



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Alexandra Lilgová

Kapacitné posúdenie dráhového systému
letiska M. R. Štefánika v Bratislave

Diplomová práca

2019



K621 **Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Alexandra Lilgová

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Kapacitní posouzení dráhového systému letiště
M. R. Štefánika v Bratislavě**

Název tématu (anglicky): Runway Capacity Assessment of M. R. Štefánik Airport in
Bratislava

Zásady pro vypracování

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

- Posouzení aktuální maximální kapacity dráhového systému
- Možnosti zvyšování kapacity dráhového systému
- Návrh kombinace prostředků pro zvýšení kapacity dráhového systému
- Posouzení teoretické maximální kapacity dráhového systému po implementování navržených řešení
- Celkové zhodnocení



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: ICAO Doc. 4444
AIP Slovenská republika
Airport Capacity Assessment Methodology

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Líkař**
Ing. Slobodan Stojíc

Datum zadání diplomové práce: **27. července 2018**
(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 diplomové práce: **28. května 2019**
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. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Alexandra Lilgová
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....27. července 2018

Čestné prohlášení

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 školního 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 Martine dne 28.5.2019

Podpis L. Lyová

Pod'akovanie

Moje poďakovanie patrí predovšetkým vedúcemu tejto diplomovej práce Ing. Petrovi Líkařovi za jeho usmerňovanie, cenné rady a vedenie diplomovej práce. Veľká vďaka patrí aj letisku Bratislava a Letovým Prevádzkovým Službám Slovenskej Republiky, konkrétne stanovisku APP/TWR Štefánik za poskytnutie podkladov a konzultácií k diplomovej práci. V neposlednom rade tiež rodine za veľkú podporu počas celého štúdia.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA DOPRAVNÍ

Kapacitné posúdenie dráhového systému letiska M. R. Štefánika v Bratislave

Diplomová práca

Bc. Alexandra Lilgová

2019

Abstrakt

Predmetom tejto diplomovej práce bolo kapacitné posúdenie dráhového systému letiska M.R. Štefánika v Bratislave vo viacerých prevádzkových módoch s navrhnutím možností zvýšenia kapacity dráhového systému a posúdenia nárastu kapacity po implementovaní navrhovaných riešení.

Kľúčové slová

Letisko Bratislava, kapacita dráhového systému, posúdenie dráhovej kapacity, zvýšenie kapacity dráhového systému

Abstract

The aim of this thesis was to deliver runway capacity assessment of M.R.Štefánik airport in Bratislava during several modes of operation and to propose various solutions for runway capacity enhancement with the aim to determine the capacity increase after implementing suggested solutions.

Key words

Bratislava airport, runway capacity, runway capacity assessment, enhancing runway capacity

Obsah

Zoznam použitých skratiek.....	7
1 Úvod.....	9
1.1 Motív	9
1.2 Ciele.....	11
1.3 Postup.....	11
1.4 Charakteristika letiska Milana Rastislava Štefánika v Bratislave.....	12
2 Posúdenie aktuálnej maximálnej kapacity dráhového systému	13
2.1 Pojem kapacita dráhového systému	13
2.2 Možnosti posúdenia kapacity dráhového systému.....	14
2.2.1 Metódy a nástroje používané na posúdenie kapacity dráhového systému.....	14
2.2.2 Výber vhodného nástroja / metódy	17
2.3 Popis použitého nástroja.....	18
2.3.1 Princíp fungovania modelu	18
2.3.2 Všeobecný popis vstupov do modelu.....	22
2.3.3 Proces spracovania vstupov a princípy výpočtov.....	29
2.4 Nastavenie modelu	41
2.4.1 Prevádzkové postupy a dráhový systém letiska Bratislava	41
2.4.2 Testované riešenia a vstupné hodnoty	42
2.5 Výsledky.....	55
2.5.1 Kapacita RWY 31.....	56
2.5.2 Kapacita RWY 22.....	56
2.5.3 Kapacita RWY 31 za podmienok nízkej viditeľnosti.....	57
2.5.4 Kapacita dráhového systému v primárnej konfigurácii.....	58
2.5.5 Kapacita dráhového systému v sekundárnej konfigurácii.....	58
2.6 Zhodnotenie výsledkov	59
3 Všeobecné možnosti zvyšovania capacity dráhového systému.....	60
3.1 Riešenia umožňujúce zvýšenie dráhovej kapacity	62
3.1.1 Manažér priletov (AMAN-arrival manager).....	62
3.1.2 Manažér odletov (DMAN-departure manager).....	63
3.1.3 Ground Based Augmentation System (GBAS)	63

3.1.4	Microwave Landing System (MLS)	64
3.1.5	Časové separácie (Time-Based Separations).....	64
3.1.6	Výjazd z dráhy a rýchloodbočka na vhodnom mieste	64
3.1.7	Rekategorizácia typov lietadiel podľa turbulencie v úplave (RECAT-EU).....	64
3.1.8	RECAT 2, RECAT 3	65
3.1.9	Divergentné odletové trate	66
3.1.10	Zhrnutie	66
4	Návrh kombinácie prostriedkov na zvýšenie capacity dráhového systému na skúmanom letisku a posúdenie zvýšenia kapacity po ich implementovaní.....	67
4.1	Faktory limitujúce kapacitu dráhového systému na letisku Bratislava	67
4.2	Prostriedky vhodné na implementáciu	72
4.2.1	Rekategorizácia typov lietadiel	72
4.2.2	Divergentné odletové trate	72
4.3	Zhrnutie	73
5	Diskusia	74
6	Záver	77
	Použitá literatúra	80
	Zoznam obrázkov	83
	Zoznam tabuliek	84
	Zoznam príloh	85
	Príloha 1	86

Zoznam použitých skratiek

AMAN	Arrival Manager	Manažér príletov
APP	Approach	Prílet
AROT	Arrival runway occupancy time	Čas vzťahujúci sa k pristávajúcemu lietadlu meraný od dotyku lietadla po opustenie dráhy
ATC	Air Traffic Control	Služba riadenia letovej prevádzky
DMAN	Departure Manager	Manažér odletov
FAA	Federal Aviation Administration	Americký úrad pre civilné letectvo
FAF	Final Approach Fix	Bod konečného priblíženia
GBAS	Ground Based Augmentation System	Pozemný systém spresňujúci údaje zo satelitnej navigácie
ILS	Instrument Landing System	Systém pre presné prístrojové priblíženie
IMC	Instrument Meteorological Conditions	Meteorologické podmienky vyžadujúce let podľa prístrojov
LVP	Low Visibility Procedures	Procedúry pre podmienky za nízkej viditeľnosti
MLS	Microwave Landing System	Mikrovlnný systém pre presné prístrojové priblíženie
MTOW	Maximum Take-Off Weight	Maximálna vzletová hmotnosť
RPK	Revenue Passenger Kilometers	Príjem z osobokilometrov

RPZ	Runway Protection Zone	Zóna určená na ochranu majetku a osôb
RSA	Runway Safety Area	Zóna v okolí dráhy určená na ochranu lietadiel
RVR	Runway Visual Range	Dráhová dohľadnosť
RWY	Runway	Vzletová a pristávacia dráha
SID	Standard Instrument Departure	Štandardný prístrojový odlet
TWR	Tower	Riadiaca veža
VMC	Visual Meteorological Conditions	Meteorologické podmienky lepšie ako stanovené minimá pre IMC

1 Úvod

V posledných desaťročiach narazilo mnoho letísk na svoje kapacitné limity z dôvodu kontinuálneho nárastu leteckej prevádzky, ktorý nebol spojený s vývojom novej infraštruktúry. (1) Jedným z limitujúcich faktorov je pre letiská kapacita dráhového systému, ktorá je zároveň kľúčovým parametrom ovplyvňujúcim vývoj letiska. Jej dôkladné preskúmanie pomáha letiskám definovať možnosti ďalšieho rozvoja ako aj prijať preventívne opatrenia ešte pred dosiahnutím svojich aktuálnych kapacitných limitov. Z tohoto dôvodu je pri prevádzkovaní letiska veľmi dôležitým krokom preskúmanie kapacity dráhového systému a následné identifikovanie možností ďalšieho rozvoja. Nakoľko je proces zvyšovania kapacity dráhového systému zdĺhavý, či už z hľadiska legislatívy, tréningu zamestnancov na nové systémy, výstavby/rekonštrukcie určitých subjektov alebo aj finančne, je dôležité pripraviť podklady rozvoja v dostatočnom predstihu. Stále monitorovanie situácie a porovnávanie voči výpočtom alebo odhadom maximálnej kapacity potom zaisťujú použitie identifikovaných prostriedkov na zvýšenie kapacity dráhového systému vo vhodnom časovom intervale.

Kapacita dráhového systému je veľmi komplexnou metrikou zahŕňajúcou nespočetné množstvo parametrov. Pri jej posudzovaní je potrebné odpovedať na mnoho otázok týkajúcich sa fyzických parametrov dráhového systému, prevádzkových postupov ako aj samotných typov lietadiel operujúcich na danom letisku.

V práci bude kapacita dráhového systému posudzovaná ako samostatná časť nezávisle od skutočnosti, že pri využití maximálnej kapacity dráhového systému nemusí byť kapacita iných subjektov/systémov letiska dostatočná (napríklad: počet stojánok, kapacita odbavovacích systémov alebo kapacita vzdušného priestoru v okolí letiska). Výpočty budú teda posudzovať dráhový systém ako samostatný subjekt s určitou kapacitou, ktorá nemusí byť dosiahnuteľná ostatnými subjektami/systémami letiska.

1.1 Motív

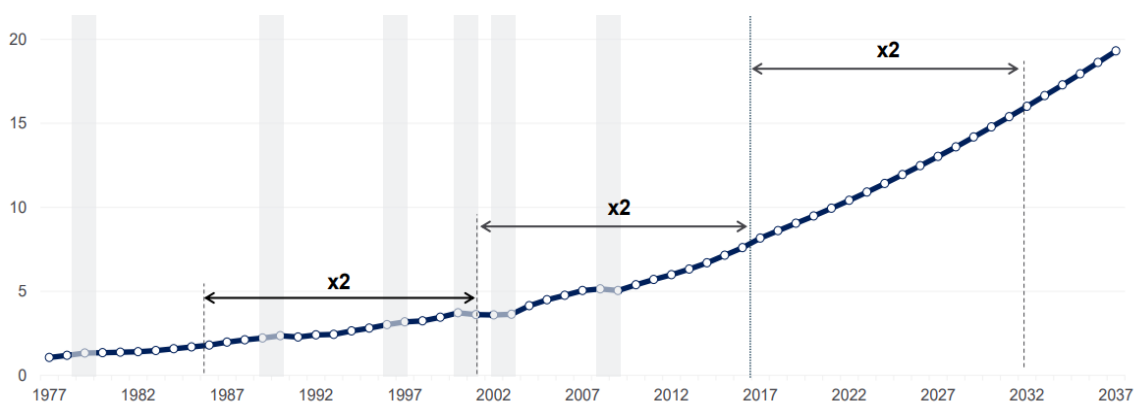
Letisko Milana Rastislava Štefánika v Bratislave aktuálne nečelí kapacitným problémom a z tohoto dôvodu by sa mohlo javiť, že spracovanie takejto tématiky nemá aktuálne dostatočnú prínosnú hodnotu. Posudzovanie kapacity dráhového systému a návrhy na jej zvyšovanie až pri pozorovaní kapacitných problémov môže byť však už veľmi neskorá reakcia na vzniknutý

problém. V nasledujúcej časti je preto predložených niekoľko dôvodov k spracovaniu diplomovej práce na túto tému:

1. Kontinuálny nárast leteckej prevádzky v minulosti a taktiež odhady strmého nárastu leteckej prevádzky v nasledujúcich rokoch/desaťročiach.

Obrázok 1 nižšie znázorňuje vývoj RPK (Revenue Passenger Kilometres) v triliónoch od roku 1977 po rok 2037. RPK v rokoch 1977 – 2017 sú reálne čísla prevzaté od ICAO, vývoj RPK po roku 2017 je predpoveď od Airbusu: Global Market Forecast 2018-2037.

(2) Zvýraznené sú rôzne krízy, ktoré mali na leteckú dopravu v danom období veľký vplyv, no z dlhodobého hľadiska pozorujeme nárast RPK od roku 1977 – konkrétne až zdvojnásobenie RPK za každých 15 rokov.



Obrázok 1: Nárast RPK od roku 1977 do roku 2037 (3)

Strmý nárast podporuje aj štúdiá od Eurocontrolu: European Aviation in 2040, podľa ktorej by sa mal počet letov v Európe zvýšiť o 53% do roku 2040 oproti roku 2017. (4) Takýto strmý nárast prevádzky môže ovplyvniť aj letiská, ktoré aktuálne kapacitným problémom nečelia, či už z dôvodu, že ich samotná prevádzka narastie, alebo budú využívané ako alternatívne letiská, keď sa kapacita naplní na najbližších vyťažených letiskách v okolí. V prípade Bratislavy by mohlo ísť o naplnenie kapacít letiska Viedeň-Schwechat, ktoré je vzdialené len o približne 50 kilometrov z Bratislavy.

2. Potreba definovania aktuálnej situácie na škále končiacej práve maximálnou kapacitou (v našom prípade kapacitou dráhového systému), z dôvodu realistického prehľadu o aktuálnom stave letiska, možnosti sledovať posun na tejto škále smerom ku kapacitným limitom letiska a implementovať nástroje a riešenia zvyšujúce kapacitu dráhového systému pred jej samotným dosiahnutím. Aplikovanie riešení zvyšujúcich kapacitu až pri prevádzkovaní letiska na hranici limitov môže mať negatívny vplyv na bezpečnosť

prevádzky a realizácia inovácií je tiež omnoho náročnejšia pri už vzniknutých kapacitných problémoch.

1.2 Ciele

Ciele tejto práce boli nasledovné:

1. Stanovenie kapacity dráhového systému letiska Milana Rastislava Štefánika v Bratislave v 2 prevádzkových módoch
 - prevádzka na jednej dráhe
 - súčasná prevádzka na oboch dráhach
2. Popis všeobecných možností zvyšovania kapacity dráhového systému
3. Identifikovanie možností zvýšenia dráhovej kapacity s ohľadom na podmienky daného letiska
4. Posúdenie nárastu kapacity po implementovaní navrhovaných riešení

1.3 Postup

K stanoveniu kapacity dráhového systému bol použitý Airfield Capacity Spreadsheet model vytvorený ako súčasť programu The Airport Cooperative Research Program pod vedením US Transportation Research Board a sponzorovaný Federal Aviation Administration. Model bude bližšie popísaný v kapitole 2.3.

K dosiahnutiu cieľov práce bol použitý nasledovný postup:

1. Oboznámenie sa s pojmom kapacita dráhového systému a rešerš súvisiacich informácií,
2. Zoznámenie sa s modelom, princípmi jeho fungovania a vstupmi, ktoré bude potrebné zadať do modelu pre dosiahnutie čo najpresnejších výpočtov,
3. Zoznámenie sa so špecifikami letiska Milana Rastislava Štefánika v Bratislave,
4. Vytvorenie zoznamu údajov – vstupov do modelu, ktoré nie sú verejne dostupné a bude potrebné vyžiadanie týchto údajov od letiska Bratislava a poskytovateľa letových prevádzkových služieb na tomto letisku a v jeho blízkosti,
5. Vyžiadanie potrebných údajov a konzultácia s riadiacimi letovej prevádzky na stanovisku APP/TWR Štefánik,
6. Výpočet aktuálnej kapacity dráhového systému letiska Bratislava,
7. Preskúmanie všeobecných možností zvyšovania kapacity dráhového systému,

2 Posúdenie aktuálnej maximálnej kapacity dráhového systému

Znalosť aktuálnej kapacity dráhového systému je neoddeliteľnou súčasťou plánovania rozvoja každého letiska. Ako bolo spomenuté v úvodných kapitolách, poznať aktuálnu kapacitu dráhového systému a porovnať ju so skutočným vývojom prevádzky umožní letisku určiť vhodný čas na implementovanie prostriedkov zvyšujúcich kapacitu a pomôže predísť prípadným bezpečnostným problémom pri prevádzke na hrane kapacitných limitov.

2.1 Pojem kapacita dráhového systému

Kapacita dráhového systému je parameter, ktorý môže byť interpretovaný viacerými metrikami v závislosti na skúmanej problematike. Kapacitu môžeme vyjadriť ako:

- „*A measure of practical capacity defined as the number of aircraft operations that result in a specified maximum average delay*“ - táto definícia sa používa hlavne pri posudzovaní kapacity simuláciou a určuje počet pohybov za určitú periódu s ohľadom na letiskom požadovaný level služieb vyjadrovaný ako maximálne akceptovateľné meškanie na let . (8)
- „*A measure of maximum sustainable throughput*“ - vyjadruje maximálny počet vzletov a pristátí, ktoré môžu byť bezpečne uskutočnené na vzletovej a pristávacej dráhe s ohľadom na miestne charakteristiky a podmienky pokiaľ je zabezpečený stály dopyt počas danej časovej periódy. (8) Táto diplomová práca sa zaoberá kapacitou práve v tomto zmysle.

Metriky vzťahujúce sa k definícii „*A measure of maximum sustainable throughput*“ (8), používané na vyjadrenie počtu pohybov, sa delia podľa časových intervalov, v ktorých sú merané/počítané. Každá z metrik má svoje špecifické využitie, tak ako je popísané v nasledujúcej časti:

- Hodinová kapacita
Hodinová kapacita je najpoužívanejšou metrikou a vyjadruje počet pohybov (vzletov a pristátí), ktoré môžu byť uskutočnené na dráhe za jednu hodinu. Tento časový interval je dostatočný na to, aby zahŕňal vplyvy rôznorodosti typov vzlietajúcich a pristávajúcich lietadiel, ich separácií, pomer vzletov a pristátí v danej hodine či závislosti dráh. (9)

- Nižšia ako hodinová kapacita
Nižšia ako hodinová kapacita sa využíva hlavne z dôvodov slotovej koordinácie. Ide väčšinou o kapacitu v 10 až 15 minútových intervaloch. (9)
- Denná kapacita
Priemerná denná kapacita za určité obdobie je málo využívaným parametrom. Môže byť však vhodná v prípadoch, kedy je hodinová kapacita dráhového systému daného letiska výrazne ovplyvňovaná určitými podmienkami, ako napríklad: počasie alebo hlukové procedúry, a hodinová kapacita by mohla byť zavádzajúcim údajom. (9)
- Ročná kapacita
Ročná kapacita je využívaná hlavne pre strategické ciele a „master planning“, resp. plánovanie vízií do budúcnosti. (9)

V tejto diplomovej práci budú všetky zmienky o kapacite vyjadrované ako počet pohybov na dráhe za jednu hodinu – používaná bude teda hodinová kapacita.

2.2 Možnosti posúdenia kapacity dráhového systému

Na posúdenie kapacity dráhového systému je možné využiť viacero metód a nástrojov.

Nástrojom je myslený model/softvér do ktorého sa zadajú vstupné dáta, môže zahŕňať rôzne nastavenia a obsahuje predefinované vzorce, na základe ktorých počíta výslednú kapacitu. V najjednoduchšom prípade môžeme za nástroje považovať aj vzorce.

Metódou je myslený spôsob akým daný nástroj pracuje. Poznáme dva typy metód – analytickú a simulačnú. Analytickou metódou sú myslené postupnosti určitých výpočtov/úvah vedúce k finálnemu výsledku. Simulačnú metódu využívajú softvéry s cieľom napodobniť reálne stavy alebo procesy. Simulácia dokáže v niektorých prípadoch riešiť analyticky neriešiteľné úlohy, prípadne uľahčuje riešiť ťažko riešiteľné úlohy. (10)

Výber vhodného nástroja či metódy je závislý na mnohých parametroch. Táto kapitola preto načrtne postup pri výbere vhodného spôsobu posúdenia kapacity dráhového systému a poskytne prehľad používaných nástrojov a ich charakteristík.

2.2.1 Metódy a nástroje používané na posúdenie kapacity dráhového systému

Nasledujúca kapitola poskytne prehľad nástrojov a metód používaných na posúdenie dráhovej kapacity od tých najjednoduchších až po zložité softvéry.

Z hľadiska metód môžeme nástroje rozdeliť na 2 typy, a to nástroje využívajúce analytickú metódu a nástroje využívajúce simulačnú metódu.

- Analytická metóda sa používa zväčša na predbežné posúdenia, jej výsledky sú menej presné, ale dostačujúce pre svoj účel. (11)
- Simulačná metóda je presnejšia a poskytuje detailnejší rozbor problému, čo sa odráža na dĺžke a cene spracovania štúdie. Z tohto dôvodu sa používa vo finálnej fáze posudzovania kapacity a pri detailnom rozbere podobných scenárov/variant. (11)

Nástroje používané pre posúdenie dráhovej kapacity rozdelené podľa metód akú využívajú:

- Posúdenie kapacity pomocou historických dát – analytická metóda
Takéto posúdenie je viac kvalitatívne ako kvantitatívne, čo znamená, že neposkytuje presné čísla. Pozorovaním vývoja kapacity dráhového systému môžeme určiť aké vplyvy mali jednotlivé zásahy v minulosti a predpokladať vývoj kapacity po implementovaní podobných zmien. Táto metóda vyžaduje zbieranie presných a detailných informácií, aby bolo možné v budúcnosti nájsť súvislosti medzi jednotlivými príčinami a dôsledkami, ktoré ovplyvňujú kapacitu dráhového systému. (9)
- Vyhľadávacie tabuľky – analytická metóda
Obežník AC 150/5060 už z roku 1983 poskytol vzory na výpočet hodinovej kapacity dráhového systému. Tieto vyhľadávacie tabuľky boli naposledy aktualizované v roku 1995, avšak charakteristiky vplyvajúce na dráhovú kapacitu, ktoré tu boli použité, sú aj dnes základom pre výpočet predbežných výsledkov a to konfigurácia dráhového systému a typy lietadiel operujúcich na danom letisku.(9) Predbežných z toho dôvodu, že na presnejšie výsledky je potreba zahrnúť do výpočtov ďalšie parametre, ktoré v týchto tabuľkách nie sú zapracované. Z týchto vyhľadávacích tabuliek a metodológie popísanej v obežníku AC 150/5060 bolo vytvorených viacero tabuľkových procesorov, ktoré rozširovali a upresňovali výpočet dráhovej kapacity. (9)
- Tabuľkové procesory – analytická metóda
Ako už bolo spomenuté vyššie, tabuľkové procesory boli vyvinuté z vyhľadávacích tabuliek popísaných v obežníku AC150/5060. Okrem konfigurácie dráhového systému a typov lietadiel operujúcich na danom letisku už zahŕňali aj pozície výjazdov z dráhy,

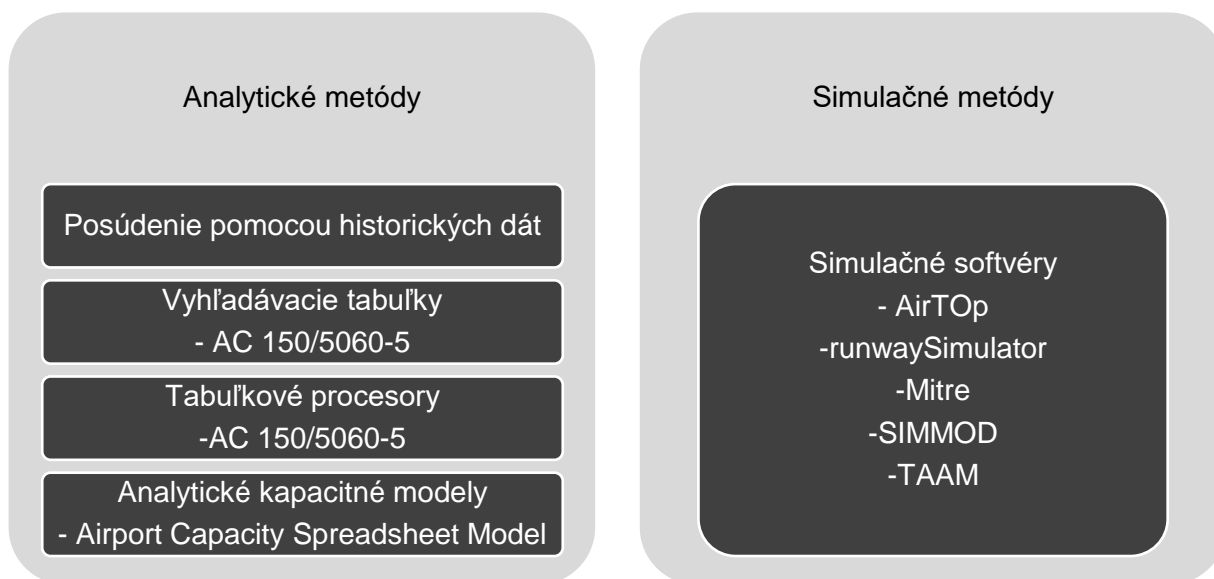
čo má vplyv na čas obsadenosti dráhy pri pristáti a percentuálne množstvo priletov (v porovnaní s odletmi). (9) Táto metóda sa využíva taktiež na predbežné určenie kapacity dráhového systému, nakoľko v nej stále nie sú zahrnuté dôležité parametre, ktoré sa v súčasnosti vyskytujú na mnohých medzinárodných letiskách. Ide hlavne o nové koncepty ako napríklad časové separácie, manažér priletov/odletov, rekategorizácia lietadiel podľa turbulencie v úplave a iné. Niektoré z týchto konceptov sú implementované už v analytických kapacitných modeloch a tie najzložitejšie až v simulačných modeloch. (9)

- Analytické kapacitné modely – analytická metóda
Analytické kapacitné modely vychádzajú z vyhľadávacích tabuliek a tabuľkových procesorov. Do výpočtov boli zahrnuté ďalšie parametre, ako napríklad: príletové separačné minimá, časy obsadenosti dráhy pri prilete, radenie lietadiel podľa turbulencií v úplave, rýchlosti na priblížení či ATC procedúry.(9) Tieto parametre sú zadané ako vstupy a preddefinovaná sekvencia vzorcov je potom použitá na výpočet. Do tejto skupiny patrí aj nami používaný model pre výpočet dráhovej kapacity.

