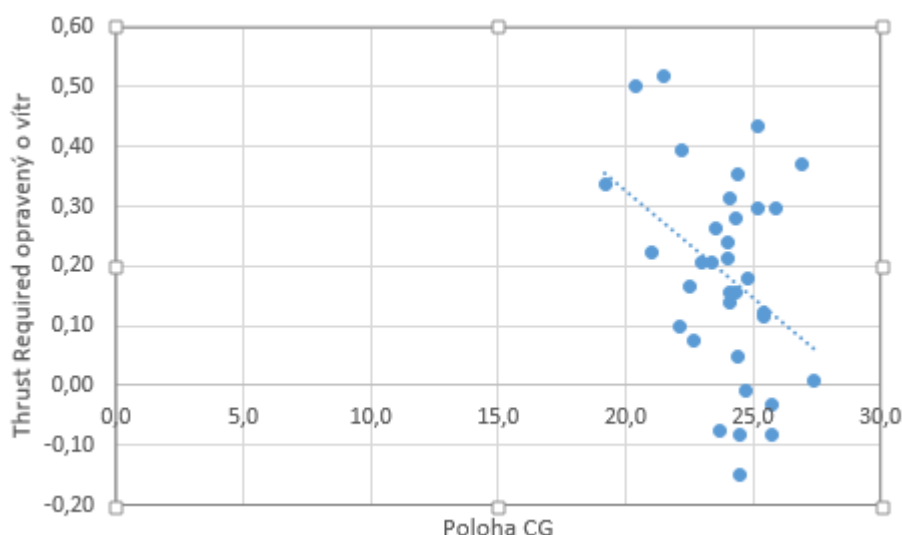
Obrázek 12 - Výsledek regrese Thrust Required a vítr [Zdroj: autor]

Dalším krokem už je přímo porovnání dvou našich hlavních parametrů, tedy opraveném výkonu o vítr a CG. K tomu jsem využila jednoduchý bodový graf, který nám nabízí opět Excel.



Obrázek 13 - Závislost Thrust Required při nulovém větru na poloze CG [Zdroj: autor]

Na první pohled není z grafu vidět nic jednoznačného. V tuto chvíli bychom potřebovali něco, co znázorní trend bodů v grafu. K tomu využijeme funkci grafu s názvem Spojnice trendu.



Obrázek 14 - Trend závislosti Thrust Required na poloze CG [Zdroj: autor]

Z Obr. 13 je patrná lineární závislost klesající spotřeby paliva na poloze těžiště.

V úvodu odstavce 4.2.2 jsem se zmiňovala ještě o jednom parametru, o kterém si myslím, že by mohl mít vliv na spotřebu paliva. Byla to hmotnost. Tu jsem však po analýze vyloučila. Každá provedená regrese má i tzv. koeficient determinace. Jedná se o hodnotu, která může ležet v intervalu $<0;1>$. Čím blíže je k hodnotě 0, tím menší má regrese význam a tím méně je na ní daná veličina závislá. Pro závislost Thrust Required a TOW byla hodnota tohoto koeficientu 0,003 a proto jsem se ji rozhodla ze svých úvah vyloučit.

ZÁVĚR

První kapitolu jsem věnovala základním pojmům, abych čtenáře uvedla do problematiky hmotnosti a vyvážení a nastínila, s jakými pojmy se dále budeme v textu setkávat. Tato kapitola také obsahuje informace o centráži, hmotnostech letadla a účincích přetížení. Druhá kapitola se týká formulářů, které jsou potřeba při procesu odbavení letadla a úzce souvisí s hmotností a vyvážením letounu. Třetí kapitola je celá věnována nakládacím instrukcím včetně obrázků konkrétních instrukcí, které jsou v praxi používány. Poslední, tedy čtvrtá kapitola, je praktická část, ve které jsem popsala statistickou metodu, kterou jsem došla k závěru, že spotřeba paliva klesá s posunem těžiště dozadu.

Předmětem této bakalářské práce bylo zkoumání závislosti spotřeby paliva na poloze CG. K tomu jsem se rozhodla použít statistickou metodu, konkrétně lineární regresi. Zpracovaná data pocházejí z 34 letů na lince Praha – Tel Aviv, které byly provedeny v období červen–prosinec 2015 na letounu typu Boeing 737-800. Data byla získána ze zapisovače letových údajů a jejich část byla zpracována softwarem od firmy Boeing. Nejzajímavější hodnotou z pohledu spotřeby paliva je hodnota, která je označena jako Thrust Required, tedy potřebný tah. Zjednodušeně odpovídá relativnímu odporu letadla vůči tabulkovým hodnotám a můžeme ji brát jako koeficient spotřeby paliva. Tento Thrust Required jsem porovnávala s hodnotou polohy těžiště na daném letu. Nejprve však bylo potřeba opravit koeficient Thrust Required o vítr, protože mezi jednotlivými lety byl velmi proměnlivý. Novou, opravenou hodnotu Thrust Required jsem pak porovnávala přímo s polohou těžiště, a to za pomoci dříve zmiňované lineární regrese a tuto závislost vynesla do bodového grafu, který jsem proložila tzv. spojnicí trendu. Takto vzniklý graf ukázal jednoznačnou lineární závislost mezi spotřebou paliva a polohou těžiště. Dokázala jsem tedy, že spotřeba paliva klesá s posunem těžiště vzad.

