



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA DOPRAVNÍ**

Bc. Šárka Hájková

**ZVÝŠENÍ KAPACITY DRÁHOVÉHO SYSTÉMU  
NA LKPR POMOCÍ PARALELNÍ DRÁHY 06R/24L**

Diplomová práce

**2019**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K621.....Ústav letecké dopravy**

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Šárka Hájková**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy**

Název tématu (česky): **Zvýšení kapacity dráhového systému na LKPR  
pomocí paralelní dráhy 06R/24L**

Název tématu (anglicky): Increasing Runway System Capacity at LKPR with the  
Parallel Runway 06R/24L

**Zásady pro vypracování**

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

- Kapacita letiště, kapacita dráhového systému, současný stav, faktory ovlivňující kapacitu letiště
- Paralelní dráha 06R/24L
- Metody pro výpočet kapacity dráhového systému
- Výpočet kapacit dráhového systému
- Výhledový provoz a zhodnocení vlivu paralelní dráhy na kapacitu na letiště



- 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: KERNER, L., L. KULČÁK a V. SÝKORA. Provozní aspekty letišť. Praha: ČVUT, 2003  
De NEUFVILLE, R., ODONI, A.: Airport systems - planning, design and management. New York: McGraw - Hill  
Letiště Praha [online]. Dostupné z: <http://prg.aero/cs/>

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.**  
**Ing. Tereza Topková**

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. Šárka Hájková  
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....27. července 2018

## Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce, především ŘLP ČR, s.p. Zvláště pak děkuji doc. Ing. Jakubu Krausovi, Ph.D. a Ing. Tereze Topkové za odborné vedení a konzultování diplomové práce. Dále děkuji doc. Ing. Vladimíru Sochovi, Ph.D. za pomoc při vytváření modelu v Matlabu. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat své matce a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní. 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 Praze dne 24. května 2019

  
.....  
podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA DOPRAVNÍ

ZVÝŠENÍ KAPACITY DRÁHOVÉHO SYSTÉMU NA LKPR POMOCÍ PARALELNÍ DRÁHY  
06R/24L

Diplomová práce  
Květen 2019  
Bc. Šárka Hájková

## **ABSTRAKT**

Předmětem diplomové práce je popis kapacity letiště se zaměřením na kapacitu dráhového systému s faktory, které ji ovlivňují, a představení budoucí paralelní dráhy 06R/24L na LKPR, ať už z technického či kapacitního hlediska. Pro výpočet kapacity dráhového systému jsou představeny metody jak pro současnou jednu RWY, tak pro budoucí paralelní systém drah. Kapacita současného stavu dráhového systému na LKPR je určena na základě vytvořeného programu podle Blumsteinova modelu. Nakonec je spočítána samotná kapacita paralelních drah pomocí FAA Airfield Capacity Modelu a zhodnocen vliv paralelní dráhy na kapacitu letiště.

## **ABSTRACT**

The subject of this Master's thesis is to describe an airfield capacity, especially a capacity of a runway system with factors affecting it and also to present the future parallel runway 06R/24L at LKPR from the technical and capacity point of view. Another objective of the thesis is to describe different means of determining the runway system capacity for the current single runway and the future parallel runways as well. The current single runway capacity at LKPR is calculated by a created program based on Blumstein model. Finally, the capacity of the parallel runways is calculated by the FAA Airfield Capacity model as well as the effect of the parallel runway on the airport's capacity is evaluated.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Kapacita letiště, dráhový systém, paralelní dráha 06R/24L, LKPR, metody pro výpočet kapacity, Blumsteinův model, FAA Airfield Capacity model

## **KEYWORDS**

Airfield capacity, runway system, parallel runway 06R/24L, LKPR, capacity calculation methods, Blumstein model, FAA Airfield Capacity Model