- Simulačné kapacitné softvéry – simulačná metóda
Simulačné modely sú veľmi flexibilné čo sa týka možností implementovania rôznych charakteristík ako napríklad:
 - a. Celková konfigurácia letiska a špecifické módy použitia relevantné pre dané letisko
 - b. ATC procedúry (letiskové aj procedúry v príslušnom vzdušnom priestore)
 - c. Letiskové prevádzkové postupy
 - d. Vstupy na dráhy a odbočky z dráh
 - e. Typy lietadiel a sekvenčné radenie lietadiel podľa turbulencie v úplave
 - f. Algoritmy radenia lietadiel
 - g. Rôzne iné systémy, technológie a moderné koncepty
 - h. Simulovanie dopytu v budúcnosti (8)

Simulačné metódy vyžadujú značné úsilie, čas prípravy a veľa optimalizovania a doladovania detailov. Treba však poznamenať, že pre letiská využívajúce tieto modely na pravidelnej báze sa náklady rozložia do dlhšieho časového horizontu a prinesú presné a detailné výsledky. Simulačné softvéry sa používajú až pri potrebe detailných výstupov, nakoľko, ako už bolo spomenuté, sú veľmi časovo a finančne náročné. (9)

Súhrnný prehľad metód a nástrojov s konkrétnymi príkladmi používaných pri posúdení dráhovej kapacity:



(8)

2.2.2 Výber vhodného nástroja / metódy

Výber vhodného nástroja a metódy na posúdenie dráhovej kapacity je kľúčový a závisí hlavne na výstupoch, aké požadujeme. Nástroje dokážu do svojich výpočtov zahrnúť rôzne parametre a z tohoto dôvodu poskytujú výsledky s rôznou presnosťou. Od presnosti nástroja závisí aj doba a náklady potrebné na spracovanie kapacitnej štúdie.

- Prvým krokom pri výbere nástroja, alebo metódy je preto otázka zámeru použitia výstupu a teda aj jeho detailnosti. Čím je požadovaný detailnejší výstup, tým viac parametrov je potrebných aj na vstupe. Predlžuje sa tiež doba celého posúdenia a jeho zložitosť, čo zvyšuje náklady. Je preto dôležité zvážiť ako bude výstup použitý a aké podmienky by sa v ňom mali odzrkadľovať. Rozdielny nástroj by mal byť použitý na predbežné odhady do budúcnosti, bez potreby zahŕňať aktuálne prevádzkové či meteorologické podmienky a iný zas na posúdenie 2 takmer totožných scenárov s jedným rozdielom - napríklad v znížení separácií o pár sekúnd. V prvom kroku je teda potreba špecifikovať zámer použitia výstupu a z toho vyplývajúcej potrebnej detailnosti.
- Druhým krokom je špecifikovanie parametrov, ktoré by mali byť vo výpočte zahrnuté tak, aby boli odzrkadlené vo výslednej kapacite dráhového systému. Tieto parametre sa môžu pre rôzne letiská líšiť, principiálne však ide o nasledovné kategórie parametrov: fyzické parametre dráh a umiestnenie odbočiek, prevádzkové postupy,

používané ATM systémy, vzdušný priestor v okolí letiska a typy lietadiel využívajúce letisko. Každá z týchto kategórií obsahuje množstvo parametrov. Nie každá metóda alebo nástroj však dokáže tieto parametre do svojich výpočtov zahrnúť. Opäť platí, že zámer a použitie výstupu musia odzrkadľovať vstupné parametre.

V praxi sa pri posudzovaní kapacity dráhového systému a zmien vplývajúcich na kapacitu v prvom kroku využívajú analytické metódy. Pokiaľ sa ukáže potreba detailnejšieho rozboru konkrétneho problému v druhom kroku sa použije simulačná metóda. Nakoľko je táto práca zameraná na prvotné posúdenie dráhovej kapacity a predbežné načrtnutie možností zvýšenia kapacity, budeme používať analytickú metódu aplikovanú v kapacitnom modeli.

2.3 Popis použitého nástroja

Prototype Airfield Capacity Spreadsheet Model je analytickým modelom v prostredí excelu, vyvinutý ako súčasť projektu ACRP¹ Projekt 03-17 Evaluating Airfield Capacity s cieľom slúžiť ako prototyp modelovacieho nástroja pre výpočet dráhovej kapacity. Je voľne dostupný k stiahnutiu² a využívaný by mal byť na predbežné určenie kapacity dráhového systému. Model počíta s hodinovou kapacitou a definuje ju ako vypočítané číslo pohybov, ktoré je letisko s danou dráhovou konfiguráciou schopné bezpečne obslúžiť za podmienok, ktoré sú zadávané vo forme vstupov (napr. typy lietadiel operujúcich na danom letisku, separačné minima, polohy výjazdov z dráh, atď.). Zmeny vstupov sú dynamicky prepočítavané tak, aby čo najlepšie reprezentovali zmeny za reálnych podmienok. Model obsahuje 3 varianty pre dráhové systémy pozostávajúce z:

- jednej dráhy,
- dvoch paralelných dráh a
- dvoch križujúcich sa dráh (resp. dvoch konvergentných/divergentných dráh). (12)

V nasledujúcej časti bude popísaný princíp fungovania modelu.

2.3.1 Princíp fungovania modelu

Vypočítanie kapacity dráhového systému pomocou použitého modelu pozostáva zo 4 fáz.

¹ ARCP (The Airport Cooperative Research Program) je projekt, ktorého cieľom je vyvíjať praktické riešenia na problémy z oblasti letísk a letiskových prevádzkovateľov. Podporuje a financuje viac než 20 projektov ročne. Program je riadený US Transportation Research Board (TRB), ktorá spadá do akademickej pôdy a financovanie je zabezpečené cez Federal Aviation Administration (FAA).

² Dostupný na adrese: <http://www.trb.org/Publications/Blurbs/168260.aspx>

1. Výber varianty modelu podľa konfigurácie dráhového systému:

- variant jednej dráhy,
- dvoch paralelných dráh alebo
- dvoch križujúcich sa dráh

2. Zadanie vstupov

Model pracuje so vstupmi prezentovanými na obrázku nižšie. Všetky tieto vstupy sú odzrkadlené vo výpočte a majú vplyv na výslednú vypočítanú dráhovú kapacitu.

Fyzické parametre

- Konfigurácie dráhového systému
- Pozícia kríženia dráh
- Výjazdy z dráh
- Existencia paralelnej rolovacej dráhy k celej dĺžke RWY
- Vzdialenosť od FAF po prah dráhy
- Poloha prahov dráh v súvislosti s runway safety area (RSA) a runway protection zone (RPZ)

Letová prevádzka

- Zastúpenie kategórií lietadiel operujúcich na danom letisku
- Čas obsadenosti dráhy pri prilete
- Rýchlosti na priblížení pre každú kategóriu lietadiel
- Priemerná decelerácia na priblížení
- Priemerná akcelerácia pri odletoch
- Pomer medzi počtom priletov a odletov v jednej hodine
- Percentuálny podiel "touch and go" letov
- Percentuálny podiel času, kedy je letisko prevádzkované za VMC a IMC

Prevádzkové postupy

- Separácie odlet-prílet za VMC a IMC podmienok
- Separácie prílet-prílet za VMC a IMC podmienok
- Separácie odlet-odlet za VMC a IMC podmienok
- Dodatočné rezervy pri separáciách
- Deviacie (odchyly) pri separáciách prilietavajúcich a odlietavajúcich lietadiel
- Hodnota Z (percento lietadiel, ktoré sa budú správať podľa nastavených kritérií separácií)
- Využívanie divergentných odletových tratí
- Existencia riadiacej veže na danom letisku
- Dodatočná separácia na priletoch z dôvodu potreby križovania dráhy

(12)

Všetky tieto vstupy budú detailne rozobraté a popísané v kapitole 2.3.2.

Model vypočíta kapacitu s najväčšou presnosťou pokiaľ sú všetky tieto vstupy detailne monitorované a správne použité v modeli. V prípade, že tieto hodnoty nie sú známe, je potreba ich určiť na základe dodatočného merania prípadne kvalifikovaného odhadu, čo však môže znížiť presnosť výstupu.

3. Výpočet dráhovej kapacity

Výpočet dráhovej kapacity je založený na spracovaní kombinácie zadaných vstupov a zvolených nastavení pomocou viacerých výpočtov. Detailný popis výpočtov a princípu fungovania modelu sa nachádza v kapitole 2.3.3, po zoznámení sa s definíciami vstupov do modelu.

4. Zhodnotenie výstupov

Výstupom z celej kalkulácie je počet pohybov za 1 hodinu s ohľadom na zadané podmienky.

Model poskytuje výstupy – vypočítanú hodinovú kapacitu dráhového systému nasledovne:

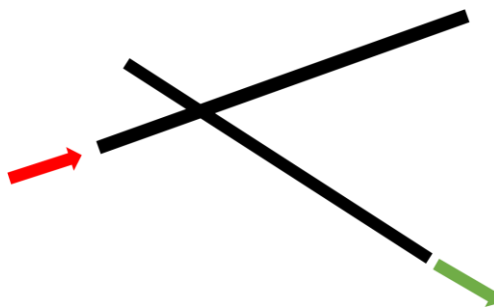
a. Pre dráhový systém pozostávajúci z jednej dráhy

- Kapacita priletov
- Kapacita priletov vrátane „touch and go“ letov
- Kapacita odletov
- Kapacita odletov pri maximálnom počte priletov vrátane „touch and go“ letov
- Celková kapacita odletov a priletov
- Percentuálny podiel priletov na celkovej kapacite

Všetky tieto hodnoty sú vypočítané pre VMC, IMC a priemerné zadané podmienky odzrkadľujúce situáciu na danom letisku.

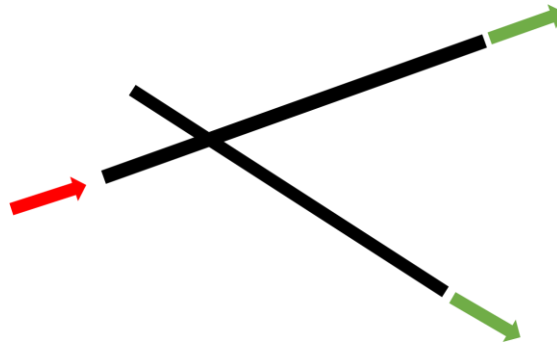
b. Pre dráhový systém pozostávajúci z 2 krížiacich sa dráh je možnosť vybrať si zo 4 rôznych konfigurácií dráhového systému a ku každej z týchto konfigurácií 2 módy prevádzky. V tejto práci bude popísaná iba konfigurácia, kde spadá letisko Bratislava s posúdením oboch módov prevádzky. Týmito módmi je myslené:

- Prílety na jednu dráhu a odlety z druhej dráhy – zobrazené nižšie na obrázku 3



Obrázok 3: Múd prevádzky, kde sú prílety vykonávané na jednu dráhu a odlety z druhej dráhy (5)

- Prílety na jednu dráhu a odlety z oboch dráh – zobrazené na obrázku 4



Obrázok 4: Mód prevádzky, kde sú prílety vykonávané na jednu dráhu a odlety z oboch dráh (5)

Pre túto dráhovú konfiguráciu a oba módy prevádzky poskytuje model nasledovné výstupy:

- Kapacita príletov
- Kapacita príletov vrátane „touch and go“ letov
- Kapacita odletov na dráhe pre prílety zapríčinená typmi letov „touch and go“
- Kapacita odletov na dráhe, kde sú vykonávané prílety (iba pre mód na obrázku 4)
- Kapacita odletov na dráhe určenej iba pre odlety
- Celková kapacita odletov a príletov
- Percentuálny podiel príletov na celkovej kapacite

Tieto výstupy s konkrétnymi vypočítanými hodnotami sú popísané v kapitole 2.5.

Na zobrazenie výstupov bude použitý graf, ktorý zobrazí počty príletov a odletov, ktoré je v jednej hodine možné pomocou daného dráhového systému obslúžiť. Počet príletov je vždy závislý na počte odletov a naopak. Pri hľadaní maximálnej kapacity je vhodné výsledky prezentovať na grafe typu „pareto frontier“, kde sa dajú nájsť body, v ktorých už ďalšie zvýšenie kapacity za daných podmienok nie je možné.

Na obrázku 5 je znázornený príklad grafu, ktorý bude cieľom vytvoriť aj z našej analýzy.



Obrázok 5: Typ grafu "pareto frontier" (12)

Na osi x sú zobrazované počty odletov za hodinu a na osi y počty priletov za hodinu. Červené body a línie označujú maximálnu kapacitu priletov a odletov uskutočniteľných za 1 hodinu. Priestor za hranicou obsahuje kombinácie, ktoré nie sú daným dráhovým systémom za zadaných podmienok uskutočniteľné. Všetky body (počty priletov a odletov) vo vnútornej časti grafu (pod líniou zobrazujúcou limity) sú uskutočniteľné. Cieľom tohoto grafu je znázorniť kapacitné limity dráhového systému. (9)

2.3.2 Všeobecný popis vstupov do modelu

Použitý model obsahuje množstvo vstupov a nastavení. Pre dosiahnutie čo najpresnejšieho výpočtu je kľúčové im správne porozumieť a zadať čo najpresnejšie hodnoty. Táto kapitola je preto venovaná detailnému popisu vstupov a možností nastavenia modelu. Tento popis bude zatiaľ všeobecný, tak, aby sa dal využiť pre akékoľvek letisko a v kapitole 2.4, budú predložené a odôvodnené hodnoty použité pri modelovaní kapacity dráhového systému na letisku Milana Rastislava Štefánika v Bratislave.

V modeli máme 2 typy vstupov:

- Všeobecné vstupy - Zadanie všeobecných vstupov je povinné, nakoľko preddefinované hodnoty nastavené v modeli neodrážajú špecifiká skúmaného letiska (slúžia iba ako orientačné hodnoty). Tieto vstupy by preto dôkladne preskúmané, aby nedošlo k zadaniu nepravdivých informácií, ktoré by mali veľký vplyv na výsledky modelu.(12)
- Rozšírené vstupy – Hodnoty rozšírených vstupov sú v modeli preddefinované ako priemerné hodnoty prevzaté z dokumentu EM78-8A report on airport capacity and delay od FAA. , ktoré sú veľmi podobné na mnohých letiskách. Keď ich užívateľ nezmení,

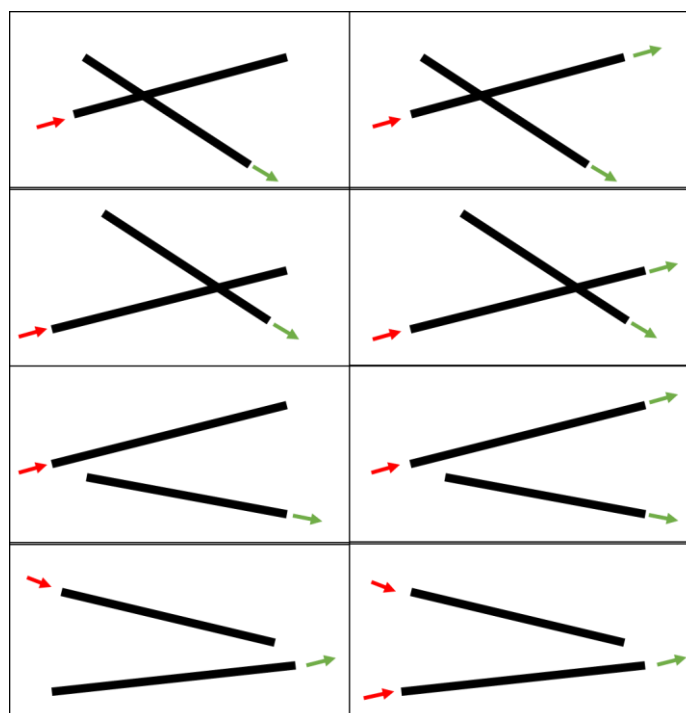
nemajú veľký vplyv na výslednú kapacitu. Vynechať sa môžu hlavne z časových a finančných dôvodov pri určovaní veľmi predbežnej kapacity dráhového systému. Nastavením týchto hodnôt podľa daného letiska je však tento model možné optimalizovať do väčšej hĺbky a dostať presnejšie výsledky.(12)

Pre potreby tejto diplomovej práce budú všetky vstupy zadané tak, aby čo najreálnejšie odzrkadľovali situáciu letiska Bratislava s ohľadom na dostupné dáta.

Popis veličín a charakteristík³, ktoré vstupujú do výpočtu kapacity dráhového systému:

A. Fyzické parametre

- **Nastavenie konfigurácie dráhového systému letiska** – model pre 2 krížiace sa/konvergentné/divergentné dráhy dokáže pracovať so 4 konfiguráciami, kde každá je rozdelená na 2 rôzne módy prevádzky. Je potrebné vybrať konfiguráciu aj konkrétny mód prevádzky. Tieto konfigurácie a módy sú zobrazené na obrázku 6, kde sú vedľa seba vždy vyobrazené 2 možné módy prevádzky jednej dráhovej konfigurácie.



Obrázok 6: Konfigurácie a módy prevádzky dráhového systému pozostávajúceho z 2 krížiacich sa/konvergentných/divergentných dráh (12)

³ Pokiaľ nie je uvedené inak, popis vstupov je prevzatý z: ARCP Report 79: Evaluating Airfield Capacity, 2012 doplnený o vlastné postrehy pri práci s modelom a odvodené vzorce použité v modeli

Konfigurácia dráhového systému a mód prevádzky na nej ovplyvňuje hlavne separácie jednotlivých lietadiel. Pokiaľ sa dráhy krížia v mieste, kde lietadlá ešte nie sú vo vzduchu, nie je potrebné brať do úvahy turbulenciu v úplave. Konvergentné a divergentné dráhy, ktoré sa nekrižia zas nemusia počítať s potenciálnym konfliktom na zemi.

- **Pozícia kríženia dráh** – Ako už bolo spomenuté, vzdialenosť kríženia od oboch prahov dráh ovplyvňuje separácie, ktoré sa líšia pre lietadlá pohybujúce sa po zemi a lietadlá, ktoré sú už/ešte letiace.
- **Výjazdy z dráh** – počet výjazdov z dráh má veľký vplyv na čas obsadenosti dráhy pri príletoch, ktorý veľmi výrazne ovplyvňuje kapacitu dráhového systému. Čím kratšie sa lietadlá zdržia na dráhe, tým viac pohybov je za daný časový úsek možné uskutočniť. Použitie najbližšieho možného výjazdu⁴ z dráhy výrazne zvyšuje celkovú kapacitu dráhového systému, preto pri nedostatočnom počte výjazdov model automaticky znižuje vypočítanú kapacitu. Viac vhodne umiestnených výjazdov pre rôzne kategórie lietadiel umožní opúšťať dráhu čo najskôr po pristátí, zníži priemerný čas obsadenosti dráhy a umožní viac vzletov a pristátí za daný časový interval.
- **Existencia paralelnej rolovacej dráhy po celej dĺžke RWY** – tento parameter súvisí s počtom výjazdov z dráh a spolu umožňujú zvyšovať kapacitu dráhového systému na základe rýchleho opúšťania dráhy pristávajúcimi lietadlami. Tak ako pri počte výjazdov z dráh, aj pri neúplnosti paralelnej dráhy model znižuje vypočítanú kapacitu dráhového systému, pretože nie je umožnené menším typom lietadiel opustiť dráhu skorej a tým znížiť čas jej obsadenosti.

Pokiaľ je zadaný priemerný čas obsadenosti dráhy jednotlivými kategóriami lietadiel na základe pozorovaní a meraní na danom letisku⁵, nie je potreba meniť defaultné nastavenia výjazdov z dráh a paralelnej rolovacej dráhy, pretože tieto 3 parametre spolu súvisia a presný čas obsadenosti dráhy je pre výpočty modelu presnejší ako počet výjazdov z dráh a paralelná rolovacia dráha.

- **Vzdialenosť od bodu konečného priblíženia (FAF) po prah dráhy** – je vzdialenosť definovaná ako vzdialenosť od bodu kde lietadlo začína konečné priblíženie po prah

⁴ Najbližším možným výjazdom je myslený teoretický výjazd, kedy má lietadlo dostatočne nízku rýchlosť pre bezpečné odbočenie z dráhy

⁵ Vstup popísaný v kategórii letová prevádzka

dráhy. Na tejto vzdialenosti sa lietadlá k sebe približujú, alebo sa od seba vzdiaľujú na základe rozdielov v približovacích a pristávacích rýchlostiach. Typicky býva táto vzdialenosť 5 až 10 NM a má vplyv na dodatočné separácie v prípade, že rýchlejšie lietadlo letí za pomalším a dobieha ho.

- **Runway Safety Area (RSA) a Runway Protection Zone (RPZ)** – v tejto časti je potrebné nastaviť, či prah jednej z dráh zasahuje do Runway Safety Area alebo do Runway Protection Zone druhej dráhy. Ak prah jednej dráhy zasahuje do RSA druhej dráhy, budú dráhy považované za závislé pri VMC podmienkach. Ak prah jednej dráhy zasahuje do RPZ druhej dráhy, budú dráhy považované za závislé počas IMC podmienok.

B. Letová prevádzka

- **Typy lietadiel operujúcich na letisku (fleet mix)** – v používanom modeli sú klasické 4 kategórie (light, medium, heavy, super heavy) rozdelené do 7 kategórií, aby umožňovali presnejšie nastavenie modelu, nakoľko typy lietadiel sú jedným z určujúcich faktorov maximálnej dosiahnuteľnej kapacity dráhového systému a boli používané už pri prvých pokusoch o výpočty kapacít – vo vyhľadávacích tabuľkách. Cieľom tohoto nastavenia je teda čo najpresnejšie reprezentovať percentuálne rozdelenie jednotlivých kategórií, čo ďalej vstupuje do procesu párovania lietadiel na pristátia aj na vzlety. Model si vytvára maticu pravdepodobnosti – aká je pravdepodobnosť, že lietadlo jednej kategórie bude pristávať alebo vzlietať za lietadlom druhej (alebo aj rovnakej) kategórie. Hodnotami pravdepodobnosti z tejto matice sa potom násobia všetky separácie a počíta sa priemerná hodnota separácií na príletoch a odletoch, aby bolo možné dostať z výpočtov jedno konečné číslo – hodinovú kapacitu dráhového systému. Tabuľka 1 znázorňuje kategórie lietadiel použité pre potreby modelu.

Kategória lietadla	Popis kategórie	Hmotnosť	Príklad lietadla
Small-S	Small-Single Engine (malé jednomotorové lietadlá)	< 12 500 lbs	BE36, C172, C210, PA28, PA38, PA46, PC12, TBM7, SR20
Small-T	Small-Twin Engine (malé dvojmotorové lietadlá)	< 12 500 lbs	BE19, BE20, BE30, BE55, BE58, BE9L, C425, C441, C500, DHC6, PA44

Small +	Small-Twin Engine (malé dvojmotorové lietadlá)	12 500 – 41 000 lbs	BE40, C25A, C560, C750, CL30, EMB120, FA50, GALX, LJ35, LJ55, SBR1
Large-TP	Large-Turbo Prop (veľké turbopropové lietadlá)	41 000 – 255 000 lbs	ATR 42, ATR 72, Dash 8 Q300/400, Dash 8 Q100/200 a Saab 340 nespĺňajú hmotnostnú podmienku, no patria tiež do tejto kategórie
Large-jet	Large-Jet (veľké prúdové lietadlá)	41 000 – 255 000 lbs	A320 family, B737 séria, DC-9 séria, MD 80/82/83/88/89, Gulfstream III/IV/V, CRJ100/200/700/900, ERJ135/140/145, EMB170/175/190/195, CL60
Large-757	Boeing 757 Series (Boeing 757 séria)	255 000 – 300 000 lbs	B757-200/300
Heavy	Heavy-Multi Engine (ťažké viacmotorové letadlá)	> 300 000 lbs	A300/310, A330/340/350, A380, B747 séria, B767/777, B787, DC-10/MD-11

Tabuľka 1: Popis kategórií lietadiel používaných v modeli (12)

- **Čas obsadenosti dráhy pri prilete (Arrival Runway Occupancy Time - AROT) pre každú kategóriu lietadiel** – čas obsadenosti dráhy sa v používanom modeli zadáva ako hodnota od dotyku lietadla na dráhe po jej opustenie. Tento čas je špecifický pre každé lietadlo. Pre účely tohoto modelu sa do vstupov zadáva priemerný čas obsadenosti dráhy pri prilete podľa jednotlivých kategórií. Čas obsadenosti dráhy závisí okrem typu lietadla hlavne na rozmiestnení odbočiek z dráhy a prítomnosti rýchloodbočiek, ktoré urýchľujú uvoľnenie dráhy pre ďalšie lietadlá. Minimalizáciou času obsadenosti dráhy výrazne zvyšujeme kapacitu dráhového systému.
- **Rýchlosti na priblížení pre každú kategóriu lietadiel** – model poskytuje prednastavené defaultné hodnoty. Tie boli určené na základe priemerných rýchlostí typov lietadiel patriacich do každej kategórie. Tieto hodnoty nie sú až tak závislé od letiska, ako od typov lietadiel, preto budú pre väčšinu letísk porovnateľné. Výraznejšie zmeny môžu byť pozorované na letiskách so špecifickými geografickými alebo

meteorologickými podmienkami, prípadne pri výraznej prevahe niektorých kategórii lietadiel.