Faktem je, že se jedná o statistickou metodu, která byla použita ke studiu závislosti spotřeby paliva na poloze těžiště. To znamená, že je výsledek tím přesnější, čím více dat máme k dispozici. Já pro své výpočty brala do úvahy 34 letů. Předpokládám, že přesnějšího výsledku by se dalo dosáhnout tak, že použijeme mnohonásobně větší počet letů a s takto přesnými čísly by se dalo pracovat dále. Jako příklad uvádím výpočet intervalu polohy těžiště, ve kterém je spotřeba minimální, což by vedlo ke zpřesnění nakládacích instrukcí, potažmo úspoře paliva.

Závěrem můžu říct, že psaní této práce pro mě bylo osvěžení a ucelení znalostí předmětu Hmotnost a vyvážení. Myslím si, že spolu se zkušeností handling agenta mi tato bakalářská práce dala mnohem větší nadhled nad celkovým pozemním odbavením a provozní ekonomikou letu.

POUŽITÉ ZDROJE

- [1] Základy letadlové techniky. *WebDav* [online]. 2014 [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: WWW: <http://webdav.agents.fel.cvut.cz/data/teaching/bep/BEP2_2014.pdf>
- [2] Wing Section Terminology. *Aviation Class* [online]. 2014 [cit. 2016-11-09]. Dostupné z WWW: <<https://aviationclass.wordpress.com/2014/12/22/wing-section-terminology>>
- [3] Těžiště tělesa. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006-2016 [cit. 2016-11-09]. Dostupné z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/101-teziste-telesa>>
- [4] Aerodynamický střed křídla. *Buteo.szm* [online]. 2000 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z WWW: <http://buteo.szm.com/aero_zk.htm>
- [5] Polohy těžiště a neutrálního bodu letounu. *Airspace* [online]. 2011 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z WWW: <http://airspace.cz/akademie_letectvi/2011/11/polohy-teziste-a-neutralniho-bodu-letounu-a-modelu/>
- [6] CAE Oxford Aviation Academy. *Mass and balance: Performance*, 2014.
- [7] Menzies Aviation. *Manual Weight and Balance Trainees Workbook*, 2015.
- [8] SOLDÁN, Vladimír. *Letové postupy a provoz letadel*, Praha 2007. ISBN 978- 80-239-8595-5
- [9] NAGY, Ivan a Pavla PECHERKOVÁ. *Statistika*, FD ČVUT Praha. Dostupné z WWW: <<https://www.fd.cvut.cz/personal/nagyivan/Statistika/Statistika.pdf>>
- [10] Regresní a korelační analýza. *HomeN VŠB* [online]. 2015-2016 [cit. 2016-11-16]. Dostupné z WWW: <<https://homen.vsb.cz/~oti73/cdpast1/KAP09/KAP09.HTM>>
- [11] Úvod do regresní analýzy. *StatSoft* [online]. 2004-2016 [cit. 2016-11-16]. Dostupné z WWW: <http://statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2014_26_03_StatSoft_Uvod_do_regresni_analyzy.pdf>
- [12] HENDL, Jan. *Statistika v aplikacích*, Praha: Portál, 2014. ISBN 978-80-262-0700-9
- [13] Metody zpracování výsledků, základy statistiky. *FSPS.MUNI* [online]. 2016 [cit. 2016-11-17]. Dostupné z WWW:

<http://www.fsps.muni.cz/~sebera/vicerozmerna_statistika/data/statistika-Vybrane_kapitoly_z_antropomotoriky.pdf>

[14] Korelace a regrese. *MENDELU* [online]. 2016 [cit. 2016-11-18]. Dostupné z WWW: <http://user.mendelu.cz/drapela/Statisticke_metody/Prezentace/zakladni/KorelaceRegrese.pdf>

[15] LIKEŠ, Jiří a Josef MACHEK. *Matematická statistika*, Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Matematika pro vysoké školy technické.

[16] Matematická statistika. *Math.FELd* [online]. 2016 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z WWW: <<https://math.feld.cvut.cz/ftp/bartik/M6b/M6b-06-Statistics.pdf>>

[17] Lineární regrese tak nebo jinak. *Mff.CUNI* [online]. 2016 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z WWW: <<http://kolej.mff.cuni.cz/~lmotm275/skripta/sbirka/html/node49.html>>

[18] Korelace a regrese [online]. 2016 [cit. 2016-11-20]. Korelace a regrese. Dostupné z WWW: <<http://karlin.mff.cuni.cz/~zvara/regrese.ppt>>

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1 - Střední aerodynamická těživa | 12 |
| Obrázek 2 - Rozložení sil na povrchu křídla | 14 |
| Obrázek 3 - Výslednice sil v jednotlivých bodech SAT | 14 |
| Obrázek 4 - Změna působíště síly..... | 15 |
| Obrázek 5 - Hmotnosti letadel | 20 |
| Obrázek 6 - Loadsheet | 25 |
| Obrázek 7 - Nakládací instrukce pro standardní vyvážení B737 | 30 |
| Obrázek 8 - Nakládací instrukce pro standardní vyvážení A319 | 31 |
| Obrázek 9 - Nakládací instrukce pro optimální vyvážení B737-700 | 33 |
| Obrázek 10 - Korelace vs. Regrese | 36 |
| Obrázek 11 - Tabulka dat jednotlivých letů | 38 |
| Obrázek 12 - Výsledek regrese Thrust Required a vítr | 39 |
| Obrázek 13 - Závislost Thrust Required při nulovém větru na poloze CG..... | 40 |
| Obrázek 14 - Trend závislosti Thrust Required na poloze CG..... | 40 |