- **Priemerná decelerácia po pristátí** – táto hodnota je zadaná ako defaultná a vzťahuje sa na rozmanité zloženie typov lietadiel. Pokiaľ na letisku operuje prevažne jedna kategória lietadiel, je vhodné túto hodnotu upraviť tak, aby lepšie reprezentovala typy lietadiel pristávajúcich na danom letisku. Táto hodnota sa používa vo výpočte času od dotyku po dosiahnutie rýchlosti pre rolovanie a tiež času od dotyku po miesto kríženia dráh a rýchlosti v tomto mieste. Nasledovne sú tieto hodnoty použité na výpočet času potrebného pre odlet medzi dvoma priletmi.
- **Priemerná akcelerácia pri odletoch** – hodnota akcelerácie môže byť tiež ponechaná ako defaultná, pokiaľ je zastúpenie typov lietadiel operujúcich na letisku dostatočne rozmanité. V prípade, že na letisku výrazne prevažuje jedna kategória typov lietadiel, je vhodné hodnotu upraviť. Priemerná akcelerácia na odletoch je použitá vo výpočte času, za ktorý sa rozbiehajúce lietadlo bude nachádzať za krížením dráh, čo sa ďalej využíva pri výpočte času potrebného pre odlet medzi dvoma priletmi.
- **Pomer medzi počtom priletov a odletov v jednej hodine** – Pomer je možné regulovať pomocou zvyšovania separácií nad rámec minimálnych tak, aby sa do tejto medzery zmestil požadovaný počet odletov. V tomto nastavení mixu priletov a odletov je hlavnou pointou definovať pomer podľa preferencií letiska. Zvyšovanie separácií pre dosiahnutie požadovaného pomeru priletov a odletov je možné uskutočniť zadaním dodatočnej separácie medzi priletmi v sekundách alebo námorných míľach alebo zadaním dodatočnej separácie medzi odletmi v sekundách.
- **Percentuálny podiel “touch and go” letov** – na veľkých medzinárodných letiskách bude táto hodnota väčšinou 0. Na menších letiskách a hlavne na letiskách, kde sídli letecká škola, môže byť toto percento “touch and go” letov vyššie. Pre tieto lety platia iné procesy ako pre štandardné vzlety a pristátia, čím môže byť kapacita dráhového systému čiastočne ovplyvnená.
- **Percentuálny podiel času kedy je letisko prevádzkované za VMC a IMC** – tento parameter má vplyv na výslednú kapacitu v súvislosti so separáciami používanými za VMC a IMC podmienok.

C. Prevádzkové postupy

- **Separácie odlet-prílet za VMC a IMC podmienok** – Separácie medzi odletom a príletom sú definované ako minimálna vzdialenosť medzi priletajúcim lietadlom a prahom dráhy tak, aby odlietajúce lietadlo ešte dostalo povolenie na vzlet. Hodnoty počas VMC a IMC sa môžu líšiť. Defaultné hodnoty prednastavené v modeli zodpovedajú štandardným ATC podmienkam, ktoré sú definované FAA.
- **Separácie prílet-prílet za VMC a IMC podmienok pre všetky kategórie lietadiel** – defaultné nastavenia reprezentuje dokument EM-788A Airport Capacity and Delay (už spomínaný vyššie). Pokiaľ neexistujú na letisku špeciálne požiadavky ohľadom týchto miním, defaultné nastavenie je platné pre väčšinu letísk. Separácie sú zadávané v námorných míľach a reprezentujú minimálnu vzdialenosť medzi pristávajúcimi lietadlami.
- **Separácie odlet-odlet za VMC a IMC podmienok pre všetky kategórie lietadiel** – tieto vstupy sú opäť prednastavené, no ich aktualizácia podľa procedúr používaných na skúmanom letisku umožní presnejšie výsledky. Tento údaj sa zadáva v sekundách.
- **Dodatočné rezervy pri separáciách** – bezpečnostná rezerva, ktorú si riadiaci môžu pripočítať k priemerným prílet-prílet a odlet-odlet separáciám, aby zaistili dodržiavanie minimálnych rozstupov za každých okolností. Táto rezerva je nepovinná a záleží na každom riadiacom, či ju bude používať a akú veľkú. Na zistenie tohoto parametru je preto potrebná konzultácia s riadiacimi letovej prevádzky na danom letisku. Môže byť aplikovaná v námorných míľach alebo v sekundách. Pomocou tohoto nastavenia sa tiež môže docieľiť viac odletov medzi sekvenciou príletov alebo požadovaný pomer medzi príletmi a odletmi.
- **Deviácie (odchýlky) pri separáciách** – sú hodnoty, ktoré je možné zistiť z databáz, ak letisko takéto parametre monitoruje, prípadne meraním na danom letisku. Tieto hodnoty odzrkadľujú variácie v sekundách od priemerných hodnôt separácií priletajúcich a odlietajúcich lietadiel. Tieto hodnoty sú tiež nastavené ako defaultné a môžu byť takto ponechané, pokiaľ nie sú známe presnejšie hodnoty – nemajú výrazný vplyv na výsledky.

- **Hodnota Z** – táto hodnota by nemala byť menená, pretože reprezentuje percento lietadiel, ktoré sa budú správať podľa nastavených vstupov separácií. Defaultne je zvolená na 95% a neodporúča sa meniť, pokiaľ letisko takýto parameter nemonitoruje.
- **Divergentné odletové trate** – možnosť nastaviť, či sú na letisku využívané divergentné SIDy. Tie umožňujú nižšie separácie na odlete, nakoľko lietadlá budú krátko po vzlete pokračovať každé inou traťou. Pri takýchto odletoch môžu byť separácie medzi odlietavajúcimi lietadlami znížené na 1 minútu. (13)
- **Existencia riadiacej veže na danom letisku** – možnosť zvoliť či sa na letisku nachádza riadiaca veža. Pokiaľ nie, výsledná kapacita je znížená o 10%.
- **Dodatočná separácia na príletoch z dôvodu potreby križovania dráhy** – hodnota sa môže zadať v prípade, že je letisko postavené takým spôsobom, že lietadlá na zemi musia z určitého dôvodu križovať vzletovú a pristávaciu dráhu s cieľom dostať sa do požadovaného bodu.

Všetky tieto parametre vstupujúce do modelu ovplyvňujú kapacitu dráhového systému. V nasledujúcej časti budú odvodené princípy akými model spracováva vyššie popísané vstupy.

2.3.3 Proces spracovania vstupov a princípy výpočtov⁶

Model pracuje s množstvom vstupov (popísaných v predchádzajúcej kapitole), čo umožňuje pomerne detailné nastavenie a preskúmanie rôznych možností. Proces výpočtov je rozdelený podľa konfigurácie dráhového systému a módov prevádzky. V tejto práci bude popísaný iba princíp výpočtov, ktorý sa viaže ku konfigurácii dráhového systému letiska Bratislava.

Všetky nižšie uvedené hodnoty kapacity sú počítané pre VMC, IMC a priemerné zadané podmienky odzrkadľujúce situáciu na danom letisku. Kapacita dráhového systému sa pri VMC a IMC síce líši, no princíp výpočtu je rovnaký, len sú v ňom použité iné hodnoty. Z tohoto dôvodu nie sú nižšie popísané výpočty rozdelené podľa VMC a IMC.

Tento popis procesu spracovania vstupov môže slúžiť tiež ako dobrý základ pre pochopenie súvislostí medzi kapacitou dráhového systému a parametrov, ktoré na ňu vplyvajú.

⁶ Popis princípu fungovania bol odvodený z konkrétnych funkcií a vzorcov použitých v modeli

Pred samotným popisom princípu výpočtov je vhodné porozumieť niekoľkým pojmom, ktoré sa vyskytujú v celom procese kalkulácie dráhovej kapacity a budú používané v ďalšej časti popisu jednotlivých výpočtov konkrétnych výstupov. Označíme si ich písmenami, pre potreby zapísania vzorcov. Parametre vyznačené *kurzívou* reprezentujú vstupy zadané užívateľmi.

- **Matica pravdepodobnosti párovania kategórií lietadiel [-]** – prvky tejto matice označujú s akou pravdepodobnosťou budú dané dve kategórie lietadiel pristávať alebo vzlietať za sebou. Vypočítaná je zo zadaných *pomerov kategórií lietadiel* operujúcich na skúmanom letisku. Fleet mix (teda kategórie operujúce na letisku) a ich percentuálne zastúpenie označíme ako FM_i , kde i je kategória lietadla a maticu pravdepodobnosti ako P a jej prvky ako P_{ij} , kde i a j sú kategórie lietadiel. Potom môžeme zapísať výpočet jednotlivých prvkov nasledovne: $P_{ij} = FM_i * FM_j$. Na obrázku 7 sú vyznačené prvky, ktoré keď sa medzi sebou vynásobia, dostaneme pravdepodobnosť, že dané dve kategórie lietadiel poletia pri priblížení/pristátí alebo odlete za sebou.

Percento zastúpenosti kategórií zadané užívateľom

Small - S	Small - T	Small +	Large-TP	Large-Jet	Large-757	Heavy
0%	10%	0%	30%	50%	5%	5%

Matica pravdepodobnosti párovania kategórií lietadiel

	Small - S	Small - T	Small +	Large-TP	Large-Jet	Large-757	Heavy
Small - S	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Small - T	0.0000	0.0100	0.0000	0.0300	0.0500	0.0050	0.0050
Small +	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Large-TP	0.0000	0.0300	0.0000	0.0900	0.1500	0.0150	0.0150
Large-Jet	0.0000	0.0500	0.0000	0.1500	0.2500	0.0250	0.0250
Large-757	0.0000	0.0050	0.0000	0.0150	0.0250	0.0025	0.0025
Heavy	0.0000	0.0050	0.0000	0.0150	0.0250	0.0025	0.0025

Percentá zastúpenosti jednotlivých kategórií sú vynásobené medzi sebou

Obrázok 7: Výpočet matice pravdepodobnosti párovania kategórií lietadiel

Matica požadovaných separácií na príletoch [s] – je matica požadovaných separácií pre každý pár kategórií lietadiel, kde záleží na poradí kategórií. Prvky matice sú vypočítané nasledovným spôsobom: najskôr sa upraví užívateľom zadané *požadované separácie medzi príletmi rôznych kategórií v námorných míľach* - $S_{REQ A-A ij} [NM]$ pomocou *priemernej rýchlosti na prílete podľa kategórie* - $V_{AVG i} [kt]$ na časovú jednotku, ďalej sa hodnoty upraví o *koeficient (hodnotu) Z* - $K_Z [-]$ a *deviaciu medzi separáciami na prílete* - $Dev_{A-A} [s]$. V ďalšom kroku sa posúdi pre každý pár kategórií, či je rýchlejšia kategória nasledovaná pomalšou alebo naopak. Pokiaľ je pomalšie lietadlo nasledované rýchlejším, pripočíta sa k už spočítanej hodnote separácia navyše z dôvodu dobiehania pomalšieho lietadla rýchlejším. Táto dodatočná

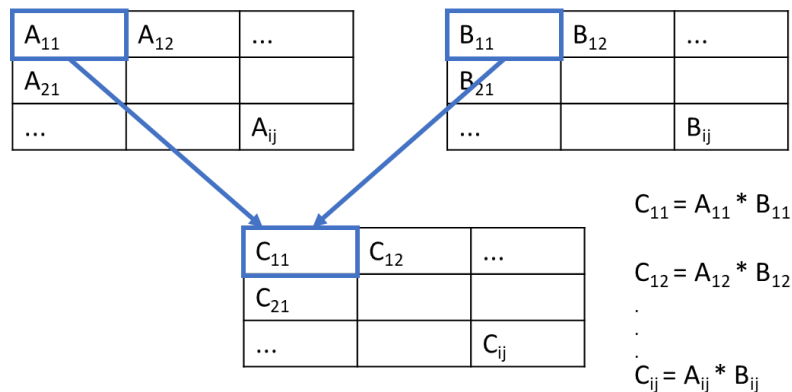
separácia závisí na vzdialenosti $FAFu$ od prahu dráhy - D_{FAF} [NM] a rozdielu priemerných rýchlostí oboch kategórií lietadiel. Pokiaľ nasleduje pomalšia kategória rýchlejšiu, nie je pripočítaná žiadna dodatočná separácia. Hodnota pochádzajúca z doterajšieho výpočtu sa ďalej porovná s hodnotou vypočítanou z *priemernej dĺžky obsadenosti dráhy priletmi* – $RWY_{OC A}$ [s] pre jednotlivé kategórie, zo Z hodnoty a *deviácií v separáciách na priletoch aj odletoch* - Dev_{D-D} [s]. Vyberie sa väčšia hodnota ku ktorej je v poslednom kroku pripočítaná *dodatočná rezerva* - B [s] zadaná na vstupe, ktorá nie je povinná, no na niektorých letiskách ju riadiaci využívajú (prípadne je zadaná z dôvodu dosiahnutia požadovaného pomeru medzi priletmi a odletmi). Maticu požadovaných separácií na prilete si označíme ako $S_{REQ A-A}$ a jej prvky ako $S_{REQ A-A ij}$.

Medzi prvkami matíc prebieha násobenie, ktoré nie je totožné s násobením matíc. Väčšina hodnôt v modeli je usporiadaná do matíc, pretože závisia na kategóriách lietadiel, pre ktoré sa počítajú a na ich poradí. Táto reprezentácia dát vo forme matíc je znázornená v tabuľke 2. Stĺpce označujú lietadlo prvé v poradí a riadok lietadlo nasledujúce.

VMC Požadovaná separácia pre priletý	Čas v sekundách						
	Small - S	Small - T	Small +	Large-TP	Large-Jet	Large-757	Heavy
Small -S	105.6	98.0	86.6	82.2	80.3	78.5	75.2
Small -T	133.6	98.0	86.6	82.2	80.3	78.5	75.2
Small +	175.6	140.0	86.6	82.2	80.3	78.5	75.2
Large TP	223.8	185.0	126.8	82.2	80.3	78.5	76.2
Large-Jet	230.9	192.1	133.9	89.4	80.3	78.5	77.2
Large-757	277.6	234.8	170.6	118.2	108.3	99.0	94.4
Heavy	325.6	279.2	179.6	155.1	144.3	134.2	94.4

Tabuľka 2: Dáta znázornené v matici prislúchajúce daným kategóriám

Násobenie medzi týmito prvkami matíc v celom modeli prebieha „po prvkoch“. Zoberie sa vždy prvok z jednej matice a prvok z druhej matice s rovnakou pozíciou (teda riadkom a stĺpcom, pričom matice majú rovnaké rozmery). Túto operáciu by sme tiež mohli charakterizovať ako „vzájomné vynásobenie prvkov na rovnakých pozíciách v matici“. (14) Takúto operáciu môžeme nájsť aj vo funkciách matlabu. Jej znázornenie je zobrazené na obrázku 8. Budeme ju prezentovať vždy pridaním indexu i alebo j prípadne oboch, aby bolo zrejmé, že ide o hodnotu prislúchajúcu daným kategóriám. Index i reprezentuje kategóriu prvého lietadla z dvojice a index j kategóriu lietadla, ktoré bezprostredne nasleduje kategóriu s indexom i .



Obrázok 8: Násobenie po prvkoch

Po porozumení popísaným operáciám môžeme zobrazíť výpočet požadovanej separácie na prílete pre dve rôzne kategórie lietadiel pomocou vzorcov využívaných modelom. Toto znázornenie je predstavené v prílohe 1.

- **Priemerná separácia na príletoch [s]** – táto separácia je vypočítaná zo súčtu prvkov matice, ktorá vznikne vynásobením jednotlivých prvkov matice pravdepodobnosti párovania kategórií lietadiel - $P [-]$ a prvkov matice požadovanej separácie na prílete medzi danými kategóriami - $S_{REQ\ A-A} [s]$. Nezabudnime, že násobenie prebieha v modeli vždy po prvkoch. Maticu priemerných separácií na prílete si označíme ako: $S_{AVG\ A-A}$ a jej prvky ako $S_{AVG\ A-A\ ij}$. Potom môžeme výpočet jednotlivých priemerných separácií medzi 2 kategóriami zapísať nasledovne:

$$S_{AVG\ A-A\ ij} = P_{ij} * S_{REQ\ A-A\ ij}$$

Priemerná separácia na prílete medzi kategóriou i a j je vypočítaná vynásobením pravdepodobnosti, že tieto dve kategórie budú pristávať za sebou v danom poradí a požadovanej separácie na prílete medzi týmito kategóriami. Výsledná priemerná separácia na prílete je jedna hodnota pre všetky kategórie a je vypočítaná súčtom všetkých prvkov matice $S_{AVG\ A-A}$. Označíme si ju ako $S_{AVG\ A-A\ 1}$, aby bolo zrejmé, že výsledkom je jedno číslo.

- **Matica požadovaných separácií na odletoch [s]** - je vypočítaná zo zadaných separácií medzi odletmi - $S_{D-D\ ij} [s]$ podľa kategórii, ku ktorým je pripočítaná dodatočná rezerva - $B [s]$ zvyšujúca separácie, či už z dôvodu navýšenia príletov medzi odletmi

alebo z bezpečnostných dôvodov. Maticu požadovaných separácií na odletoch označíme $S_{REQ\ D-D}$, a jej prvky $S_{REQ\ D-D\ ij}$.

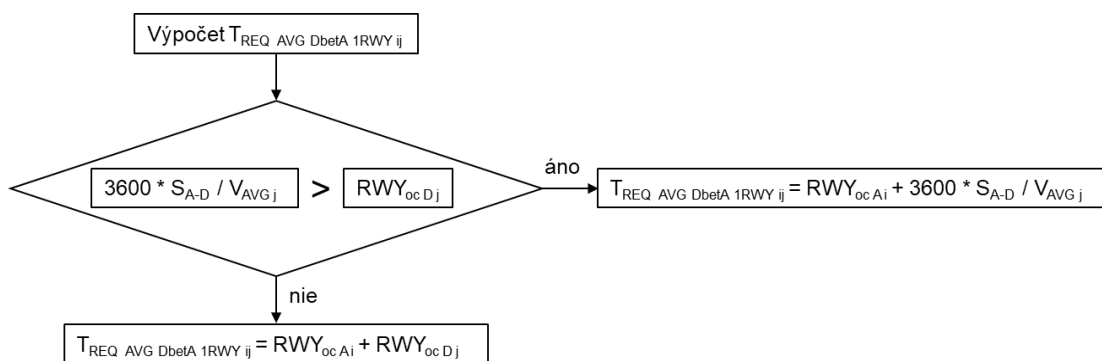
$$S_{REQ\ D-D\ ij} = S_{D-D\ ij} + B$$

- **Matica priemerných časov medzi odletmi [s]** - je vypočítaná z matice pravdepodobnosti párovania kategórií lietadiel $P[-]$ a z matice požadovaných separácií na odletoch $S_{REQ\ D-D}$. Maticu si označíme $T_{AVG\ D-D}$ a jej prvky ako $T_{AVG\ D-D\ ij}$.

$$T_{AVG\ D-D\ ij} = P_{ij} * S_{REQ\ D-D\ ij}$$

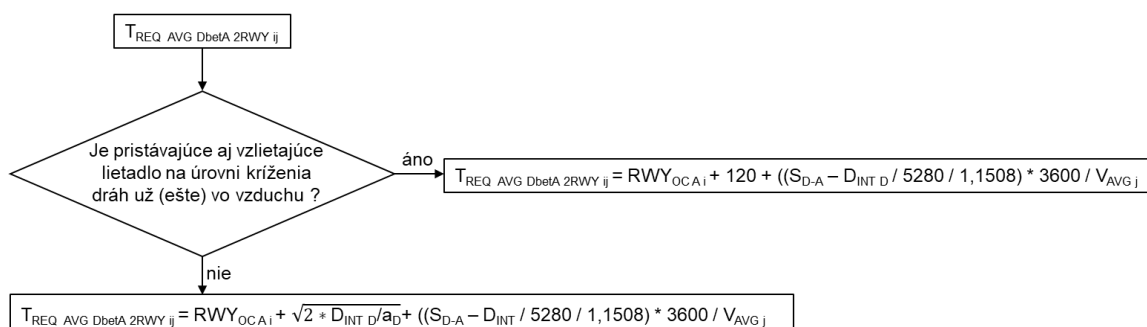
- **Priemerná separácia na odletoch [s]** – priemerná separácia na odletoch je vypočítaná sčítaním prvkov matice priemerných časov medzi odletmi - $T_{AVG\ D-D}$. Označíme si ju $S_{AVG\ D-D}$.

- **Matica priemerných časov požadovaných pre odlet medzi 2 priletmi pre každý pár kategórií [s] pre dráhový systém s zahŕňajúci práve 1 dráhu** – Túto maticu si označíme $T_{REQ\ AVG\ DbetA\ 1RWY}$ a jej prvky $T_{REQ\ AVG\ DbetA\ 1RWY\ ij}$. Prvky matice sú vypočítané z času obsadenosti dráhy priletmi – $RWY_{oc\ A}$ [s] a buď z hodnoty priemernej obsadenosti dráhy pri odlete pre každú kategóriu – $RWY_{oc\ D}$ [s] (tieto hodnoty sú predefinované v modeli), alebo z hodnoty, ktorá je výsledkom zadanej separácie medzi odletmi a priletmi - S_{A-D} [NM] upravenej o priemerné rýchlosti na priblížení pre jednotlivé kategórie V_{AVG} [kt] – podľa toho, ktorá hodnota je väčšia. Výpočet je znázornený na obrázku 9.



Obrázok 9: Znázornenie výpočtu priemerného času požadovaného pre odlet medzi 2 priletmi pre daný pár kategórií

- Matica priemerných časov požadovaných pre odlet medzi 2 priletmi pre každý pár kategórií [s] pre dráhový systém s zahŕňajúci práve 2 dráhy v konfigurácii odpovedajúcej dráhovému systému letiska Bratislava** – Túto maticu si označíme nasledovne $T_{REQ\ AVG\ DbetA\ 2RWY\ ij}$ a jej prvky $T_{REQ\ AVG\ DbetA\ 2RWY\ ij}$. Prvky tejto matice sa počítajú iným spôsobom ako prvky predošlej matice týkajúce sa prevádzky na jednej dráhe. Do aktuálneho výpočtu vstupujú nasledovné veličiny: *čas obsadenosti dráhy priletavajúcou kategóriou lietadla* – RWY_{OCA} [s], *separácia medzi odletom a priletom* – S_{D-A} [NM], *vzdialenosť od prahu dráhy pre pristátia po kríženie dráh* - $D_{INT\ D}$ [ft], *priemerné rýchlosti na prilete podľa kategórie lietadiel* - $V_{AVG\ j}$ [kt] a čas odlietavajúcej kategórie lietadla od začiatku rozbiehania po moment, kedy je už lietadlo za krížením dráh (táto hodnota závisí na skutočnosti, či sú lietadlá v úrovni kríženia dráh už vo vzduchu (ešte vo vzduchu), alebo sa rozbiehajú ešte po zemi (už brzdia na zemi) – pokiaľ sú už (ešte) vo vzduchu, je potrebné brať do úvahy turbulenciu v úplave, pokiaľ nie sú dodatočná separácia sa vypočíta zo vzdialenosti od prahu dráhy po kríženie dráh (platí pre dráhu, na ktorej sa vykonávajú odlety) a *priemerná akcelerácia odlietajúcich lietadiel* - a_D [ft/sec²]). Výpočet je znázornený na obrázku 10.



Obrázok 10: Výpočet času požadovaného na odlet medzi 2 priletmi

- Matica rezervy pre odlet medzi 2 priletmi [s]** – prvky tejto matice sú hodnoty v sekundách, z ktorých sa počíta koľko odletov je možné vykonať medzi danou sekvenciou dvoch priletov určitých kategórií. Táto matica je počítaná pre dráhový systém s jednou dráhou odlišne, ako pre dráhový systém obsahujúci 2 dráhy, preto si maticu rezervy pre dráhový systém s jednou dráhou označíme ako R_{1RWY} a jej prvky ako $R_{1RWY\ ij}$. Výpočet matice pre dvoj-dráhový systém musíme ďalej rozdeliť na 2 rozdielne z dôvodu možnosti 2 módov prevádzky na tomto dráhovom systéme, pre ktoré sa rezervy počítajú iným spôsobom. Maticu pre mód 1 (prilety na jednu dráhu

a odlety z druhej dráhy) označíme ako $R_{2RWY M1}$ a maticu pre mód 2 (prílety na jednu dráhu a odlety z oboch dráh) označíme ako $R_{2RWY M2}$.

Prvky tejto matice pre dráhový systém s jednou dráhou a dvomi dráhami pri prevádzke v móde 1 sú vypočítané z matice požadovaných separácií na príletoch $S_{REQ A-A}$ [s] a z matice priemerných časov požadovaných pre odlet medzi 2 príletmi pre každý pár kategórií $T_{REQ AVG DbetA}$ [s]. Pre dráhový systém pozostávajúci z dvoch dráh operovaných v móde 2 sa prvky matice počítajú z matice rezervy pre dvoj-dráhový systém pri prevádzke v móde 1, vzdialenosti od prahu dráhy na ktorej sa vykonávajú prílety aj odlety $D_{INT AD}$ [ft] po kríženie dráh, z priemerných rýchlostí na prílete V_{AVG} [kt] a času obsadenosti dráhy priletajúcou kategóriou lietadla RWY_{OCA} [s].

V ďalších vzorcoch budeme už rezervu označovať bez indexu, aby sme nemuseli ďalej vetviť všetky vzorce, ktoré s rezervou počítajú, pokiaľ majú ostatné parametre totožné. Pokiaľ nie je pri rezerve v ďalších vzorcoch index, môžeme si za ňu dosadiť hodnotu pre jednodráhový aj dvoj-dráhový systém, podľa toho, ku ktorému sa náš výpočet vzťahuje.

$$R_{1RWY ij} = S_{REQ A-A ij} - T_{REQ AVG DbetA 1RWY ij}$$

$$R_{2RWY M1 ij} = S_{REQ A-A ij} - T_{REQ AVG DbetA 2RWY ij}$$

$$R_{2RWY M2 ij} = R_{2RWY M1 ij} - (D_{INT AD} / V_{AVG j} * 1,1508 * 5280 / 3600) - RWY_{OCA j}$$

- **Matica počtu odletov medzi 2 príletmi [-]** – prvky matice sú počítané z rezervy R [s] pri odlete medzi 2 príletmi a z priemernej separácie na odletoch. Rezerva sa do výpočtu zahrnie iba ak je väčšia ako 0. Ak sa rezerva rovná nule, počet odletov medzi 2 príletmi kategórie i a j sa rovná 1.

$$N_{DbetA ij} = (R_{ij} / S_{AVG D-D ij}) + 1$$

- **Priemerný počet odletov medzi 2 príletmi [-]** – táto hodnota závisí na matici pravdepodobnosti párovania kategórií a na matici počtu odletov medzi 2 príletmi pre každý pár kategórií. Maticu priemerného počtu odletov ako značíme ako $N_{DbetA AVG}$ a jej prvky ako $N_{AVG DbetA ij}$.

$$N_{AVG DbetA ij} = P_{ij} * N_{DbetA ij}$$

Výsledným číslom – teda priemerný počet odletov medzi 2 priletmi je jedno číslo (už nie matica) a má hodnotu súčtu všetkých prvkov matice $N_{AVG D_{betA}}$. Túto hodnotu označíme $N_{AVG D_{betA} 1}$, aby bolo zrejmé, že výsledok je jedno číslo.

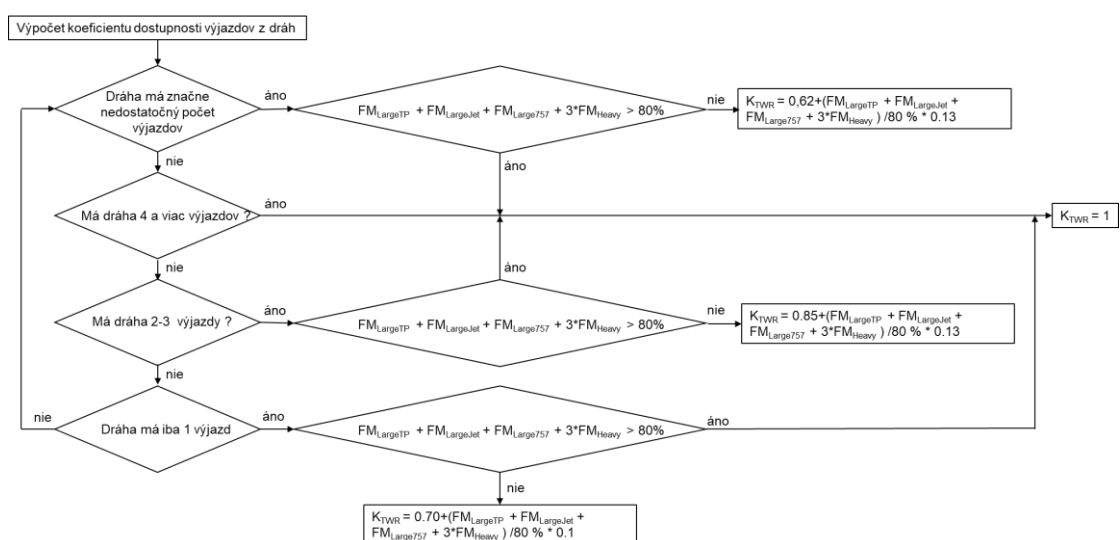
- **Počet odletov medzi 2 priletmi [-]** – táto hodnota označuje celkový počet odletov, ktorý je možné vykonať v jednej hodiny vždy medzi 2 priletmi a je vypočítaná z priemerného počtu odletov medzi priletmi $N_{AVG D_{betA}}$ s upravením hodnoty o *dodatočnú separáciu* ($B_2 [s]$) zapríčinenú najmä krížením dráhy v špičkových hodinách a zahrnutím priemernej separácie na priletoch $S_{AVG A-A}$. Počet odletov medzi priletmi si označíme ako $N_{D_{betA}}$.

$$N_{D_{betA} 1RWY} = N_{AVG D_{betA} 1} * (3600 - B_2) / S_{AVG A-A 1}$$

Pre dráhový systém s dvomi dráhami sa *dodatočná separácia* ($B_2 [s]$) do výpočtu nezahŕňa.

$$N_{D_{betA} 2RWY} = N_{AVG D_{betA} 1} * 3600 / S_{AVG A-A 1}$$

- **Koeficient dostupnosti výjazdov z dráh [-]** – tento koeficient budeme značiť K_{EXIT} a znižuje kapacitu dráhového systému nasledovne:



Obrázok 11: Znáozornenie výpočtu koeficientu dostupnosti výjazdov z dráh

- **Koeficient paralelnej pojazdovej dráhy [-]** – tento koeficient sa znižuje podľa výberu užívateľa z troch možností:
 - a. vzletová a pristávacia dráha má pojazdovú dráhu po celej svojej dĺžke,
 - b. vzletová a pristávacia dráha nemá pojazdovú dráhu po celej dĺžke a
 - c. vzletová a pristávacia dráha nemá paralelnú pojazdovú dráhu

Tieto tri možnosti určujú hodnotu koeficientu K_{TWY} rovné 1 pre možnosť a., 0.8 pre možnosť b. a 0.5 pre možnosť c.

- **Koeficient prítomnosti riadiacej veže na danom letisku** – Tento koeficient má hodnotu 1 pokiaľ sa riadiaca veža na letisku nachádza a hodnotu 0,9 pokiaľ sa riadiaca veža na letisku nenachádza. Označíme si ho ako K_{TWR} .
- **Koeficient „touch and go“ letov** – tento koeficient za započítava pokiaľ je percento „touch and go“ letov väčšie ako 5% z celkovej prevádzky. Počíta sa nasledovne: ak je percento „touch and go“ letov vyššie ako 5%, koeficient nadobúda hodnotu $(1 + \text{zadané percento „touch and go“ letov}) * 0.93$, ináč nadobúda hodnotu 1. Označíme si ho ako $K_{T\&G}$.

Teraz nasledujú vzorce pre výpočet konkrétnych kapacít. Pre detail výpočtov veličín obsiahnutých v nasledujúcich vzorcoch je potreba vrátiť sa k predchádzajúcej časti popisujúcej čiastkové vzorce. Výpočty sú takto rozdelené do dvoch častí z dôvodu častého opakovania rovnakých veličín v mnohých vzorcoch. Rozpisovať všetky veličiny každého vzorca vyjadrujúceho kapacitu dráhového systému by bolo rozsahovo príliš náročné, preto sú tieto vzorce vyjadrené jednoduchými vzťahmi, ktorých detaily sú popísané v predchádzajúcej časti.

A. Prevádzka na jednej dráhe

Pri prevádzke na jednej dráhe počíta model nasledovné hodnoty nižšie popísaným spôsobom. Jednotky vypočítanej kapacity dráhového systému sú vždy počty pohybov za hodinu.

- Kapacita priletov (C_A) je počítaná z priemernej separácie na prílete upravená o koeficient dostupnosti výjazdov z dráhy alebo koeficient paralelnej pojazdovej dráhy (vyberie sa ten, ktorý je menší), *dodatočných separácií (B_2 [s])*

zapríčinených krížením dráhy najmä v špičkových hodinách a koeficientu prítomnosti riadiacej veže na danom letisku. Kapacita priletov pri prevádzke na jednej dráhe vyjadruje počet priletov, ktoré by bolo možné uskutočniť, keby sa nevykonávali žiadne odlety.

$$C_A = K_{EXIT} (K_{TWY}) * K_{TWR} * (3600 - B_2) / S_{AVG A-A 1}$$

- Kapacita priletov vrátane „touch and go“ letov ($C_{A T\&G}$): táto hodnota je vypočítaná z kapacity priletov upravená o koeficient „touch and go“ letov. Táto kapacita opäť zahŕňa v sebe nulový počet odletov.

$$C_{A T\&G} = C_A * K_{T\&G}$$

- Kapacita odletov (C_D) je počítaná z priemernej separácie na odlete upravená o *dodatočné separácie ($B_2 [s]$)* zapríčinené krížením dráhy najmä v špičkových hodinách. Kapacita odletov je podobne ako kapacita priletov vyjadrená počtom odletov za hodinu s nulovým počtom priletov.

$$C_D = (3600 - B_2) / S_{AVG D-D}$$

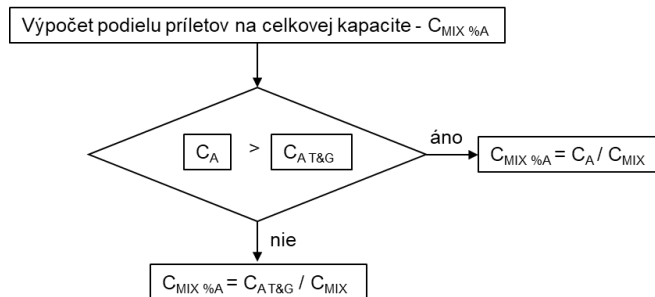
- Kapacita odletov pri maximálnom počte priletov vrátane „touch and go“ letov. Táto hodnota už zahŕňa v sebe odlety aj prílety a poukazuje na počet odletov, ktorý je možný vykonať pri maximálnom naplnení kapacity priletmi.

$$C_{D MAX A T\&G} = N_{DbetA 1RWY} + C_{A T\&G} - C_A$$

- Celková kapacita priletov a odletov sa vypočíta ako súčet kapacity priletov vrátane „touch and go“ letov a kapacity odletov pri maximálnom počte priletov vrátane „touch and go“ letov – pri pomere medzi priletmi a odletmi uvedenom v nasledujúcej hodnote. Tento pomer väčšinou nie je veľmi priaznivý, preto ho treba nastaviť pomocou dodatočnej separácie medzi priletmi, aby sa vypočítaná kapacita blížila približnému pomeru 50% priletov a 50% odletov.

$$C_{MIX} = C_{A T\&G} + C_{D MAX A T\&G}$$

- Percentuálny podiel priletov na celkovej kapacite: pre výpočet tohoto podielu sa najskôr porovná kapacita priletov s kapacitou priletov vrátane „touch and go“ letov. Tá, ktorá je väčšia sa vydelení celkovou kapacitou odletov a priletov. Tento proces je znázornený na obrázku 12. Percentuálny podiel priletov na celkovej kapacite označíme ako $C_{MIX \%A}$.



Obrázok 12: Znázornenie výpočtu podielu priletov na celkovej kapacite dráhového systému

B. Prevádzka na oboch dráhach súčasne

Pri prevádzke na oboch dráhach súčasne môže letisko operovať v dvoch módoch. Výpočty kapacít v oboch módoch sú modelom vykonávané nižšie popísanými spôsobmi.

1. Prílety na jednu dráhu a odlety z druhej dráhy⁷

Pri prevádzke na oboch dráhach súčasne, kde sú prílety vykonávané na jednu dráhu a odlety z druhej dráhy, počíta model nasledovné hodnoty nižšie popísaným spôsobom:

- Kapacita priletov je počítaná z priemernej separácie na prílete upravená o koeficient výjazdov z dráh a koeficient riadiacej veže.

$$C_A = K_{EXIT} * K_{TWR} * 3600 / S_{AVG A-A 1}$$

- Kapacita priletov vrátane „touch and go“ letov sa rovná kapacite priletov upravenej o koeficient „touch and go“ letov.

$$C_{A T\&G} = C_A * K_{T\&G}$$

⁷ Viz. Obrázok 3: Múd prevádzky, kde sú prílety vykonávané na jednu dráhu a odlety z druhej dráhy

- Kapacita odletov na dráhe určenej priletom z dôvodu „touch and go“ letov

$$C_{D\ T\&G} = C_{A\ T\&G} * \text{podiel „touch and go“ letov}$$

Podiel „touch and go“ letov sa nerovná $K_{T\&G}$.

- Kapacita odletov sa pri dráhovom systéme s dvomi križujúcimi sa dráhami rovná celkovému počtu odletov, ktoré je možné uskutočniť za 1 hodinu vždy medzi dvomi priletmi.

$$C_D = N_{D\beta A\ 2RWY}$$

- Celková kapacita odletov a priletov je počítaná ako súčet kapacity odletov a kapacity priletov vrátane „touch and go“ letov.

$$C_{MIX} = C_D + C_{A\ T\&G} + C_{D\ T\&G}$$

- Percentuálny podiel priletov na celkovej kapacite je počítaný rovnakým spôsobom ako pri prevádzke na jednej dráhe.

2. Prílety na jednu dráhu a odlety z oboch dráh⁸

Pri prevádzke na oboch dráhach súčasne, kde sú prílety vykonávané na jednu dráhu a odlety z oboch dráh, počíta model výsledné kapacity rovnako ako pri odletoch z jednej dráhy a príletoch na druhú dráhu, pričom poskytuje jednu hodnotu navyše a to kapacitu odletov na dráhe, kde sú vykonávané prílety.

- Kapacita odletov na dráhe, kde sú vykonávané prílety vrátane „touch and go“ letov

$$C_{D(A)} = C_A * K_{T\&G} + N_{D\beta A\ 2RWY} * 3600 / S_{AVG\ A-A\ 1}$$

⁸ Viz. Obrázok 4: Mód prevádzky, kde sú prílety vykonávané na jednu dráhu a odlety z oboch dráh

Z vyššie uvedených výpočtov je zrejmé, že model zahŕňa do posúdenia kapacity veľké množstvo informácií, čím dokáže pomerne presne vypočítať výsledné hodnoty.

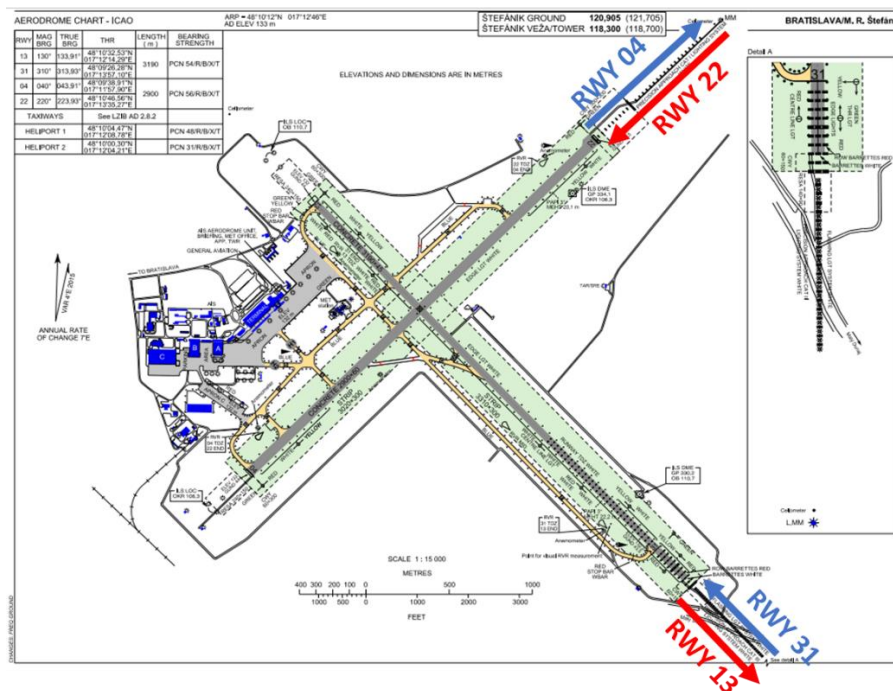
Po pochopení súvislostí ako na seba jednotlivé parametre vplyvajú môžeme pristúpiť ku kapitole nastavenie modelu, teda aké hodnoty boli zadané na vstupoch do modelu (vstupy boli vo výpočtoch vždy značené kurzívou).

2.4 Nastavenie modelu

V predchádzajúcich kapitolách boli charakterizované typy vstupov, ktoré majú vplyv na výslednú kapacitu, forma v akej dostaneme výstupy a princípy fungovania modelu. Táto časť bude pojednávať o konkrétnych hodnotách – vstupoch, ktoré boli do modelu zadané, o pôvode týchto dát a predpokladoch, ktoré boli použité, aby sme dostali čo najpresnejšie výsledky.

2.4.1 Prevádzkové postupy a dráhový systém letiska Bratislava

Dráhový systém letiska Bratislava pozostáva z dvoch na seba kolmých dráh RWY 13-31 a RWY 04-22. Dráha 13-31 je primárnou s dĺžkou 3190 metrov a 04-22 sekundárnou s dĺžkou 2900 metrov. Pre vzlety sa prednostne využívajú dráhy RWY 13 a RWY 04, na pristátia RWY 22 a RWY 31. Za bežných podmienok sú využívané obe dráhy primárne v móde RWY 22 pre pristátia a RWY 13 pre vzlety. Druhou možnosťou je potom RWY 31 pre pristátia a RWY 04 pre vzlety. (7) Tieto možnosti sú znázornené na obrázku 13, kde primárny mód prevádzky je vyznačený červenou a sekundárny modrou farbou.



Obrázok 13: Znáznornenie módov prevádzky na letisku Bratislava

System výjazdov z dráh obsahuje jednu rýchlo-odbočku využiteľnú pri pristátí na dráhe 31. Táto dráha má však prah posunutý na úroveň prvého kríženia s pojazdovou dráhou a tak sa cieľový bod dotyku nachádza približne 1000 metrov pred danou rýchlo-odbočkou, čo umožňuje využitie rýchlo-odbočky len menšími typmi lietadiel. Ostatné výjazdy z dráh sú k dráhe kolmé, alebo nevyužiteľné ako rýchlo-odbočky.

Separácie medzi prilietavajúcimi lietadlami sa vzťahujú na kategórie heavy, medium a light a sú dodržiavané nasledovne:

- Medzi 2 rovnakými kategóriami lietadiel – 4NM
- Ak je ťažšia kategória nasledovaná o jednu kategóriu ľahším lietadlom – 5NM
- Ak je ťažšia kategória nasledovaná o dve kategórie ľahším lietadlom – 6NM
- Ostatné separácie musia zaistiť dodržanie rozostupu minimálne 3NM v TMA Bratislava

Špecifickým prípadom sú podmienky za nízkej dohľadnosti kedy sa využívajú postupy LVP. Tieto podmienky sú aplikované pri RVR menšej ako 600 metrov alebo pri základni oblačnosti nižšej ako 200 ft (60m). (7) Za týchto podmienok je letisko značne limitované nakoľko nedisponuje certifikovaným pozemným prehľadovým radarom (riadiaci majú túto informáciu vynesenu na obrazovke radaru, avšak systém ešte nie je certifikovaný). Táto skutočnosť znemožňuje prevádzku viacerých lietadiel na pohybových plochách letiska – za podmienok nízkej viditeľnosti sa teda môže po plochách pohybovať vždy iba jedno lietadlo. Okrem tohoto limitujúceho faktoru sa zvyšujú aj separácie medzi priletmi na minimálne 10 NM medzi všetkými kategóriami lietadiel, čo plynie hlavne z potreby ochrany kritickej a citlivej oblasti ILS.

Používaným ATM systémom je EUROCAT 2000.

2.4.2 Testované riešenia a vstupné hodnoty

V tejto časti popíšeme aké riešenia boli otestované a aké vstupné hodnoty boli nastavené. Vytvorené boli prehľadné tabuľky, popisujúce hodnoty každého vstupu. Pred predstavením samotných hodnôt je vhodné zamyslieť sa nad limitami týchto údajov a prečo dané hodnoty môžu zavádzať do výsledkov chybu.

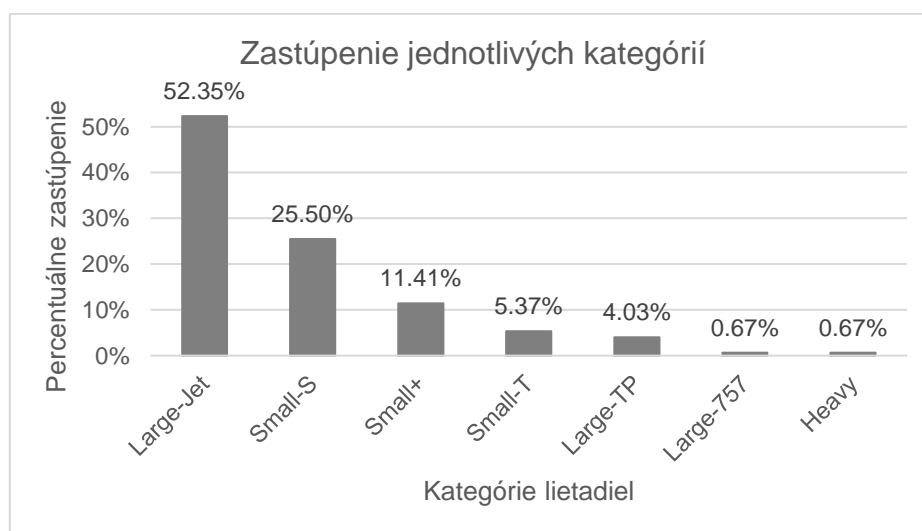
2.4.2.1 Limity použitých vstupov

Väčšina nepresností plynie najmä z nedostupnosti daných dát, respektíve nemonitorovania týchto dát letiskom Bratislava. Predstavíme tie najdôležitejšie a popíšeme prečo tieto hodnoty

zavádzajú do výsledkov nepresnosti a akým spôsobom sme sa snažili nepresnosti minimalizovať. Väčšina údajov je do modelu zadaná ako priemerná hodnota za určité obdobie, z ktorého bolo možné získať dáta. Už každý priemerovaný údaj určitým spôsobom zavádza do výpočtu chybu, nakoľko podmienky sa môžu v skutočnosti meniť aj každú hodinu. Výstupné spočítané kapacity budú preto odzrkadľovať priemerné údaje, ktorých presnosť sa dá zvýšiť najmä zahrnutím čo najväčšieho počtu údajov, pokiaľ sú k dispozícii. Je teda zbytočné popisovať každý vstup ako nepresný, nakoľko takmer všetky predstavujú priemer. Popísané budú teda iba hodnoty, ktoré môžu výstupy v našom prípade výraznejšie ovplyvniť vzhľadom na podstatu dát, ich zdroj a množstvo údajov.

- **Percentuálne zastúpenie kategórií lietadiel (fleet mix)**

Tieto hodnoty sú získané z dát najrušnejšieho dňa v roku 2018, poskytnuté letiskom Bratislava. Celkovo bolo v tento deň na letisku uskutočnených 73 príletov a 76 odletov. Lietadlá boli zaradené do kategórií podľa parametrov z tabuľky 1. Deň s najväčším počtom letov poskytuje najlepší prehľad zastúpenia jednotlivých kategórií čo sa týka dennej distribúcie, avšak vhodnejšie by bolo použiť priemernú hodnotu z celého roka. Takéto dáta však neboli k dispozícii. Na obrázku 14 je vynesené percentuálne zastúpenie každej kategórie.



Obrázok 14: Percentuálne zastúpenie jednotlivých kategórií lietadiel

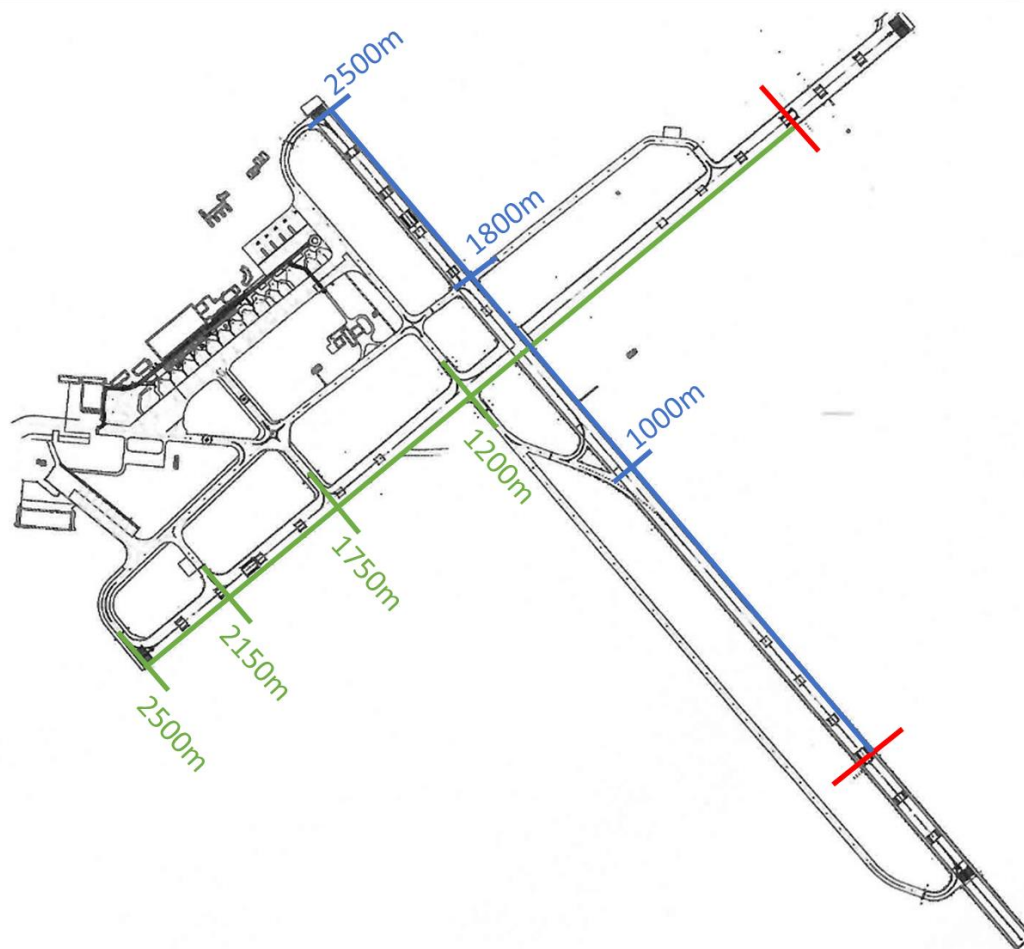
- **Časy obsadenosti dráhy príletmi (AROT) pre všetky kategórie lietadiel na RWY 31**

Najväčšie nepresnosti zavedieme do modelu prostredníctvom časov obsadenosti dráhy na prílete (AROT). Tieto časy majú na dráhovú kapacitu veľmi veľký vplyv, no nie sú monitorované letiskom. Urobené bolo preto vlastné meranie na Letisku Bratislava v rámci

jedného dňa. Jeden deň je veľmi malá vzorka letov v ktorej nie sú zahrnuté napríklad vplyvy počasia a dostatočná rôznorodosť typov lietadiel. Model má v sebe nastavené predefinované hodnoty, ktoré ako sme zistili neodrkadľujú situáciu na letisku Bratislava. Ako príklad uvediem AROT predefinovaný modelom pre kategóriu Small-S na 32 sekúnd, kde naše meranie ukázalo priemernú hodnotu 88 sekúnd a predefinovaná hodnota pre najzastúpenejšiu kategóriu Large-Jet je stanovená na 45 sekúnd, no v prípade merania bola priemerná hodnota 74 sekúnd. Tieto rozdiely plynú hlavne z nízkeho počtu výjazdov z dráh, neexistencie rýchlo-odbočky vhodnej pre kategóriu Large-Jet a skorého dotyku pri pristáti lietadiel kategórie Small-S, po ktorom museli lietadlá rolovať ešte dlhú dobu po vzletovej a pristávacej dráhe. Z týchto hodnôt je zrejmé, že aj meranie s nízkym počtom výsledkov bude lepšie reprezentovať situáciu na letisku Bratislava ako počítanie s predefinovanými hodnotami. Taktiež nebolo možné odmerať AROT pre všetky kategórie lietadiel, nakoľko v daný deň na letisku nepristávali, preto bol pre tieto kategórie urobený odhad na základe meraní ostatných kategórií, ktorý však zásadne výpočty neovplyvní nakoľko sú tieto kategórie zastúpené na letisku len vo veľmi malom počte. Odhadované hodnoty boli nastavené na základe priemeru hodnôt pre kategóriu o stupeň vyššiu a o stupeň nižšiu. Pre kategórie Large-757 a Heavy nebol tento prístup aplikovateľný, preto im bola priradená hodnota veľkosti AROT pre kategóriu Large-Jet, ktorá je najviac zastúpenou kategóriou a zároveň parametrami najbližšou kategóriou. Celkové percento letov, pre ktoré boli časy odhadované je necelých 11% ako je možné vidieť z obrázku 14. S touto skutočnou je potrebné rátať pri výsledkoch a brať do úvahy tieto nepresnosti.

- Časy obsadenosti dráhy príletmi (AROT) pre všetky kategórie lietadiel na RWY 22

Na dráhe 04-22 prebieha aktuálne rekonštrukcia svetelnej sústavy a z tohoto dôvodu nebolo možné časy obsadenosti dráhy určiť meraním. Bolo teda potrebné časy obsadenosti dráhy určiť iným spôsobom. Hlavnými parametrami, ktoré ovplyvňujú časy obsadenosti dráhy sú pozície výjazdov z dráh a to či je výjazd rýchlo-odbočkou alebo nie. Pozreli sme sa teda bližšie na výjazdy z dráhy 31 a 22 a porovnali ich pozície. Toto porovnanie je znázornené na obrázku 15.



Obrázok 15: Pozície výjazdov z RWY 22 a RWY 31

Červenou sú znázornené cieľové body dotyku, zelenou výjazdy z dráhy 22 a modrou výjazdy z dráhy 31. Pri pristáti na RWY 31 je rýchlo-odbočka vzdialená 1000 metrov od cieľového bodu dotyku využívaná len veľmi málo, väčšina lietadiel využíva výjazd vzdialený približne 1800 metrov od cieľového bodu dotyku a k dispozícii je ešte výjazd na konci dráhy vzdialený približne 2500 metrov od cieľového bodu dotyku. Pri pristáti na RWY 22 sú výjazdy rozmiestnené od cieľového bodu dotyku po približne 1200 metroch – tento výjazd je využiteľný tiež skôr menšími typmi lietadiel, 1750 metroch, 2150 metroch a 2500 metroch.⁹ Môžeme vidieť, že obe dráhy majú prvý výjazd v takej vzdialenosti, že ho môžu využívať skôr menšie kategórie lietadiel – na dráhe 22 je o 200 metrov ďalej ako na dráhe 31, preto ak budú lietadlá pristávať na cieľový bod dotyku bude čas obsadenosti dráhy kategóriami Small-S a Small-T pravdepodobne o niečo vyšší ako pri dráhe 31. Hodnoty vypočítame nasledovne: hodnoty pre dráhu 31 vydělíme dĺžkou dráhy medzi cieľovým bodom dotyku a výjazdom a následne vynásobíme touto istou vzdialenosťou pre dráhu 22. Čas obsadenosti dráhy kategóriou Small-S bol pri dráhe 31 - 88 sekúnd, na dráhe 22 bude podľa tohoto prevodu 106 sekúnd. Pre kategóriu Small-T bol AROT na dráhe 31 – 75

⁹ Hodnoty merané pomocou Autodesk DWG TrueView v mape poskytnutej letiskom Bratislava

sekúnd, na dráhe 22 bude zvýšený na 90 sekúnd. Ostatné kategórie využívajú zväčša až ďalšie výjazdy. Pre ostatné kategórie lietadiel budeme uvažovať rovnaké časy obsadenosti dráhy ako pre dráhu 31, kde takmer všetky lietadlá využívajú výjazd vo vzdialenosti 1800m - dráha 22 má výjazd vo vzdialenosti 1750m od cieľového bodu dotyku. Výjazdy umiestnené na koncoch dráh sú využívané prevažne kategóriami Large-757 a Heavy, ktoré majú na letisku zastúpenie necelé 2 %. Týmto odhadom opäť zavádzame do výslednej kapacity nepresnosti, ktoré ale nie sme v aktuálnej situácii schopní ďalej eliminovať.

- Rýchlosti na priblížení pre každú kategóriu lietadiel, priemerná akcelerácia lietadiel pri odletoch a decelerácia lietadiel pri príletoch

Tieto hodnoty závisia prevažne na typoch lietadiel, ktoré letisko využívajú. Môžu nadobúdať odlišné hodnoty pre veľmi špecifické letiská napríklad s extrémne krátkou dráhou, určitými meteorologickými podmienkami alebo pri prevádzke len určitého typu lietadiel. Letisko Bratislava nepovažujeme za špecifické, preto boli hodnoty ponechané na predefinovaných, čo však neznamená, že sa v skutočnosti nemôžu čiastočne líšiť. Podobne aj pre priemernú akceleráciu a deceleráciu boli použité predefinované hodnoty.

- Podiel času, kedy je letisko operované za VMC a IMC

Tento parameter má vplyv na výslednú kapacitu prostredníctvom používaných separácií za VMC a IMC podmienok. Riadiaci letovej prevádzky v Bratislave však separácie takto nerozlišujú. Tie sú zvýšené iba za LVP. Pokiaľ by sme poznali pomer času, kedy letisko operuje za LVP, mohli by sme do modelu zahrnúť tento údaj s patričnými separáciami. Tento údaj však nepoznáme a súčasne by výrazne znižoval hodinovú kapacitu, kvôli procedúram používaných za LVP opísaných vyššie. Kapacita je teda spočítaná pre 100% VMC podmienok, nakoľko separácie sú pre VMC aj IMC rovnaké. Osobitne bude spočítaná hodinová kapacita dráhového systému za podmienok nízkej viditeľnosti, aby bol zrejмый tento rozdiel v kapacitách.

- Model pracuje so 7 kategóriami lietadiel, riadiaci však používajú na dodržiavanie separácií 3 kategórie

Ako už bolo spomenuté, kategórie lietadiel v modeli sú rozdelené na 7 skupín, ale separácie riadiaci poskytujú na základe kategórií heavy, medium a light, preto sme skupinám v modeli priradili jednu z týchto kategórií, aby mohli byť separácie správne zadané. Kategórie heavy, medium a light závisia na MTOW: do kategórie light patria lietadlá do 7 000kg, do kategórie medium lietadlá od 7 000kg do 136 000kg a do kategórie

heavy lietadlá nad 136 000kg. Jediná kategória používaná modelom, ktorá mala presah medzi dvomi kategóriami je Small + , ako je možné vidieť v tabuľke 3. Do tejto kategórie spadalo v najrušnejší deň prevádzky 6 lietadiel, pričom dve mali MTOW pod 7000kg a štyri nad 7000 kg. Priradená bola teda kategória medium, nakoľko kategória Small + obsahovala viac lietadiel kategórie medium ako light a z bezpečnostného hľadiska je taktiež lepšie udržiavať väčšiu separáciu ako menšiu. Presah 77kg ukázala aj kategória Large -757, čo však môže byť spôsobené premenou jednotiek – tento presah nie je braný v úvahu, nakoľko je veľmi malý.

Kategória	Hmotnostný rozsah danej kategórie	Priradená kategória
Small-S	Do 5669 kg	Light
Small-T	Do 5669 kg	Light
Small +	5669 – 18 597 kg	Medium
Large-TP	18 597 – 115 666 kg	Medium
Large-Jet	18 597 – 115 666 kg	Medium
Large-757	115 666 – 136 077 kg	Medium
Heavy	Nad 136 077 kg	Heavy

Tabuľka 3: Prerozdelenie kategórií používaných modelom

Popísané boli hlavné faktory, ktoré môžu vnieť do výpočtov kapacít chyby. Tieto chyby sme sa pokúsili čiastočne eliminovať, no stále je potrebné s nimi počítať pri posudzovaní výsledkov.

2.4.2.2 Prehľad použitých vstupov

Nasleduje popis samotných vstupov tak, ako boli zadané do modelu. Otestované boli nasledovné riešenia:

- **Prevádzka na RWY 13-31**

Na letisku Bratislava sú na prevádzku využívané za bežných podmienok obe dráhy. Sú však situácie, kedy je možnosť použiť iba jednu dráhu na odlety aj prílety – ako napríklad v súčasnej dobe, kedy je svetelná sústava na dráhe 04-22 v rekonštrukcii. Z tohoto dôvodu som sa rozhodla zahrnúť do kapacitného posúdenia aj možnosť využívania iba jednej dráhy.

V Bratislave sa RWY 13 používa prevažne pre vzlety a RWY 31 prevažne pre pristátia. Takýto mód prevádzky však poskytuje výrazne nižšiu kapacitu ako prílety aj odlety

v rovnakom smere. Zamerať sa chceme na maximálnu kapacitu dráhového systému, preto budeme kapacitu počítať pre pristátia aj vzlety z RWY 31.

Nasleduje tabuľka vstupov zadaných do modelu pre výpočet kapacity RWY 31:

Názov vstupu	Zadaná hodnota	Zdroj dát
Koeficient dostupnosti výjazdov z dráh	Pokiaľ je zadaný čas obsadenosti dráhy pre jednotlivé kategórie podľa skutočnosti, môže sa tento koeficient nechať na maximálnej hodnote. Ponechaná bola teda maximálna hodnota nakoľko časy obsadenosti dráh boli získané meraním alebo odôvodneným odhadom. [-]	Vstup ponechaný na defaultnej hodnote.
Existencia paralelnej rolovacej dráhy po celej dĺžke RWY	Tento parameter je tiež možné ponechať na maximálnej hodnote pokiaľ zadané časy obsadenosti dráhy reflektujú skutočnosť. [-]	Vstup ponechaný na defaultnej hodnote.
Vzdialenosť od FAF po prah dráhy	6,5 NM	AIP SR, konzultácia s riadiacimi letovej prevádzky na stanovisku APP/TWR Štefánik
Fleet mix (typy lietadiel operujúcich na letisku)	Large-Jet: 52,35% Small-S: 25,50% Small +: 11,41% Small-T: 5,37% Large-TP: 4,03% Large-757: 0,67% Heavy: 0,67%	Výpis letov najrušnejšieho dňa roku 2018 poskytnutý letiskom Bratislava.
Čas obsadenosti dráhy pri prilete (AROT)	Large-Jet: 74 s Small-S: 88 s Small +: 61 s Small-T: nenamerané – odhad 75 s Large-TP: nenamerané – odhad 68 s Large-757: nenamerané – odhad 74 s Heavy: nenamerané – odhad 74 s	Vlastné meranie a odhady.
Rýchlosti na priblížení pre každú kategóriu lietadiel	Small-S: 90kt Small-T: 100kt Small +: 120kt Large-TP: 130kt Large-Jet: 135kt Large-757: 140kt Heavy: 150kt	Hodnoty prednastavené modelom.

Priemerná decelerácia na priblížení	5,3 ft/sec ²	Hodnota prednastavená modelom.																																	
Priemerná akcelerácia na odletoch	8 ft/sec ²	Hodnota prednastavená modelom.																																	
Percentuálny podiel "touch and go" letov	7%	Výpis letov najrušnejšieho dňa roku 2018 poskytnutý letiskom Bratislava.																																	
Percentuálny podiel času kedy je letisko prevádzkované za VMC a IMC	VMC: 100% IMC: 0%	Zadanie akejkoľvek hodnoty nebude mať na výsledky v našom prípade vplyv.																																	
Separácia odlet-prílet za VMC a IMC podmienok	3NM pre VMC aj IMC	Konzultácia s riadiacimi letovej prevádzky na stanovisku APP/TWR Štefánik																																	
Separácie prílet-prílet za VMC a IMC podmienok pre všetky kategórie lietadiel	Rovnaké separácie použité pre VMC aj IMC <table border="1" data-bbox="579 907 1043 1899"> <thead> <tr> <th>Druhé lietadlo v poradí</th> <th>Prvé lietadlo v poradí</th> <th>Zadaná separácia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Small-S - Heavy</td> <td>Small-S - Small-T</td> <td>4NM</td> </tr> <tr> <td>Small-S - Small +</td> <td>Small +</td> <td>4NM</td> </tr> <tr> <td>Large - Heavy</td> <td>Small +</td> <td>4NM</td> </tr> <tr> <td>Small-S - Small +</td> <td>Large-TP - Large-Jet</td> <td>5NM</td> </tr> <tr> <td>Large - Heavy</td> <td>Large-TP - Large-Jet</td> <td>4NM</td> </tr> <tr> <td>Small-S - Small +</td> <td>Large 757</td> <td>5NM</td> </tr> <tr> <td>Large - Heavy</td> <td>Large 757</td> <td>4NM</td> </tr> <tr> <td>Small-S - Small-T</td> <td>Heavy</td> <td>6NM</td> </tr> <tr> <td>Small + - Large 757</td> <td>Heavy</td> <td>5NM</td> </tr> <tr> <td>Heavy</td> <td>Heavy</td> <td>4NM</td> </tr> </tbody> </table>	Druhé lietadlo v poradí	Prvé lietadlo v poradí	Zadaná separácia	Small-S - Heavy	Small-S - Small-T	4NM	Small-S - Small +	Small +	4NM	Large - Heavy	Small +	4NM	Small-S - Small +	Large-TP - Large-Jet	5NM	Large - Heavy	Large-TP - Large-Jet	4NM	Small-S - Small +	Large 757	5NM	Large - Heavy	Large 757	4NM	Small-S - Small-T	Heavy	6NM	Small + - Large 757	Heavy	5NM	Heavy	Heavy	4NM	Konzultácia s riadiacimi letovej prevádzky na stanovisku APP/TWR Štefánik
Druhé lietadlo v poradí	Prvé lietadlo v poradí	Zadaná separácia																																	
Small-S - Heavy	Small-S - Small-T	4NM																																	
Small-S - Small +	Small +	4NM																																	
Large - Heavy	Small +	4NM																																	
Small-S - Small +	Large-TP - Large-Jet	5NM																																	
Large - Heavy	Large-TP - Large-Jet	4NM																																	
Small-S - Small +	Large 757	5NM																																	
Large - Heavy	Large 757	4NM																																	
Small-S - Small-T	Heavy	6NM																																	
Small + - Large 757	Heavy	5NM																																	
Heavy	Heavy	4NM																																	
Separácie odlet-odlet za VMC a IMC podmienok	Rovnaké separácie použité pre VMC aj IMC – vždy používané minimálne 2 minúty. Zadaná hodnota je teda 120 s.	Konzultácia s riadiacimi letovej prevádzky na stanovisku APP/TWR Štefánik																																	

pre všetky kategórie lietadiel		
Dodatočné rezervy pri separáciách	Túto rezervu riadiaci nevyužívajú a v modeli bude teda použitá len pre dosiahnutie maximálnej kapacity. Vhodnú hodnotu treba len otestovať a ponechať na takej, ktorá bude zaručovať maximálnu kapacitu alebo požadovaný pomer priletov medzi odletmi. V našom prípade dosiahneme maximálnu kapacitu a vhodný pomer priletov a odletov pri zadaní dodatočnej separácie medzi priletmi 20s.	Testovanie
Deviácie (odchýlky) pri separáciách	Prílet-prílet: 18s Odlet: 6s	Hodnota prednastavená modelom. Takéto hodnoty letisko Bratislava nemonitoruje.
Hodnota Z	1,645 (95% letov sa správa podľa nastavených separácií)	Hodnota prednastavená modelom. Takéto hodnoty letisko Bratislava nemonitoruje.
Divergentné odletové trate	Nie	Konzultácia s riadiacimi letovej prevádzky na stanovisku APP/TWR Štefánik
Existencia riadiacej veže	Áno	-
Dodatočná separácia na priletoch z dôvodu potreby križovania dráhy	Nie	Konzultácia s riadiacimi letovej prevádzky na stanovisku APP/TWR Štefánik

Tabuľka 4: Tabuľka zadaných vstupov na výpočet kapacity RWY 31

- **Prevádzka na RWY 04-22**

Tak ako pri dráhe 13-31, testované bude riešenie pristátí aj vzletov v jednom smere – a to v smere dráhy 22, nakoľko táto je primárnou dráhou pre pristátia. Hodnoty zadané do modelu pre prevádzku na dráhe 22 sa líšia od prevádzky na dráhe 31 iba v časoch obsadenosti dráhy a to nasledovne:

Large-Jet: nenamerané – odhad 74 s

Small-S: nenamerané – odhad 106 s

Small +: nenamerané – odhad 61 s

Small-T: nenamerané – odhad 90 s

Large-TP: nenamerané – odhad 68 s


Large-757: nenamerané – odhad 74 s

Heavy: nenamerané – odhad 74 s

- **Prevádzka na RWY 31 za podmienok nízkej viditeľnosti**

Za podmienok nízkej viditeľnosti je používaná iba dráha 31. Vstupy k tomuto riešeniu boli zadané rovnako ako v posúdení za normálnych podmienok, okrem separácií medzi príletmi, ktoré boli zvýšené na 10NM pre každý pár kategórií, separácie medzi odletom a príletom boli taktiež zvýšené na 10NM a separácie medzi odletmi pre každý pár kategórií boli zvýšené na 10 minút. Výška separácií 10NM je potvrdená od riadiacich letovej prevádzky na stanovisku APP/TWR Štefánik a 10 minút medzi odletmi je odhadnutá hodnota, ktorej veľkosť ovplyvňuje fakt, že za LVP sa môže po pohybových plochách letiska pohybovať iba 1 lietadlo, ktoré kým neopustí dráhu pri odlete, nemôže byť druhé lietadlo ani vytlačené zo stojánky. 10 minút je teda odhadnutá hodnota trvajúca od vydania povolenia na vytlačenie zo stojánky (za predpokladu, že lietadlo je pripravené byť vytlačené okamžite po obdržaní povolenia) po opustenie RWY po vzlete. Táto hodnota je veľmi približná a odvodená z pozorovania malého počtu lietadiel počas návštevy TWR Štefánik. Dodatočná separácia na príletoch bola nastavená na 1,5 NM.

- **Prevádzka na oboch dráhach súčasne, pričom vstupy v tabuľke reprezentujú primárnu konfiguráciu – vzlety z RWY 13 a pristátia na RWY 22.**

Názov vstupu	Zadaná hodnota	Zdroj dát
Konfigurácia dráhového systému a mód prevádzky		AIP SR, konzultácia
Pozícia kríženia dráh	Prah 22 – kríženie: 4888ft Prah 13 – kríženie: 2966ft	Mapa dráhového systému poskytnutá v elektronickej podobe Letiskom Bratislava
Koeficient dostupnosti výjazdov z dráh	Pokiaľ je zadaný čas obsadenosti dráhy pre jednotlivé kategórie podľa skutočnosti, môže sa tento koeficient nechať na maximálnej hodnote. Ponechaná bola teda maximálna hodnota nakoľko časy obsadenosti dráh boli získané meraním alebo odôvodneným odhadom. [-]	Hodnota prednastavená modelom.

Existencia paralelnej rolovacej dráhy po celej dĺžke RWY	Tento parameter je tiež možné ponechať na maximálnej hodnote pokiaľ zadané časy obsadenosti dráhy reflektujú skutočnosť. [-]	Hodnota prednastavená modelom.
Vzdialenosť od FAF po prah dráhy	6,5NM	AIP SR
Poloha prahov dráh v súvislosti s Runway Safety Area (RSA) a Runway Protection Zone (RPZ)	Prahy ani jednej z dráh nezasahujú do RSA alebo RPZ druhej dráhy – NIE.	AIP SR
Fleet mix (typy lietadiel operujúcich na letisku)	Large-Jet: 52,35% Small-S: 25,50% Small +: 11,41% Small-T: 5,37% Large-TP: 4,03% Large-757: 0,67% Heavy: 0,67%	Výpis letov najrušnejšieho dňa roku 2018 poskytnutý letiskom Bratislava.
Čas obsadenosti dráhy pri prilete (AROT)	Large-Jet: nenamerané – odhad 74 s Small-S: nenamerané – odhad 106 s Small +: nenamerané – odhad 61 s Small-T: nenamerané – odhad 90 s Large-TP: nenamerané – odhad 68 s Large-757: nenamerané – odhad 74 s Heavy: nenamerané – odhad 74 s	Vlastné meranie a odhady.
Rýchlosti na priblížení pre každú kategóriu lietadiel	Small-S: 90kt Small-T: 100kt Small +: 120kt Large-TP: 130kt Large-Jet: 135kt Large-757: 140kt Heavy: 150kt	Hodnoty prednastavené modelom.
Priemerná decelerácia na priblížení	5,3 ft/sec ²	Hodnota prednastavená modelom.
Priemerná akcelerácia na odletoch	8 ft/sec ²	Hodnota prednastavená modelom.
Percentuálny podiel "touch and go" letov	7%	Výpis letov najrušnejšieho dňa roku 2018 poskytnutý letiskom Bratislava.
Percentuálny podiel času kedy je letisko prevádzkované za VMC a IMC	VMC: 100% IMC: 0%	Zadanie akejkoľvek hodnoty nebude mať na výsledky v našom prípade vplyv.

Separácia odlet-prílet za VMC a IMC podmienok	3NM pre VMC aj IMC	Konzultácia s riadiacimi letovej prevádzky na stanovisku APP/TWR Štefánik																																	
Separácie prílet-prílet za VMC a IMC podmienok pre všetky kategórie lietadiel	<p>Rovnaké separácie použité pre VMC aj IMC</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Druhé lietadlo v poradí</th> <th>Prvé lietadlo v poradí</th> <th>Zadaná separácia</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Small-S - Heavy</td> <td>Small-S – Small-T</td> <td>4NM</td> </tr> <tr> <td>Small-S – Small +</td> <td>Small +</td> <td>4NM</td> </tr> <tr> <td>Large - Heavy</td> <td>Small +</td> <td>4NM</td> </tr> <tr> <td>Small-S – Small +</td> <td>Large-TP – Large-Jet</td> <td>5NM</td> </tr> <tr> <td>Large - Heavy</td> <td>Large-TP – Large-Jet</td> <td>4NM</td> </tr> <tr> <td>Small-S – Small +</td> <td>Large 757</td> <td>5NM</td> </tr> <tr> <td>Large - Heavy</td> <td>Large 757</td> <td>4NM</td> </tr> <tr> <td>Small-S – Small-T</td> <td>Heavy</td> <td>6NM</td> </tr> <tr> <td>Small + - Large 757</td> <td>Heavy</td> <td>5NM</td> </tr> <tr> <td>Heavy</td> <td>Heavy</td> <td>4NM</td> </tr> </tbody> </table>	Druhé lietadlo v poradí	Prvé lietadlo v poradí	Zadaná separácia	Small-S - Heavy	Small-S – Small-T	4NM	Small-S – Small +	Small +	4NM	Large - Heavy	Small +	4NM	Small-S – Small +	Large-TP – Large-Jet	5NM	Large - Heavy	Large-TP – Large-Jet	4NM	Small-S – Small +	Large 757	5NM	Large - Heavy	Large 757	4NM	Small-S – Small-T	Heavy	6NM	Small + - Large 757	Heavy	5NM	Heavy	Heavy	4NM	Konzultácia s riadiacimi letovej prevádzky na stanovisku APP/TWR Štefánik
Druhé lietadlo v poradí	Prvé lietadlo v poradí	Zadaná separácia																																	
Small-S - Heavy	Small-S – Small-T	4NM																																	
Small-S – Small +	Small +	4NM																																	
Large - Heavy	Small +	4NM																																	
Small-S – Small +	Large-TP – Large-Jet	5NM																																	
Large - Heavy	Large-TP – Large-Jet	4NM																																	
Small-S – Small +	Large 757	5NM																																	
Large - Heavy	Large 757	4NM																																	
Small-S – Small-T	Heavy	6NM																																	
Small + - Large 757	Heavy	5NM																																	
Heavy	Heavy	4NM																																	
Separácie odlet-odlet za VMC a IMC podmienok pre všetky kategórie lietadiel	Rovnaké separácie použité pre VMC aj IMC – vždy používané minimálne 2 minúty. Zadaná hodnota je teda 120 s.	Konzultácia s riadiacimi letovej prevádzky na stanovisku APP/TWR Štefánik																																	
Dodatočné rezervy pri separáciách	35 sekúnd medzi príletmi	Testovanie																																	
Deviácie (odchýlky) pri separáciách	Prílet-prílet: 18s Odlet: 6s	Hodnota prednastavená modelom. Takéto hodnoty letisko Bratislava nemonitoruje.																																	
Hodnota Z	1,645 (95% letov sa správa podľa nastavených separácií)	Hodnota prednastavená modelom. Takéto hodnoty letisko Bratislava nemonitoruje.																																	

Divergentné odletové trate	Nie	Konzultácia s riadiacimi letovej prevádzky na stanovisku APP/TWR Štefánik
Existencia riadiacej veže	Áno	-
Dodatočná separácia na príletoch z dôvodu potreby križovania dráhy	Nie	Konzultácia s riadiacimi letovej prevádzky na stanovisku APP/TWR Štefánik

Tabuľka 5: Tabuľka zadaných vstupov na výpočet kapacity pri prevádzke v primárnej konfigurácii

- **Prevádzka na oboch dráhach súčasne, pričom vstupy reprezentujú sekundárnu konfiguráciu – vzlety z RWY 04 a pristátia na RWY 31.**

Zmena hodnôt oproti primárnej konfigurácii nastáva iba v pozícii križenia dráh vzhľadom na prahy dráh a v časoch obsadenosti dráhy, nakoľko sa pristátia v tejto konfigurácii nevykonávajú na dráhu 22 ale na dráhu 31 – časy obsadenosti dráhy teda prevezmeme z prvého riešenia - teda posúdenia kapacity RWY 31. Zmenená bola tiež dodatočná rezerva pri separáciách medzi priletmi pre dosiahnutie maximálnej kapacity. Tieto zmeny s znázornené v tabuľke 6.

Názov vstupu	Zadaná hodnota	Zdroj dát
Pozícia križenia dráh	Prah 31 – križenie: 6624ft Prah 04 – križenie: 4715ft	Mapa dráhového systému poskytnutá v elektronickej podobe Letiskom Bratislava
Čas obsadenosti dráhy pri prílete (AROT)	Large-Jet: 74 s Small-S: 88 s Small +: 61 s Small-T: nenamerané – odhad 75 s Large-TP: nenamerané – odhad 68 s Large-757: nenamerané – odhad 74 s Heavy: nenamerané – odhad 74 s	Vlastné meranie a odhady.
Dodatočné rezervy pri separáciách	40 s	Testovanie

Tabuľka 6: Tabuľka zmenených vstupov pre sekundárnu konfiguráciu oproti primárnej

2.5 Výsledky

Pred samotným prezentovaním výsledkov je potrebné poznamenať, že vypočítaná kapacita sa považuje za maximálnu a v reálnych podmienkach je väčšinou nedosiahnuteľná. Je potrebné rozlišovať kapacitu vypočítanú na základe určitých parametrov a reálnu kapacitu, ktorú letisko dokáže dosahovať v špičkových hodinách. Rozdiel v týchto dvoch hodnotách je často v kompetencii riadiacich a pilotov, ktorí musia spolupracovať v dokonalej harmónii pre dosiahnutie maximálneho počtu pohybov.(15) Okrem toho samozrejme záleží aj na ich skúsenostiach a samotnom ľudskom faktore. Do výpočtu kapacity vstupujú často priemerné údaje, preto sa reálna hodnota nebude blížiť vypočítanej za výrazne iných podmienok, ako tých, ktoré boli použité na vstupoch do výpočtu.

Pri posudzovaní výsledkov je potrebné brať do úvahy limity vstupov, ktorými sme zaviedli do výsledných kapacít určité chyby a nepresnosti. Tieto boli popísané v kapitole 2.4.2.1 Limity použitých vstupov.

Kapacity boli posudzované pre konfigurácie, ktoré sú na letisku Bratislava používané. Prezentované budú grafom typu parreto frontier, ktorý znázorňuje kapacitu priletov C_A , kapacitu odletov C_D , celkovú kapacitu priletov aj odletov C_{MIX} a všetky kombinácie priletov aj odletov, ktoré sú uskutočniteľné pri zadaných podmienkach. Všetky uskutočniteľné kombinácie sa nachádzajú pod čiarou grafu vrátane čiary zároveň, ktorá reprezentuje maximálne hodnoty. Pre konfigurácie zahŕňajúce viac ako jednu dráhu je poskytnutý iba slovný popis výsledku, nakoľko pre takýto dráhový systém nebolo nájdené riešenie prezentácie výsledkov v grafe.

2.5.1 Kapacita RWY 31

Kapacita priletov dosahuje na dráhe 31 hodnotu 20 priletov za hodinu. Rovnaká kapacita je dosiahnutá vrátane „touch and go“ letov. Odletov je možných v jednej hodine vykonať 30. Celková kapacita priletov aj odletov sa rovná 35 pohybom, pričom je dosiahnutých 18 priletov a 17 odletov. Pri takomto zložení je množstvo priletov 51%. Všetky uskutočniteľné možnosti pomeru priletov a odletov je možné vidieť na obrázku 16.

$C_A = 20$ priletov za hodinu

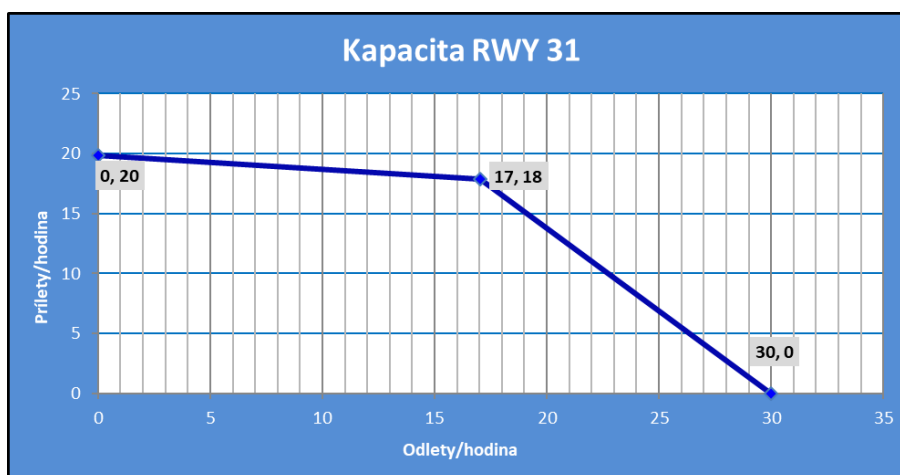
$C_{A\ T\&G} = 20$ priletov za hodinu

$C_D = 30$ odletov za hodinu

$C_{D\ MAX\ A\ T\&G} = 0$ odletov pri maximálnej kapacite priletov

$C_{MIX} = 18$ priletov a 17 odletov za hodinu

$C_{MIX\ \%A} = 51\%$



Obrázok 16: Kapacita RWY 13

2.5.2 Kapacita RWY 22

Kapacita priletov na dráhe 22 dosahuje 20 priletov za hodinu a je rovná kapacite priletov na dráhe 31. Rovnaká kapacita je dosiahnutá vrátane „touch and go“ letov. Odletov je v jednej hodine možné vykonať maximálne 30, čo sa opäť rovná kapacite odletov na dráhe 31. Celková kapacita priletov a odletov je však o niečo nižšia, konkrétne dosahuje hodnoty 33 pohybom za hodinu, pričom je dosiahnutých 18 priletov a 15 odletov. Podiel priletov je pri takomto zložení rovný 54%. Všetky uskutočniteľné možnosti pomeru priletov a odletov je možné vidieť na obrázku 17.

$C_A = 20$ priletov za hodinu

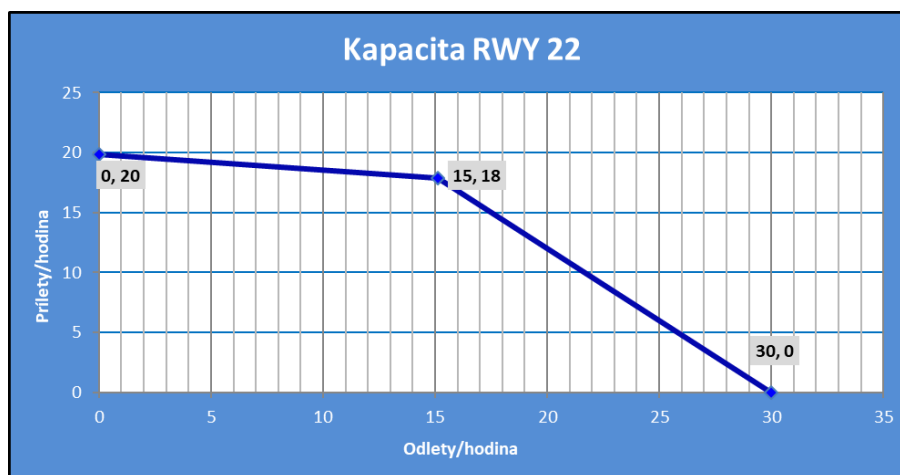
$C_{A\ T\&G} = 20$ priletov za hodinu

$C_D = 30$ odletov za hodinu

$C_{D\ MAX\ A\ T\&G} = 0$ odletov pri maximálnej kapacite priletov

$C_{MIX} = 18$ priletov a 15 odletov za hodinu

$C_{MIX\ \%A} = 54\%$



Obrázok 17: Kapacita RWY 22

2.5.3 Kapacita RWY 31 za podmienok nízkej viditeľnosti

Kapacita dráhového systému sa za podmienok nízkej viditeľnosti a procedúr LVP výrazne znižuje, kvôli skutočnostiam popísaným v kapitole 2.4.1. Pri týchto postupoch používaných za podmienok nízkej viditeľnosti dosahuje kapacita priletov 9 pohybov za hodinu, čomu sa rovná aj kapacita vrátane „touch and go“ letov. Kapacita odletov je rovná 6 pohybov za hodinu. Celková kapacita priletov a odletov dosahuje 13 pohybov pri zložení 9 priletov a 4 odletov. Pri takomto zložení je podiel priletov 69%. Všetky uskutočniteľné možnosti pomeru priletov a odletov je možné vidieť na obrázku 18.

$C_A = 9$ priletov za hodinu

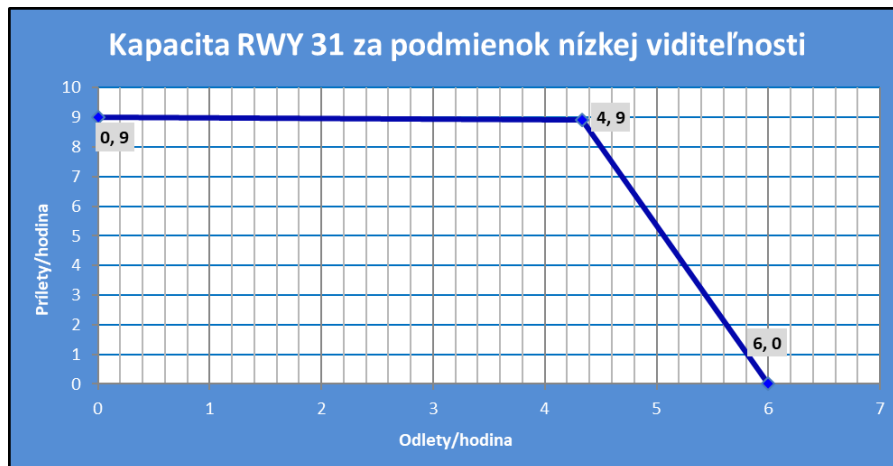
$C_{A\ T\&G} = 9$ priletov za hodinu

$C_D = 6$ odletov za hodinu

$C_{D\ MAX\ A\ T\&G} = 4$ odlety za hodinu pri maximálnej kapacite priletov

$C_{MIX} = 9$ priletov a 4 odlety za hodinu

$C_{MIX\ \%A} = 69\%$



Obrázok 18: Kapacita RWY 31 za podmienok nízkej viditeľnosti

2.5.4 Kapacita dráhového systému v primárnej konfigurácii

Primárnou konfiguráciou sú myslené prílety na dráhu 22 a odlety z dráhy 13. Pri tejto prevádzke sa kapacita príletov rovná 17 pohybom za hodinu. Kapacita odletov dosahuje 16 pohybom za hodinu pričom je možné vykonať 1 let typu „touch and go“. Celková kapacita je rovná 34 pohybom, kde podiel príletov dosahuje 50%.

$C_A = 17$ príletov za hodinu

$C_{A\ T\&G} = 17$ príletov za hodinu

$C_{D\ T\&G} = 1$ „touch and go“ odlet na dráhe pre prílety za hodinu

$C_D = 16$ odletov za hodinu

$C_{MIX} = 17$ príletov, 16 odletov a 1 „touch and go“ let za hodinu

$C_{MIX\ \%A} = 50\%$

2.5.5 Kapacita dráhového systému v sekundárnej konfigurácii

Sekundárnou konfiguráciou sú myslené prílety na dráhu 31 a odlety z dráhy 04. Pri tejto prevádzke dosahuje kapacita príletov 16 pohybom za hodinu a kapacita odletov 20 pohybom za hodinu, pričom je možné uskutočniť jeden let typu „touch and go“. Celková výsledná kapacita sa v tejto konfigurácii rovná 37 pohybom za hodinu, kde podiel príletov dosahuje 43%.

$C_A = 16$ príletov za hodinu

$C_{A\ T\&G} = 16$ príletov za hodinu

$C_{D\ T\&G} = 1$ „touch and go“ odlet na dráhe pre prílety za hodinu

$C_D = 20$ odletov za hodinu

$C_{MIX} = 16$ priletov, 20 odletov a 1 „touch and go“ let za hodinu

$C_{MIX \%A} = 43\%$

2.6 Zhodnotenie výsledkov

Súhrnné porovnanie výsledkov je znázornené v tabuľke 7. Najvyššiu kapacitu je letisko Bratislava schopné dosiahnuť pri prevádzke v sekundárnej konfigurácii – teda keď sú vzlety vykonávané z RWY 04 a pristátia na RWY 31. Je však vidieť, že pri prevádzke na jednej dráhe je kapacita takmer rovnaká ako pri využívaní dvoch dráh súčasne. Tento fakt umožňuje a bude umožňovať letisku sústrediť sa pri prevádzke aj iné parametre ako len na kapacitu. Týmto tvrdením je myslené, že pri aktuálnych podmienkach si môže letisko zvoliť preferovanú konfiguráciu až do výšky približne 30 pristátí a vzletov za hodinu, nielen podľa kapacity daného módu ale aj na základe hlukových postupov alebo iných preferencií. Tiež môžeme tvrdiť, že uzavretie niektorej z dráh nemá na kapacitu dráhového systému výrazný negatívny vplyv, pri poveternostných podmienkach, kedy je možné pristávať aj vzlietať z ktorejkoľvek dráhy.

Výsledná kapacita	Módy prevádzky				
	RWY 31	RWY 31 pri LVP	RWY 22	Primárna konfigurácia	Sekundárna konfigurácia
C_A	20	9	20	17	16
C_D	30	6	30	16	20
C_{MIX} (prílety+odlety+touch and go lety)	18 + 17	9 + 4	18 + 15	17 + 16 + 1	16+20+1
C_{MIX}	35	13	33	34	37

Tabuľka 7: Tabuľka porovnania výsledných kapacít

Počas najrušnejšieho dňa roku 2018 bol maximálny počet letov v jednej hodine 17, z toho 10 bolo priletov a 7 odletov. Aktuálne využitie kapacity sa v takýchto rušných hodinách pohybuje teda okolo 50% v závislosti od módu prevádzky. Ako bolo povedané už v úvode práce, letisko Bratislava nečelí aktuálne kapacitným problémom, no na základe posúdenia kapacít môže sledovať aktuálne percentuálne využitie kapacity a pri jeho rýchlom raste začať riešiť situáciu v dostatočnom predstihu. Zvyšovanie kapacity je veľmi zdĺhavým procesom z hľadiska legislatívy, potreby rekonštrukcie, zavádzania nových systémov, tréningu zamestnancov a samozrejme tiež finančne, preto je veľmi dôležité mať pripravené podklady pre ďalší rozvoj a zvyšovanie kapacity najmä v dnešných podmienkach, kedy je rast leteckej prevádzky veľmi strmý a kapacity mnoho letísk sa rýchlo naplňujú. Všeobecné možnosti zvyšovania kapacity dráhového systému sú popísané v nasledujúcej kapitole.

3 Všeobecné možnosti zvyšovania kapacity dráhového systému

Pred skúmaním možností zvyšovania kapacity dráhového systému, musí letisko najskôr poznať svoju aktuálnu kapacitu, rozumieť aktuálnemu stavu pri rôznych typoch/módoch prevádzky. (9) Okrem analýzy aktuálneho stavu, je tiež potrebné rozumieť faktorom, ktoré na samotnú kapacitu vplyvajú a akým spôsobom je možné tieto faktory ovplyvňovať zo strany letiska. Tu je prehľad najmarkantnejších faktorov ovplyvňujúcich kapacitu dráhového systému (11):

- a) Konfigurácia dráhového systému (počet dráh v používaní, pozícia a počet výjazdov z dráh). Počet dráh a konfigurácia dráhového systému sú nepochybne najdôležitejšími ukazovateľmi možnej maximálnej kapacity. Okrem počtu dráh je však rozhodujúcim faktorom najmä koľko z dráh môže byť využívaných súčasne. Problémom vo využívaní všetkých dostupných dráh môže byť ich konfigurácia, kedy pohyby súčasne na všetkých nie sú možné, prípadne hlukové postupy, ktoré nariaďujú striedanie dráh v určitých časových intervaloch alebo poveternostné podmienky. Výjazdy z dráh potom výrazne ovplyvňujú časy obsadenosti dráhy, ktoré majú na kapacitu dráhového systému výrazný vplyv.
- b) Kategórie lietadiel operujúcich na danom letisku a percentuálne rozdelenie lietadiel jednotlivých kategórií. Typy lietadiel sú rozdelené do kategórií na základe MTOW. Vyššia MTOW lietadla spravidla vyžaduje dlhšiu brzdnú dráhu – predlžuje teda čas obsadenosti dráhy pri prilete, čo znižuje kapacitu dráhy, pričom však záleží na usporiadaní výjazdov z dráh. Na letisku Bratislava boli namerané dlhšie časy obsadenosti dráhy pre nižšie kategórie, nakoľko využívali výjazd z dráhy, ktorý je pre danú kategóriu veľmi ďaleko od cieľového bodu dotyku a ich pomalá rýchlosť spôsobovala dlhšie obsadenie dráhy ako pri ťažších kategóriách. Okrem typov kategórií lietadiel je dôležité aj usporiadanie postupnosti príletov a odletov na základe jednotlivých kategórií z dôvodu turbulencie v úplave a súvisiacich separácií. Efektívne radenie lietadiel zabezpečí zvýšenie kapacity bez vysokých nákladov.
- c) Prevládajúce poveternostné podmienky (dohľadnosť, výška základne oblačnosti, smer a sila vetra, zrážky). Dohľadnosť a výška oblačnosti určujú či letisko môže aktuálne

operovať za VMC alebo podmienok nízkej dohľadnosti, ktoré vplyvajú na dĺžky separácií. Od smeru a sily vetra závisia zas dráhy v používaní, kde je dôležitým faktorom zložka vetra kolmá na dráhu a zložka vetra v smere vzletu a pristátia. Dážď a snehové zrážky znižujú brzdné účinky na dráhe, čo sa tiež môže prejavovať v zvýšení separácií a na časoch obsadenosti dráhy.

- d) Vybavenie letiska (navigačné a prehľadové systémy, ATM vybavenie). Systémové vybavenie používané riadiacimi letovej prevádzky ovplyvňuje dráhovú kapacitu svojou presnosťou a zobrazením situácie. Dôležitými podmienkami pre dosiahnutie minimálnych separácií sú okrem presných a vhodne zobrazovaných informácií aj samotní riadiaci, ktorí dokážu vhodne reagovať na vzniknuté situácie.
- e) Prevádzkové procedúry (príletové a odletové separácie, mix príletov a odletov na dráhach, hlukové postupy, iné špeciálne procedúry). Separácie sú jedným z hlavných aspektov pri určovaní dráhovej kapacity a sú špecifikované pre každú kombináciu typov lietadiel. Pomer príletov a odletov súvisí taktiež so separáciami medzi danými úkonmi. Hlukové a iné procedúry môžu znižovať kapacitu dráhového systému počas určitých období, kedy sú v platnosti.

Po takejto analýze sa môže letisko začať zaoberať samotným zvyšovaním dráhovej kapacity.

Ako je zjavné, z vyššie uvedených faktorov nie je možné optimalizovať všetky. Tieto faktory by sa dali rozdeliť do 3 kategórií z hľadiska možnosti optimalizovania letiskom:

- a) Faktory, na ktoré letisko nemá vplyv a musí všetky svoje rozhodnutia podriadiť daným podmienkam. Patrí sem napríklad meteorologická/poveternostná situácia v okolí letiska a čiastočne zástavba obytnými časťami v blízkosti letiska, z ktorých môžu vyplývať určité hlukové podmienky. Ďalším z takýchto faktorov je aj zastúpenie kategórií lietadiel, ktoré veľmi výrazne ovplyvňuje čas obsadenosti dráhy pri pristátí a separácie medzi jednotlivými lietadlami, tým pádom aj kapacitu dráhového systému.
- b) Faktory, ktoré sa letiskom ovplyvniť dajú, ale tieto zmeny sú či už z finančných, legislatívnych alebo iných dôvodov veľmi náročne uskutočniteľné. Najlepším príkladom je výstavba novej dráhy, ktorá síce zaručene výrazne zvýši kapacitu dráhového

systemu, no je to posledná možnosť ku ktorej letiská pristupujú po vyčerpaní všetkých ostatných riešení. Vo väčšine prípadov je veľmi ťažko uskutočniteľná, v niektorých prípadoch až nemožná – ako potvrdzujú aj autori dokumentu Airport Systems: „Adding a new runway is a task that today ranges from "very difficult" to "impossible" at most of the world's busiest and most congested airports.“ (16)

- c) Treťou skupinou sú faktory, ktoré môže letisko viac či menej ovplyvňovať, aby dosiahlo požadovanú dráhovú kapacitu bez enormných investícií, ktoré sú vyžadované pri stavbe novej dráhy. Neznamená to, že tieto faktory je jednoduché a finančne nenáročné meniť a ovplyvňovať, no je to skupina, ku ktorej sa letisko prikláňa ako k prvej možnosti pri plánovaní zvýšenia kapacity dráhového systému.

Práca sa zaoberá práve touto treťou skupinou faktorov, ktoré je možné letiskom ovplyvňovať za účelom zvyšovania kapacity dráhového systému. V nasledujúcej časti budú popísané konkrétne riešenia umožňujúce zvýšenie dráhovej kapacity.

3.1 Riešenia umožňujúce zvýšenie dráhovej kapacity

Riešenia umožňujúce zvýšenie dráhovej kapacity sú viazané na faktory, ktoré dráhovú kapacitu ovplyvňujú – tieto faktory boli popísané v predchádzajúcej časti.

Pri zvyšovaní kapacity je pre letiská dôležitý pomer medzi nákladmi na nové riešenia a kapacitou, ktorú prinesú. Preto je logickým postupom pracovať v prvom rade s prostriedkami, ktorými už letisko disponuje. Príkladom môže byť jeden z projektov NATS, kde sa podarilo zvýšiť kapacitu dráhového systému správnym využitím jednej dráhy namiesto neefektívneho využívania dvoch križujúcich sa dráh súčasne.(17) Ak po optimalizácii letiskom využívaných procesov nie je kapacita dráhového systému stále dostačujúca (alebo nedosiahla hodnoty, ktorá je plánovaná do budúcnosti), pristúpi sa k zavádzaniu nových systémov/konceptov, ktoré sú schopné ďalej kapacitu zvyšovať. Nasleduje popis takýchto konceptov:

3.1.1 Manažér priletov (AMAN-arrival manager)

AMAN využíva dostupné informácie – letový plán, radarové informácie, meteorologické informácie, informácie o vzdušnom priestore, aktuálne letové informácie a charakteristiky daného typu lietadla, na predikciu trajektórie a predpokladaného času pristátia. Pokiaľ sa v blízkosti letiska nachádza viacero lietadiel s rovnakým/podobným časom pristátia, AMAN

vypočíta sekvenciu lietadiel pre pristátie tak, aby lietadla pristáli v čo najkratšom časovom intervale a generuje daným letom nové časy, aby bola táto sekvencia uskutočniteľná a dodržaná. Okrem časov tiež poskytne riadiacim informáciu o tom, koľko musia let zdržať alebo urýchliť, aby bola sekvencia správne dodržaná. Nájdienie správnej metódy ako dosiahnuť urýchlenie alebo zdržanie lietadla je v kompetencii riadiacich. V ďalších verziách systému by sa mali objaviť aj prvky uľahčujúce riadiacim hľadanie správnej varianty na dodržanie najefektívnejšej sekvencie, navrhovaním upravenia rýchlosti na vypočítanú hodnotu.(17) (18)

3.1.2 Manažér odletov (DMAN-departure manager)

Manažér odletov, podobne ako manažér priletov optimalizuje sekvenciu lietadiel tak, aby zefektívnil prevádzku pomocou dostupných informácií ako sú napríklad: kategória lietadla podľa turbulencie v úplave, výkonnosť lietadla (19), čas rolovania na dráhu a odletová trať daného letu. (20) Vďaka týmto informáciám dokáže optimalizovať tok lietadiel – určením TTOT (target take-off time – čas vzletu, pri ktorého dodržaní bude tok odletov ideálne optimalizovaný), ktorý umožní zvýšiť maximálny počet odletov za určitú časovú periódu.

3.1.3 Ground Based Augmentation System (GBAS)

Systém ILS pri prevádzke za nízkej viditeľnosti výrazne limituje kapacitu dráhového systému.(21) Tento jav plynie aj zo skutočnosti, že v okolí majákov systému ILS je potrebné vymedziť kritické a senzitivne oblasti, do ktorých je počas využívania signálu ILS pristávajúcim lietadlom, iným objektom vstup zakázaný, čo nepriaznivo vplýva na kapacitu dráhového systému počas prevádzky za zníženej viditeľnosti.(22) Systém GBAS, ktorý funguje na základe spresnenia údajov z globálneho navigačného satelitného systému-GNSS (23), nepotrebuje na poskytovanie spoľahlivých údajov žiadnym spôsobom zasahovať do prevádzky. Tento typ priblíženia a pristátia umožňuje, na rozdiel od ILS, taktiež meniť uhol zostupovej roviny, ale aj zamýšľaný bod dotyku tak, aby boli pristátia čo najefektívnejšie. Možnosť meniť zamýšľaný bod dotyku napomáha skráteniu doby obsadenosti dráhy a znižuje riziko súvisiace s turbulenciou v úplave vďaka čiastočne posunutej zostupovej dráhe. GBAS je však zatiaľ možné používať iba do CAT I miním, čo je aktuálne jednou z jeho najväčších nevýhod. Vývoj však nasvedčuje, že GBAS bude v budúcnosti certifikovaný až do CAT III miním. (24)

3.1.4 Microwave Landing System (MLS)

Systém MLS taktiež nepotrebuje k svojej prevádzke vymedzovanie kritických oblastí vďaka mikrovlnnému žiareniu, ktoré nie je rušené inými dopravnými prostriedkami v blízkosti majáku. Vďaka väčšiemu dosahu poskytuje lietadlám širšie možnosti naladenia sa na signál, čo pri vytváraní separácií poskytuje väčšiu flexibilitu. MLS môže byť teda tiež nástrojom zvyšujúcim dráhovú kapacitu. (22)

3.1.5 Časové separácie (Time-Based Separations)

Časové separácie sú konceptom vyvinutým pre prilietavajúce lietadlá nahrádzajúci klasické vzdialenostné rozostupy časovými, ktoré sa dynamicky upravujú podľa aktuálnej poveternostnej situácie. Výraznejšie navýšenie kapacity poskytujú najmä v silnom čelnom vetre, ktorý znižuje rýchlosť lietadla voči zemi a spôsobuje predĺženie vzdialenostných rozostupov na konečnom priblížení, čo pri prevádzke, ktorá sa blíži maximálnej kapacite, môže spôsobiť nie len meškania ale aj zrušenie letov. Separácie môžu byť skrátené aj vďaka rýchlejšiemu vymiznutiu turbulencií v úplave pri silnom čelnom vetre. (25) Časové separácie boli aplikované na letisku Heathrow v roku 2015 a pri bežných podmienkach umožnia zvýšenie počtu pohybov o 0.8 za hodinu, pričom pri silnom vetre je priemerné navýšenie kapacity až o 2.6 pohybov za hodinu. Okrem navýšenia kapacity ušetrili 115 000 minút vyčkávania, znížili meškania počas silných čelných vetrov o 62%, čo znamená pre Heathrow okolo 100 000 minút ročne. (26)

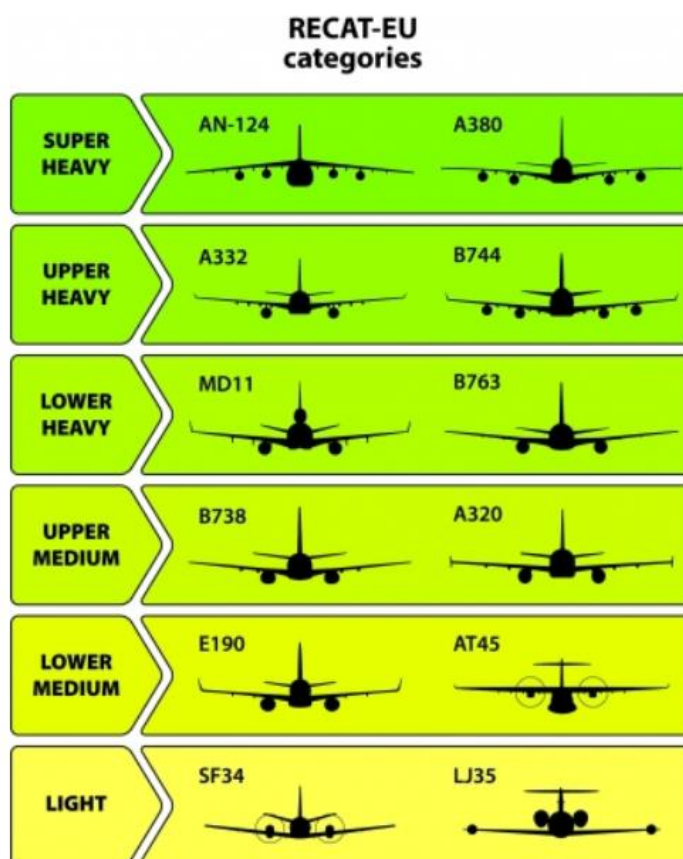
3.1.6 Výjazd z dráhy a rýchlo-odbočka na vhodnom mieste

Ako už bolo spomenuté, čas obsadenosti dráhy je jedným z najdôležitejších indikátorov kapacity dráhového systému, pretože okupácia dráhy je možná vždy len jedným lietadlom – čím kratšie je teda dráha obsadená jedným lietadlom, tým viac pohybov je možné na nej urobiť. Skrátenie priemerného času obsadenosti dráhy je možné vďaka správne umiestneným výjazdom z dráh tak, aby bolo umožnené všetkým kategóriám lietadiel opustiť dráhu čo najskôr po pristátí a rýchlo-odbočkami, ktoré zvierajú s dráhou malý uhol a umožňujú výjazd z dráhy pri vyššej rýchlosti. (22)

3.1.7 Rekategorizácia typov lietadiel podľa turbulencie v úplave (RECAT-EU)

Vďaka novým poznatkom ohľadom turbulencie v úplave sa Eurocontrol rozhodol pristúpiť k vytvoreniu nových kategórií, ktoré umožňujú prehodnotiť separačné minima v prospech

optimalizácie kapacity dráhového systému s dodržaním požadovaných bezpečnostných limitov. (22) Z pôvodných “Heavy”, “Medium” a “Light” kategórií bolo vytvorených 6 nových, ako je zobrazené na obrázku 19. Toto precíznejšie rozdelenie dovoľuje znížiť separácie medzi podobnými typmi lietadiel (z hľadiska turbulencie v úplave), ktoré sa pri pôvodnom rozdelení nachádzali jedno na hornej hranici nižšej kategórie a druhé na dolnej hranici vyššej kategórie a musel sa medzi nimi dodržiavať stále rovnaký rozostup ako medzi dvoma veľmi rozdielnymi typmi taktiež spadajúcich do dvoch “susediacich” kategórií. V závislosti od konfigurácie letiska môže táto rekategorizácia lietadiel prispieť k navýšeniu kapacity až do 5% v špičkových hodinách. (28)



Obrázok 19: RECAT-EU kategórie (27)

3.1.8 RECAT 2, RECAT 3

V náväznosti na úspešnosť predchádzajúcej rekategorizácie typov lietadiel podľa turbulencie v úplave vyvíja EUROCONTROL ďalšie sofistikovanejšie riešenia. RECAT 2 by mal implementovať “Pair Wise Separations” založené nie len na MTOW, ale aj na sile turbulencií v úplave, ktoré daný typ lietadla produkuje a na rýchlosti ich rozpadu.(29) Oproti RECAT EU dokáže RECAT 2 poskytnúť navýšenie kapacity o ďalších 5-10%. (30)

RECAT 3 umožňuje dynamické implementovanie separácií na základe meraní turbulencií v úplave, aktuálnych meteorologických podmienok a iných dát vplývajúcich na veľkosť separácií. Je to aktuálne najsofistikovanejšie dostupné riešenie týkajúce sa separácií a turbulencií v úplave. Prvotná implementácia pre pozemné systémy sa však očakáva až od roku 2022 a pre palubné systémy pravdepodobne až neskôr. (30)

3.1.9 Divergentné odletové trate

Ako už bolo spomenuté pri popise vstupov do modelu (nakoľko tento parameter je v modeli zahrnutý), pri prevádzkovaní odletov na divergentných tratiach rozchádzajúcich sa aspoň o 45 stupňov, môžu byť štandardné odletové separácie znížené až na 1 minútu. Pokiaľ divergentné odletové trate využívané nie sú, používa sa separácia o veľkosti 2 minút. (13)

3.1.10 Zhrnutie

V súčasnej dobe je vyvíjaných mnoho nových konceptov umožňujúcich zvýšenie dráhovej kapacity práve z dôvodu strmého rastu leteckej prevádzky a dosahovanie kapacitných limitov mnohými letiskami. Letiská majú tak možnosť výberu riešenia, ktoré bude vyhovovať danému typu prevádzky. V ďalšej kapitole popíšeme riešenia aplikovateľné na letisko Bratislava.

4 Návrh kombinácie prostriedkov na zvýšenie kapacity dráhového systému na skúmanom letisku a posúdenie zvýšenia kapacity po ich implementovaní

Prostriedky na zvýšenie kapacity dráhového systému je vhodné začať zavádzať ešte pred dosiahnutím aktuálnych kapacitných limitov. V mnohých prípadoch sa dá kapacita zvyšovať v prvom rade optimalizáciou procesov bez potreby rekonštrukcie aktuálneho dráhového systému alebo zaobstarávania drahých systémov. Toto však samozrejme platí pre letiská ako je napríklad Bratislava, ktorá aktuálne nečelí kapacitným problémom a nepotrebuje rýchlo a výrazne zvyšovať svoju aktuálnu kapacitu. Na letisku Bratislava bolo odpozorovaných niekoľko skutočností, ktoré aktuálnu kapacitu dráhového systému limitujú a pri potrebe kapacitu zvýšiť by mohli byť vhodnými kandidátmi na prvotnú optimalizáciu. Tieto faktory sú popísané v nasledujúcej časti 4.1. Posúdenie zvýšenia kapacity nie je vždy možné vyjadriť číselne, nakoľko model pomocou ktorého kapacitu posudzujeme nedokáže do svojich výpočtov zahrnúť prínos nových systémov a riešení. Niektoré môžu byť otestované nepriamo – zmenou hodnôt, ktoré daný systém ovplyvňuje. Nájdu sa však aj riešenia ktoré nemôžu byť takto otestované, preto ich prínos nebude posúdený kvantitatívne, ale iba kvalitatívne – teda slovným popisom ako a prečo daný koncept funguje.

4.1 Faktory limitujúce kapacitu dráhového systému na letisku Bratislava

- Letisko Bratislava nedisponuje certifikovaným pozemným prehľadovým radarom, ktorý by mohol byť využívaný v prípade podmienok za nízkej viditeľnosti na zaistenie rozstupov pri pohyboch na pohybových plochách letiska. Z tohoto dôvodu sa pri podmienkach nízkej viditeľnosti môže po pohybových plochách letiska pohybovať maximálne jedno lietadlo. Kapacita dráhového systému klesla pri takýchto podmienkach z 33 pohybov (18 priletov, 17 odletov) na iba 13 pohybov za hodinu (9 priletov, 4 odlety). Pozemný prehľadový radar by neumožnil zvýšiť kapacitu za týchto podmienok naspäť na 33 pohybov, nakoľko je stále potrebné udržiavať pri podmienkach nízkej dohľadnosti vyššie rozstupy medzi lietadlami. Kapacita by však mohla byť zvýšená znížením separácií medzi odletmi, pri ktorých sme uvažovali 10 minút bez pozemného prehľadového radaru. Keby sme separácie medzi odletmi v modeli znížili na 3 minúty (zámerne sme nepoužili 2 minúty ako za bežných podmienok, aby bola zaistená dostatočná rezerva), zvýšila by sa kapacita RWY 31 na :

$$C_A = 8 \text{ priletov za hodinu}$$

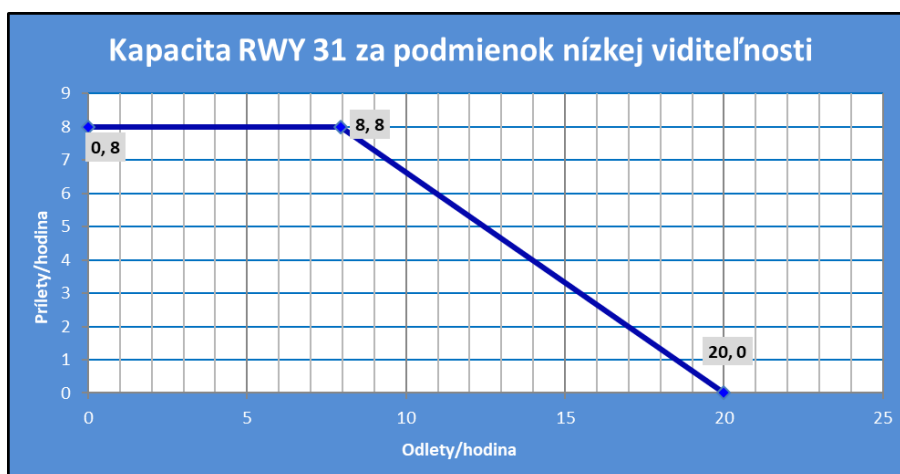
$C_{A\ T\&G} = 8$ priletov za hodinu

$C_D = 20$ odletov za hodinu

$C_{MIX} = 8$ priletov a 8 odletov za hodinu

$C_{MIX\ \%A} = 50\%$,

ako je možné vidieť na obrázku 20. Takýto výsledok bol dosiahnutý bez zníženia separácií medzi priletmi a s použitou dodatočnou separáciou na upravenie pomeru priletov a odletov o veľkosti 3 NM.



Obrázok 20: Kapacita RWY 31 za podmienok nízkej viditeľnosti po znížení separácie medzi odletmi

- Lietadlá nízkej kategórie nevyužívajúce rýchlo-odbočku na RWY 31
Tento fakt bol pozorovaný pri mnohých pristávajúcich lietadlách nižšej kategórie, ktoré by boli schopné využiť rýchlo-odbočku na RWY 31 a znížiť tak časy obsadenosti dráhy, avšak opúšťali dráhu až výjazdom, ktorý používali aj lietadlá kategórie Large-Jet. Dôvodom bude pravdepodobne kratšia vzdialenosť k stojánkam a hangárom leteckej školy. V aktuálnej situácii nie je tento fakt veľkým problémom, v budúcnosti však môže byť kapacita dráhového systému zvýšená používaním tohoto skoršieho výjazdu kategóriami lietadiel, ktorým vyhovuje. Sú to hlavne kategórie Small-S a Small-T, ktorých na letisku operuje približne 31%. Rýchlo-odbočka je vo vzdialenosti 1000m od cieľového bodu dotyku a odbočka používaná väčšinou lietadiel vo vzdialenosti 1800m. Keby sme teda spomínaným kategóriám znížili AROT nasledovným prepočítaním $AROT_i / 1800 * 1000$, dostaneme hodnoty pre kategóriu Small-S 49 sekúnd a pre kategóriu Small-T 42 sekúnd. Po zmene týchto hodnôt v modeli pre výpočet kapacity dráhy 31 dostaneme nasledovné hodnoty:

$C_A = 18$ priletov za hodinu

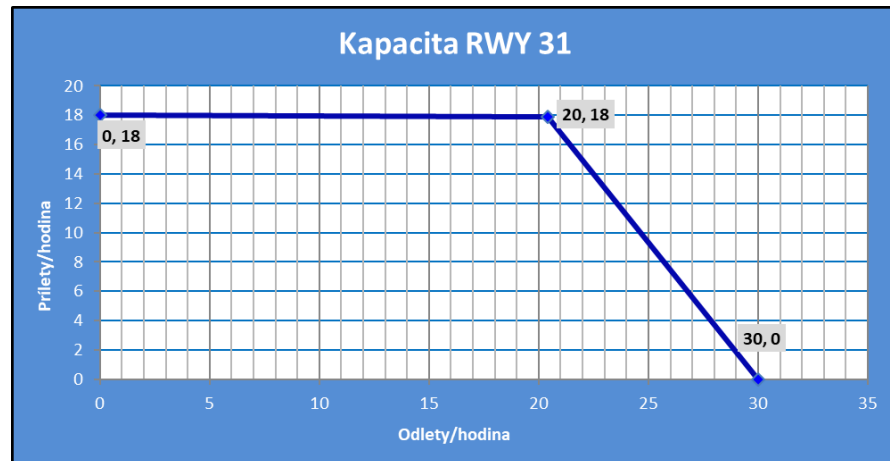
$C_{A\ T\&G} = 18$ priletov za hodinu

$C_D = 30$ odletov za hodinu

$C_{MIX} = 18$ priletov a 20 odletov za hodinu

$C_{MIX \%A} = 47\%$

Hodnoty sú zobrazené na obrázku 21.



Obrázok 21: Kapacita RWY 31 po znížení AROT pre kategóriu Small-S a Small-T

Kapacita môže byť týmto spôsobom navýšená o 3 pohyby za hodinu. Takéto zvýšenie však závisí aj na pilotoch, ktorí majú právo rozhodnutia, ktorým výjazdom dráhu opustia.

- Na letisku Bratislava sú prevádzkované 2 letecké školy, čo je hlavným dôvodom vysokého podielu lietadiel nízkej kategórie na tomto letisku. Meraním bolo zistené, že tieto kategórie majú vyšší čas obsadenosti dráhy, čo znižuje celkovú kapacitu. Aktuálne nie sú veľkým problémom, avšak pri náraste prevádzky a približovaní sa maximálnej kapacity, môže byť tento faktor vážnejším problémom. Keby sme podiel kategórií Small-S a Small-T znížili na 0 a adekvátne navýšili podiel kategórie Large-Jet, ktorá je najzastúpenejšou dostali by sme pri sekundárnej konfigurácii (ktorá poskytuje najväčšiu kapacitu zo skúmaných riešení) nasledovné výstupy:

$C_A = 20$ priletov za hodinu

$C_{A\ T\&G} = 20$ priletov za hodinu

$C_{D\ T\&G} = 1$ „touch and go“ odlet na dráhe pre priletov za hodinu

$C_D = 20$ odletov za hodinu

$C_{MIX} = 20$ priletov, 20 odletov a 1 „touch and go“ let za hodinu

$C_{MIX \%A} = 48\%$

Táto zmena by znamenala navýšenie kapacity o 4 pohyby – konkrétne 4 priletov pri rovnakom počte odletov.

Pri primárnej konfigurácii by sme v prípade takejto úpravy pozorovali nasledovné zmeny:

$C_A = 20$ priletov za hodinu

$C_{A\ T\&G} = 20$ priletov za hodinu

$C_{D\ T\&G} = 1$ „touch and go“ odlet na dráhe pre priletu za hodinu

$C_D = 20$ odletov za hodinu

$C_{MIX} = 20$ priletov, 20 odletov a 1 „touch and go“ let za hodinu

$C_{MIX\ \%A} = 48\%$

Takáto zmena by teda zabezpečila navýšenie kapacity až do 7 pohybov za hodinu – konkrétne 3 priletu a 4 odlety.

- Letisko Bratislava nedisponuje komunikáciami pre pohyb pozemných prostriedkov, ktoré musia z tohoto dôvodu k svojmu pohybu využívať rolovacie dráhy a často aj vzletovú a pristávaciu dráhu. Tieto pozemné pohyby sú uskutočňované údržbármi/ servisnými pracovníkmi pri opravovaní/kontrole svetelnej sústavy alebo meteorologických prístrojov. Práca na takýchto úkonoch sa v určitých situáciách môže presunúť na dobu, kedy nebude negatívne ovplyvňovať prevádzku, no v prípade stálej vysokej prevádzky môže byť okupácia dráhy pozemnými prostriedkami pomerne veľkým problémom. Mnohé letiská majú v okolí rolovacích dráh a vzletovej a pristávacej dráhy vybudované komunikácie práve za účelom pohybu spomínaných pracovníkov. V doterajších výpočtoch táto skutočnosť nebola zahrnutá z dôvodu nedostatku dát ohľadom frekvencie a dĺžky okupovania dráhy pozemnými prostriedkami.
- Výrazným nedostatkom je chýbajúca rýchlo-odbočka pre kategóriu lietadiel Large-Jet, ktorá je na letisku Bratislava najzastúpenejšou. Kolmé výjazdy z dráh zvyšujú oproti rýchlo-odbočkám čas obsadenosti dráhy, ktorý veľmi intenzívne vplýva na kapacitu dráhového systému. Vybudovať novú rýchlo-odbočku či už na dráhe 31 alebo 22, ktoré sú využívané pre pristátia, by bolo pravdepodobne v stávajúcej dráhovej konfigurácii veľmi náročné. Časti dráhy, kde by boli rýchlo-odbočky vhodné sa nachádzajú veľmi blízko stojániek, čo by neumožňovalo dostatočnú dĺžku rýchlo-odbočky pre potrebné spomalenie lietadla. Rýchlo-odbočka vedúca na opačnú stranu od stojániek by zas vyžadovala obchádzanie alebo križovanie dráhy, čo tiež nie je žiadúcim prvkom. Pokiaľ

by bola nová rýchlo-odbočka pre letisko Bratislava nevyhnutná, bolo by potrebné detailne zvážiť všetky tieto skutočnosti.

- Navýšenie kapacity dráhového systému by ešte mohlo byť uskutočnené typom prevádzky, kde by boli prílety vykonávané na jednu dráhu a odlety z oboch dráh. Využili by sa tak rezervy medzi príletmi na obsluženie väčšieho počtu odletov. Takáto prevádzka by pre primárnu konfiguráciu poskytovala nasledovné hodnoty kapacít:

$$C_A = 17 \text{ príletov za hodinu}$$

$$C_{A \text{ T\&G}} = 17 \text{ príletov za hodinu}$$

$$C_{D(A)} = 8 \text{ odletov za hodinu na dráhe, kde sú vykonávané prílety}$$

$$C_D = 16 \text{ odletov za hodinu}$$

$$C_{MIX} = 17 \text{ príletov a } 24 \text{ odletov}$$

$$C_{MIX \%A} = 41\%$$

Oproti konfigurácii, kedy sú prílety vykonávané na jednu dráhu a odlety z druhej dráhy, by takéto riešenie poskytlo navýšenie kapacity o 8 odletov, ktoré by boli vykonané na dráhe 22 určenej pre prílety.

Pre sekundárnu konfiguráciu by boli hodnoty nasledovné:

$$C_A = 16 \text{ príletov za hodinu}$$

$$C_{A \text{ T\&G}} = 16 \text{ príletov za hodinu}$$

$$C_{D(A)} = 9 \text{ odletov za hodinu na dráhe, kde sú vykonávané prílety}$$

$$C_D = 20 \text{ odletov za hodinu}$$

$$C_{MIX} = 16 \text{ príletov a } 29 \text{ odletov}$$

$$C_{MIX \%A} = 35\%$$

Pre sekundárnu konfiguráciu by počet odletov narástol o až 9 pohybov.

Popísané boli všetky pozorované faktory, ktoré aktuálne znižujú kapacitu na letisku Bratislava. Tiež sme sa pokúsili navrhnúť nastavenie modelu tak, aby reflektoval zvýšenie kapacity po prijatí určitých opatrení, ktoré sme identifikovali ako možnosti na zvýšenie aktuálnej dráhovej kapacity. Nasledovať bude kapitola popisujúca zvyšovanie kapacity prostriedkami, ktoré sú aktuálne globálne zavádzané ako reakcia na kapacitné problémy dráhových systémov.

4.2 Prostriedky vhodné na implementáciu

Z prostriedkov popísaných v kapitole 3.1:

- Manažér priletov (AMAN-arrival manager)
- Manažér odletov (DMAN-departure manager)
- Ground Based Augmentation System (GBAS)
- Microwave Landing System (MLS)
- Časové separácie (Time-Based Separations)
- Výjazd z dráhy a rýchlo-odbočka na vhodnom mieste
- Rekategorizácia typov lietadiel podľa turbulencie v úplave (RECAT-EU)
- RECAT 2, RECAT 3
- Divergentné odletové trate

neboli žiadne identifikované ako nevhodné pre implementáciu na letisku Bratislava. Z dôvodu nedostatočných informácií však nie je možné väčšinu otestovať v používanom modeli ani nepriamou cestou. Princípy ich fungovania sú popísané v kapitole 3.1. Navýšenie kapacity je možné posúdiť iba pre zavedenie divergentných SIDov a pri riešeníach, ktoré priamo popisovali približné percentuálne zvýšenie kapacity – teda koncepty rekategorizácie.

4.2.1 Rekategorizácia typov lietadiel

Ako už bolo popísané v kapitole 3.1, rekategorizácia typov lietadiel dokáže navýšiť kapacitu dráhového systému o približne 5%. V prípade letiska Bratislava by sa jednalo o približne 1 až 2 pohyby za hodinu. Ďalšie navýšenie je možné uskutočniť vďaka novším konceptom rekategorizácie – RECAT 2, ktorý je založený nie len na MTOW, ale aj na sile turbulencií v úplave, ktoré daný typ lietadla produkuje a na rýchlosti ich rozpadu. Tento koncept predpokladá navýšenie kapacity o ďalších 5-10%, čo by v prípade letiska Bratislava znamenalo navýšenie kapacity do 3-4 pohybov za hodinu oproti klasickému konceptu RECAT.

4.2.2 Divergentné odletové trate

Využívanie divergentných odletových tratí je možné posúdiť pomocou modelu vďaka zníženiu separácií medzi odletmi z 2 minút na 1 minútu. Toto posúdenie bolo otestované pre primárnu aj sekundárnu konfiguráciu.

Výsledky pre primárnu konfiguráciu:

$C_A = 17$ priletov za hodinu

$C_{A\ T\&G} = 17$ priletov za hodinu

$C_{D\ T\&G} = 1$ „touch and go“ odlet na dráhe pre priletov za hodinu

$C_D = 21$ odletov za hodinu

$C_{MIX} = 17$ priletov, 21 odletov a 1 „touch and go“ let za hodinu

$C_{MIX\ \%A} = 43\%$

Využívanie divergentných odletových tratí by v primárnej konfigurácii poskytli navýšenie kapacity o 5 letov za hodinu - konkrétne 5 odletov.

Výsledky pre sekundárnu konfiguráciu:

$C_A = 16$ priletov za hodinu

$C_{A\ T\&G} = 16$ priletov za hodinu

$C_{D\ T\&G} = 1$ „touch and go“ odlet na dráhe pre priletov za hodinu

$C_D = 24$ odletov za hodinu

$C_{MIX} = 16$ priletov, 24 odletov a 1 „touch and go“ let za hodinu

$C_{MIX\ \%A} = 39\%$

Pri prevádzke sekundárnej konfigurácie by divergentné odletové trate umožnili zvýšiť kapacitu o 4 pohyby za hodinu – konkrétne 4 odlety.

4.3 Zhrnutie

Všetky odhady zvýšenia kapacity po implementovaní navrhovaných riešení je potrebné vnímať ako približné a to z dôvodu mnohých nepresností pri zadávaní vstupov. Aj napriek tomu, že boli vstupy dôkladne premyslené, to že nie sú dlhodobou meranou vnáša do týchto hodnôt určité chyby. Taktiež predpoklady, ktoré boli použité pri počítaní navýšenia kapacít nemusia byť zhodné so skutočnosťou a podmienkami aké by reálne nastali, keby sa letisko Bratislava blížilo svojim kapacitným limitom. Sú však dobrým ukazovateľom, ako sa kapacita dráhového systému za rôznych podmienok mení a je z nich možné odvodiť určité trendy vývoja kapacity, ktoré sú závislé na vstupných podmienkach.

5 Diskusia

Aktuálna situácia vysokého nárastu leteckej prevádzky spôsobuje na mnohých letiskách dosahovanie limitov kapacít dráhového systému. Pre letiská, ktoré na takúto situáciu neboli pripravené, môže prevádzka na hranici kapacitných limitov negatívne ovplyvniť meškania letov ale aj celkovú bezpečnosť. Podobnej situácii je možné predísť vypracovaním kapacitného posúdenia a stálym monitorovaním aktuálnej situácie voči kapacitným limitom, čo zaistí použitie vhodných prostriedkov zvyšujúcich kapacitu dráhového systému vo vhodnom časovom intervale. Aplikovanie prostriedkov a riešení zvyšujúcich kapacitu vyžaduje v mnohých prípadoch značnú časovú rezervu, preto je potrebné kapacitné štúdie spracovávať v dostatočnom predstihu.

V tejto diplomovej práci bola spracovaná kapacitná štúdia posudzujúca dráhový systém letiska Milana Rastislava Štefánika v Bratislave vo viacerých aktuálne využívaných módoch prevádzky. Toto posúdenie bolo vypracované pomocou Airfield Capacity Spreadsheet modelu určeného na predbežné zhodnotenie kapacitnej situácie. Identifikované boli tiež faktory, ktoré aktuálne kapacitu dráhového systému limitujú a navrhnuté boli riešenia, ktoré môžu byť v prípade potreby zvýšenia kapacity na letisku Bratislava aplikované. Niektoré z týchto riešení boli pomocou modelu otestované a posúdené z hľadiska možného navýšenia kapacity.

Použitý model spracováva množstvo parametrov, z ktorých najdôležitejšími sú časy obsadenosti dráhy pri prilete rôznymi kategóriami lietadiel a separácie medzi jednotlivými kategóriami pri príletoch aj odletoch používané na danom letisku. K získaniu takýchto informácií boli potrebné merania a konzultácie s riadiacimi letovej prevádzky stanoviska APP/TWR Štefánik. Z dôvodu nemonitorovania mnohých dát letiskom Bratislava, bolo potrebné vytvoriť aj vlastné odhady založené na pozorovaných skutočnostiach. Tieto odhady a práca s dátami získanými meraním zanáša do výsledkov určité nepresnosti, ktoré je potrebné brať v úvahu pri interpretovaní výsledných kapacít.

Na letisku Bratislava je dráhový systém prevádzkovaný v dvoch konfiguráciách. V primárnej sú prílety vykonávané na dráhu 22 a odlety z dráhy 13. V sekundárnej konfigurácii sú prílety vykonávané na dráhu 31 a odlety z dráhy 04. Do kapacitného posúdenia boli zahrnuté aj prípady využívania iba jednej dráhy, nakoľko existujú prípady, kedy druhá dráha nemôže byť v používaní. Otestované boli teda kapacity pre primárnu a sekundárnu konfiguráciu a tiež pre

dráhy 31 a 22, ktoré sú využívané prevažne v tomto smere. Posledným otestovaným riešením v kategórii posúdenia aktuálneho stavu bola prevádzka na dráhe 31 za podmienok nízkej viditeľnosti a procedúrach využívaných pri týchto podmienkach. Kapacita iba priletov a iba odletov bola na dráhach 31 a 22 rovnaká – 20 priletov alebo 30 odletov za hodinu. Celkové kapacity pri zmiešanej prevádzke dosahujú na dráhe 31 18 priletov pri 17 odletoch, na dráhe 22 o 2 odlety za hodinu menej. Kapacita dráhy 31 za podmienok nízkej viditeľnosti dosahuje 9 priletov alebo 6 odletov za hodinu, pri zmiešanej prevádzke 9 priletov a súčasne 4 odlety. Čo sa týka využívania oboch dráh súčasne, primárna konfigurácia dosahuje celkový počet 34 pohybov za hodinu pri počte 17 priletov, 16 odletov a 1 letu typu „touch and go“. Sekundárna konfigurácia dosahuje za rovnakých podmienok celkovo 37 letov za hodinu pri 16 priletoch, 20 odletoch a 1 lete typu „touch and go“.

Pri tomto posúdení a pozorovaniach vykonaných na letisku Bratislava bolo pozorovaných niekoľko faktorov znižujúcich aktuálnu kapacitu. Takéto faktory je vhodné eliminovať ešte pred samotným zavádzaním nových konceptov zvyšujúcich kapacitu, nakoľko môžu byť v mnohých prípadoch finančne výhodnejšie a s veľkou pravdepodobnosťou aj potrebné pri zavádzaní ďalších moderných riešení. Do týchto limitujúcich faktorov patrí na letisku Bratislava najmä absencia certifikovaného pozemného prehľadového radaru, čo môže limitovať kapacitu pri prevádzke za podmienok nízkej viditeľnosti do výšky až 14 odletov v jednej hodine. Takéto vysoké obmedzenie je spôsobené hlavne skutočnosťou, že bez tohoto radaru sa za podmienok nízkej viditeľnosti môže po plochách letiska pohybovať vždy iba 1 lietadlo. V porovnaní s kapacitou v mix móde by po implementovaní radaru mohlo letisko dosahovať 8 priletov a súčasne 8 odletov za hodinu. Ďalším pozorovaným problémom bolo nevyužívanie rýchlo-odbočky na dráhe 31 kategóriami lietadiel, ktoré by boli schopné túto rýchlo-odbočku využiť. Táto skutočnosť limituje kapacitu na dráhe 31 vo výške 3 odletov za hodinu. Pri využití rýchlo-odbočky by dráha dosahovala kapacitu 18 priletov pri 20 odletoch za hodinu. Na letisku Bratislava sú prevádzkované 2 letecké školy využívajúce malé typy lietadiel pre svoj výcvik, čo výrazne zvyšuje podiel tejto kategórie medzi lietadlami operujúcimi na letisku. Aktuálne to letisku nespôsobuje výrazné problémy, no pri dosahovaní kapacitných limitov, by sa letisko pravdepodobne sústredilo na dodanie kapacity v prospech prevádzky prepravujúcej pasažierov. Po zmene podielu v kategóriách operujúcich na letisku sme pozorovali navýšenie kapacity v primárnej konfigurácii o 3 priletov a 4 odletov za hodinu, v sekundárnej konfigurácii o 4 priletov pri rovnakom počte odletov.

K limitom dráhového systému, ktoré však nebolo možné otestovať patrí ešte absencia pozemných komunikácií, kvôli ktorej sa pozemné prostriedky používané pri údržbe, monitorovaní a zbere dát musia presúvať po pojazdových dráhach a samotnej vzletovej a pristávacej dráhe. V niektorých prípadoch je možné presunúť takéto úkony na menej vyťažený časový interval, avšak pri stálej vyššej prevádzke alebo urgentných prípadoch môže táto skutočnosť zapríčiniť letom meškania. Posledným limitujúcim faktorom je chýbajúca rýchlo-odbočka pre lietadlá kategórie Large-Jet (Medium), ktorá by výrazne znížila časy obsadenosti dráhy a tiež kapacitu celého dráhového systému nakoľko je táto kategória na letisku Bratislava najzastúpenejšou. Vybudovať rýchlo-odbočku vo vhodnej vzdialenosti od prahu dráhy by však bolo pri aktuálnom dráhovom systéme veľmi náročné, nakoľko vo vhodných miestach pre rýchlo-odbočku sa nachádza vzletová a pristávacia dráha veľmi blízko stojánkam a nemusela by byť dosiahnutá dostatočná dĺžka rýchlo-odbočky pre potrebné spomalenie. Pri potrebe takejto rýchlo-odbočky by však bolo potrebné takéto tvrdenie ešte bližšie preskúmať a identifikovať iné varianty riešení.

Aktuálne využívanie dráhového systému v primárnej a sekundárnej konfigurácii používa jednu z dráh pre pristátia a druhú pre odlety. Dráha určená pre pristátia by však mohla byť využitá k doplneniu niekoľkých odletov medzi sekvenciou príletov. Takýto mód prevádzky by dosahoval v primárnej konfigurácii navýšenie až o 8 odletov v jednej hodine, čo by znamenalo celkovo 17 príletov pri 24 odletoch. V sekundárnej konfigurácii by navýšenie dosiahlo 9 odletov, celkovo by sa kapacita dráhového systému zvýšila na 16 príletov pri 29 odletoch.

Ako prostriedky zvyšujúce kapacitu dráhového systému používané v súčasnosti alebo blízkej budúcnosti boli identifikované nasledovné koncepty: manažér príletov a odletov, Ground Based Augmentation System, Microwave Landing System, časové separácie, výjazdy z dráh a rýchlo-odbočky, rekategorizácie typov lietadiel a využitie divergentných odletových tratí. Z týchto konceptov sa však podarilo modelom otestovať iba využívanie divergentných odletových tratí, ktoré by mohlo priniesť navýšenie kapacity pri prevádzke v primárnej konfigurácii do 5 odletov za hodinu a v sekundárnej konfigurácii do 4 odletov za hodinu. Približné navýšenie kapacity je možné posúdiť ešte pre rekategorizácie typov lietadiel vďaka dostupným informáciám o ich benefitoch. Tento koncept by teda navýšil kapacitu približne do výšky 4 pohybov za hodinu v závislosti od prevádzkovej konfigurácie.

6 Záver

V posledných desaťročiach narazilo mnoho letísk na svoje kapacitné limity aj z dôvodu nedostatočnej kapacity dráhového systému. V najbližších rokoch sa predpokladá strmý nárast leteckej prevádzky, ktorý naplní kapacity dráhových systémov mnohým ďalším letiskám. Nakoľko je zvyšovanie kapacity zdĺhavým procesom, je potrebné poznať aktuálnu kapacitu dráhového systému a porovnávať ju so zvyšujúcou sa prevádzkou aby bolo aplikovanie vhodných riešení dosiahnuté ešte pred naplnením kapacitných limitov.

Pre letisko Milana Rastislava Štefánika v Bratislave bolo v tejto diplomovej práci vyhotovené kapacitné posúdenie dráhového systému, ktoré obsahuje aktuálne kapacity dráhového systému v rôznych módoch prevádzky, faktory limitujúce aktuálnu kapacitu dráhového systému, možnosti zvýšenia kapacity dráhového systému a hodnoty o ktoré môže byť kapacita navýšená pre niektoré z navrhovaných konceptov.

Posúdenie dráhového systému letiska Milana Rastislava Štefánika v Bratislave bolo spracované pomocou voľne dostupného Airfield Capacity Spreadsheet modelu schváleného Federal Aviation Administration pre predbežné kapacitné posúdenia. Tento model pracuje s množstvom vstupov, ktoré boli pre dosiahnutie čo najpresnejších výsledkov konzultované s riadiacimi letovej prevádzky stanoviska APP/TWR Štefánik, letiskom Bratislava alebo pozorované a merané pokiaľ letisko tieto parametre nemonitoruje.

Kapacity dráhového systému boli preskúmané pre viac aktuálne využívaných módov prevádzky, z ktorých najvyššiu kapacitu dosahovala sekundárne využívaná konfigurácia, kde sú pristátia vykonávané na RWY 31 a vzlety z RWY 04. Pri tejto konfigurácii je letisko schopné dosiahnuť v jednej hodine 16 priletov a 20 odletov.

Kapacita dráhového systému letiska Bratislava je aktuálne limitovaná viacerými faktormi, z ktorých najmarkantnejšie sú absencia certifikovaného pozemného prehľadového radaru, ktorá znižuje počet odletov počas podmienok za nízkej viditeľnosti až o 14 pohybov, nevyužívanie rýchlo-odbočky na RWY 31 kategóriami lietadiel, ktoré sú schopné túto rýchlo-odbočku využiť – táto skutočnosť znižuje kapacitu o 3 pohyby za hodinu, ďalším faktorom sú dve letecké školy, ktoré znižujú kapacitu dráhového systému z dôvodu využívania menších kategórií lietadiel, ktoré ako bolo zamerané, produkujú vysoké časy obsadenosti dráhy a znižujú tým celkovú kapacitu o 4 až 7 pohybov podľa prevádzkovej konfigurácie.

Ďalším faktorom znižujúcim kapacitu môže byť v budúcnosti absencia pozemných komunikácií pre vozidlá servisu alebo údržby, ktoré v súčasnej dobe využívajú k svojmu pohybu pojazďové a vzletové a pristávacie dráhy. Výrazným nedostatkom je tiež chýbajúca rýchlo-odbočka pre kategóriu lietadiel, ktorá je na letisku Bratislava najzastúpenejšou, avšak jej dobudovanie by bolo veľmi náročné z hľadiska polôh dráh voči stojánkam.

V práci boli ďalej popísané prostriedky na zvýšenie kapacity – konkrétne manažér priletov a odletov, Ground Based Augmentation System, Microwave Landing System, časové separácie, výjazdy z dráh a rýchlo-odbočky, rekatégorizácie typov lietadiel a využitie divergentných odletových tratí. Navýšenie kapacity pomocou väčšiny z týchto prostriedkov nebolo možné pomocou modelu otestovať. Jediným otestovaným riešením je využitie divergentných odletových tratí, ktoré pre prevádzku v primárnej konfigurácii (vzlety z RWY 13, priletý na RWY 22) poskytujú navýšenie kapacity o 5 odletov a v sekundárnej konfigurácii o 4 odlety za hodinu. Navýšenie kapacity bolo stanovené ešte pre využitie konceptu rekatégorizácie typov lietadiel, nakoľko boli k tomuto parametru dostupné zdroje. Tento koncept by umožnil zvýšenie kapacity do približne 4 pohybov za hodinu v závislosti od módu prevádzky.

Aktuálne módy prevádzky využívajú vždy jednu dráhu pre pristátia a druhú pre odlety. Otestované bolo preto riešenie vykonávania priletov na jednu dráhu a odletov z oboch dráh. Takéto riešenie by navýšilo kapacitu pri prevádzke v primárnej konfigurácii o 8 odletov a v sekundárnej o 9 odletov. Celková kapacita by pri tomto móde prevádzky dosahovala pre primárnu konfiguráciu 17 priletov a 24 odletov za hodinu, pre sekundárnu konfiguráciu 16 priletov a 29 odletov za hodinu.

Pri výpočtoch výsledných kapacít boli použité vlastné merania a odhady, ktoré mohli viesť do posúdenia viacerou nepresnosťami a chýbami. Za najmarkantnejšie sú považované merania časov obsadenosti dráhy, odhady časov obsadenosti dráhy pre typy lietadiel, ktoré neboli namerané a odhady časov obsadenosti dráhy pre RWY 22, na ktorej nemohli byť hodnoty odmerané z dôvodu rekonštrukcie svetelnej sústavy a teda nemožnosti aktuálne využívať túto dráhu. Výsledné kapacity je preto potrebné uvažovať skôr ako orientačné hodnoty než presné výsledky, k čomu prispieva aj fakt, že model je určený práve na predbežné posúdenia nie detailné analýzy.

Z kapacitného posúdenia dráhového systému letiska Milana Rastislava Štefánika v Bratislave vyplynulo, že jeho aktuálne využitie celkovej kapacity sa v špičkových hodinách pohybuje okolo 50%, čo dáva letisku aktuálne dostatočný priestor na dôkladné preskúmanie najvhodnejších z navrhovaných možností a prípravu na implementáciu vybraných riešení.

Použitá literatúra

- (1) Seelamonthula, Raghu. Follow the greens. *Airport Review*. [Online] 12. 6 2014. [Cit.: 2. 5 2019.] Dostupné z: <https://www.internationalairportreview.com/article/16997/follow-the-greens/>.
- (2) Airbus. Global Market Forecast 2018-2037. *Airbus*. [Online] © AIRBUS S.A.S. 2018. [Cit.: 9. 5 2019.] Dostupné z: <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html>. ISBN: 978-2-9554382-3-6.
- (3) Schulz, Eric. *Airbus Global Market Forecast 2018-2037*. [Prezentácia] © AIRBUS.
- (4) EUROCONTROL. European Aviation in 2040. *EUROCONTROL*. [Online] 2018. [Cit: 5. 2 2019.] Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/official-documents/reports/challenges-of-growth-2018.pdf>.
- (5) Letisko M.R.Štefánika. Štatistické údaje. *Bts.aero*. [Online] © 2016 . [Cit: 14. 4 2019.] Dostupné z: <https://www.bts.aero/o-letisku/o-spolocnosti/profil-spolocnosti/statisticke-udaje/>.
- (6) Letisko M.R.Štefánika. O letisku. *Bts.aero*. [Online] © 2016 . [Cit.: 14. 4 2019.] Dostupné z: <https://www.bts.aero/o-letisku/o-spolocnosti/profil-spolocnosti/o-letisku/>.
- (7) Letové Prevádzkové Služby Slovenskej Republiky. AIP SR. *Aim.lps*. [Online] 2016-2019 © LPS SR, š.p. [Cit.: 15. 2 2019.] Dostupné z: <https://aim.lps.sk/web/index.php?fn=204&lng=sk&sess=8XpSJJJA66CGDHg0cJKVm8VrzH07e5orXCEJBABIF&doc=4240>.
- (8) Airtopsoft. *What is runway capacity ?*
- (9) AVISU, Stephen O'Flynn. Airport Capacity Assessment Methodology. *EUROCONTROL*. [Online] 11 22, 2016. [Cit.: 2 5, 2019.] Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/nom-apt-acap-acamman-v1-1.pdf>.
- (10) Paholok, Igor. Simulácia ako vedecká metóda. *Nb.vse*. [Online] 2008. [Cit: 14. 3 2019.] Dostupné z: <https://nb.vse.cz/kfil/elogos/student/paholok08.pdf>. ISSN 1211-0442.
- (11) Trani, Dr. Antonio A. *Review of Airport Runway Capacity*. Virginia : s.n., 2003.

- (12) Leigh Fisher Burlingame, CA et al. ARCP Report 79: Evaluating Airfield Capacity. *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*. [Online] 2012. [Cit: 12. 1 2019.] Dostupné z: <https://www.nap.edu/catalog/22674/evaluating-airfield-capacity>. ISBN 978-0-309-25873-9.
- (13) ICAO. *Doc 4444, Procedures for Air Navigation Services-Air Traffic Management*. Montréal : s.n., 2016. ISBN 978-92-9258-081-0 .
- (14) Martin, Foltin. Posterus. *Matlab-matematické operácie s maticami*. [Online] MATLAB/Comsol , 5 29, 2009. [Cit: 5 2, 2019.] Dostupné z: <https://www.posterus.sk/?p=226>. ISSN 1338-0087.
- (15) Stevens, Nick. Nats.aero. *Airport capacity*. [Online] Nats, 8 23, 2013. [Cit: 3 12, 2019.] Dostupné z: <https://nats.aero/blog/2013/08/airport-capacity-more-than-just-tarmac-and-terminals/>.
- (16) Richard de Neufville, Amedeo R. Odoni. *Airport Systems: Planning, Design and Management*. © 2013, s. 329. ISBN 978-0-07-177058-3.
- (17) Stevens, Nick. Five ways to improve airport capacity without extra runways. *Nats.aero*. [Online] Nats, 11 25, 2013. [Cit: 3 15, 2019.] Dostupné z: <https://nats.aero/blog/2013/11/five-ways-improve-airport-capacity-without-extra-runways/>.
- (18) EUROCONTROL. Arrival Manager (AMAN). *Skybrary*. [Online] EUROCONTROL, 7 24, 2017. [Cit: 3 15, 2019.] Dostupné z: [https://www.skybrary.aero/index.php/Arrival_Manager_\(AMAN\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Arrival_Manager_(AMAN)).
- (19) ICAO. *Improve Traffic Flow Throughput Runway Sequencing (AMAN/DMAN)*. [Presentation] Nairobi : ICAO, 2012.
- (20) Frankfurt Airport. Departure Management at Frankfurt Airport (DMAN-FRA). *Fraport*. [Online] 2007-2016. [Cit: 3 14, 2019.] Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20071128024204/http://www.fraport.com/cms/company/dok/225/225539.dmanfra@en.htm>.
- (21) EUROCONTROL. Precision landing: ILS, MLS, GBAS. *EUROCONTROL*. [Online] © 2019. [Cit: 3 5, 2019.] Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/articles/precision-landing>.

- (22) Daan Boelhouwer, Sandrine Doolhoff, Kylian Timmermans. Fact Sheets: Optimizing Runway Capacity. *Aviationfacts*. [Online] 2016. [Cit.: 3 10, 2019.] Dostupné z: <http://aviationfacts.eu/factsheets>.
- (23) Federal Aviation Administration. Satellite Navigation — Ground Based Augmentation System (GBAS). *FAA*. [Online] 4 12, 2018. [Cit.: 3 5, 2019.] Dostupné z: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/laas/.
- (24) EUROCONTROL. Ground-Based Augmentation System (GBAS). *EUROCONTROL*. [Online] © 2019. [Cit: 5 6, 2019.] Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/gbas>.
- (25) EUROCONTROL. Time-Based Separation. *EUROCONTROL*. [Online] © 2019. [Cit: 3 15, 2019.] Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/articles/time-based-separation>.
- (26) Shand, Andy. Enhancing airport resilience and runway capacity – an Intelligent Approach. *Nats.aero*. [Online] 9 14, 2017. [Cit: 3 18, 2019.] Dostupné z: <https://nats.aero/blog/2017/09/enhancing-airport-resilience-runway-capacity-intelligent-approach/>.
- (27) EUROCONTROL. RECAT-EU, optimising Europe's airports capacity. *EUROCONTROL*. [Online] © 2019. [Cit: 3 18, 2019.] Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/articles/recat-eu>.
- (28) EUROCONTROL. Connecting Runway Performance to the Network: RECAT EU (European Wake Vortex Recategorisation). *EUROCONTROL*. [Online] © 2019. [Cit: 3 15, 2019.] Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/eurocontrol-atc-global-2015/connecting-runway-performance-network-recat-eu-european-wake-vortex>.
- (29) *CANSO Global ATM Operations Conference*. CANSO. Madrid : s.n., 2014.
- (30) EUROCONTROL. Pair Wise Separations (PWS) / RECAT-2. *EUROCONTROL*. [Online] © 2019. [Cit: 3 10, 2019.] Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/articles/pair-wise-separations-pws-recat-2>.

Zoznam obrázkov

Obrázok 1: Nárast RPK od roku 1977 do roku 2037	10
Obrázok 2: ICAO mapa letiska Bratislava	12
Obrázok 3: Múd prevádzky, kde sú prílety vykonávané na jednu dráhu a odlety z druhej dráhy	20
Obrázok 4: Múd prevádzky, kde sú prílety vykonávané na jednu dráhu a odlety z oboch dráh	21
Obrázok 5: Typ grafu "pareto frontier"	22
Obrázok 6: Konfigurácie a módy prevádzky dráhového systému pozostávajúceho z 2 krížiacich sa/konvergentných/divergentných dráh	23
Obrázok 7: Výpočet matice pravdepodobnosti párovania kategórií lietadiel.....	30
Obrázok 8: Násobenie po prvkoch.....	32
Obrázok 9: Znázornenie výpočtu priemerného času požadovaného pre odlet medzi 2 príletmi pre daný pár kategórií.....	33
Obrázok 10: Výpočet času požadovaného na odlet medzi 2 príletmi.....	34
Obrázok 11: Znázornenie výpočtu koeficientu dostupnosti výjazdov z dráh.....	36
Obrázok 12: Znázornenie výpočtu podielu príletov na celkovej kapacite dráhového systému	39
Obrázok 13: Znázornenie módov prevádzky na letisku Bratislava.....	41
Obrázok 14: Percentuálne zastúpenie jednotlivých kategórií lietadiel.....	43
Obrázok 15: Pozície výjazdov z RWY 22 a RWY 31.....	45
Obrázok 16: Kapacita RWY 13.....	56
Obrázok 17: Kapacita RWY 22.....	57
Obrázok 18: Kapacita RWY 31 za podmienok nízkej viditeľnosti.....	58
Obrázok 19: RECAT-EU kategórie	65
Obrázok 20: Kapacita RWY 31 za podmienok nízkej viditeľnosti po znížení separácie medzi odletmi.....	68
Obrázok 21: Kapacita RWY 31 po znížení AROT pre kategóriu Small-S a Small-T.....	69

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Popis kategórií lietadiel používaných v modeli	25
Tabuľka 2: Dáta znázornené v matici prislúchajúce daným kategóriám.....	31
Tabuľka 3: Prerozdelenie kategórií používaných modelom.....	47
Tabuľka 4: Tabuľka zadaných vstupov na výpočet kapacity RWY 31.....	48
Tabuľka 5: Tabuľka zadaných vstupov na výpočet kapacity pri prevádzke v primárnej konfigurácii.....	51
Tabuľka 6: Tabuľka zmenených vstupov pre sekundárnu konfiguráciu oproti primárnej.....	54
Tabuľka 7: Tabuľka porovnania výsledných kapacít.....	59

Zoznam príloh

Príloha 1: Znázornenie výpočtu požadovanej separácie na prilete medzi dvomi kategóriami lietadiel.....	86
--	----

Príloha 1

Znázornenie výpočtu požadovanej separácie na prilete medzi dvomi kategóriami lietadiel