# Obsah

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>2. KAPACITA LETIŠTĚ</b> .....	<b>12</b>
2.1 KAPACITA PROVOZNÍCH PLOCH .....	14
2.1.1 Kapacita dráhového systému .....	14
2.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KAPACITU DRÁHOVÉHO SYSTÉMU .....	15
2.2.1 Počet a uspořádání RWY .....	15
2.2.1.1 Paralelní dráhový systém .....	16
2.2.2 Složení letadel .....	16
2.2.3 Rozstupy mezi letadly stanovené ATM .....	17
2.2.3.1 Rozstupy na jedné RWY .....	17
2.2.3.2 Rozstupy na paralelních drahách.....	18
2.2.3.3 Rozstupy na sbíhajících se drahách .....	18
2.2.4 VFR a IFR lety.....	19
2.2.5 Režimy provozu na paralelním dráhovém systému .....	19
2.2.6 Obsazenost dráhy.....	21
2.2.7 Stav a výkonnost ATM.....	22
2.2.8 Viditelnost, oblačnost, srážky .....	22
2.2.9 Síla a směr větru .....	23
2.2.10 Umístění, počet a charakter výjezdů z RWY.....	23
2.2.11 Hluková omezení týkající se životního prostředí .....	23
2.3 PŘEDPOKLADY PRO MAXIMÁLNÍ KAPACITU .....	24
<b>3. PARALELNÍ DRÁHA 06R/24L</b> .....	<b>25</b>
3.1 VÝHODY PARALELNÍ DRÁHY .....	26
3.2 UMÍSTĚNÍ PARALELNÍ DRÁHY .....	26
3.3 TECHNICKÉ PARAMETRY PARALELNÍ DRÁHY .....	27
3.4 KAPACITNÍ PARAMETRY DRÁHY .....	28
3.5 POJEZDOVÉ DRÁHY TWY .....	28
3.6 VÝJEZDY Z RWY .....	29
3.7 NÁJEZDY NA RWY.....	29
3.8 VYBAVENÍ PROVOZNÍCH PLOCH.....	30
3.9 PLÁNOVANÝ PROVOZ S PARALELNÍ DRÁHOU.....	31
<b>4. METODY PRO VÝPOČET KAPACIT DRÁHOVÉHO SYSTÉMU</b> .....	<b>33</b>

4.1	MATEMATICKÉ METODY .....	33
4.1.1	<i>Metoda Alfreda Blumsteina (single RWY)</i> .....	33
4.1.1.1	Postup pro výpočet kapacity dráhy – přílety .....	33
4.1.1.2	Postup pro výpočet kapacit dráhy – odlety .....	36
4.1.1.3	Postup pro výpočet kapacity dráhy – smíšený provoz .....	38
4.2	PŘÍRUČKA VYDANÁ FAA – CAPACITY HANDBOOK APPROACH .....	38
4.3	POČÍTAČOVÉ MODELY A SIMULACE .....	41
4.3.1	<i>FAA Airfield Capacity Model</i> .....	42
4.3.1.1	„Dual Model“ pro kapacitu paralelních drah .....	47
<b>5.</b>	<b>VÝPOČET KAPACIT DRÁHOVÉHO SYSTÉMU .....</b>	<b>50</b>
5.1	SINGLE RWY (SOUČASNÝ STAV) .....	50
5.1.1	<i>Výpočet kapacity – přílety</i> .....	50
5.1.2	<i>Výpočet kapacity – odlety</i> .....	54
5.1.3	<i>Výpočet kapacity – smíšený provoz</i> .....	56
5.1.4	<i>Program v Matlabu pro výpočet kapacit</i> .....	57
5.2	PARALELNÍ DRÁHY (BUDOUCÍ STAV) .....	60
5.2.1	<i>FAA Airfield Capacity Model</i> .....	60
5.2.1.1	Vstupy modelu .....	61
5.2.1.2	Výstupy modelu .....	67
5.2.1.3	Výsledné kapacity .....	68
<b>6.</b>	<b>VÝHLEDOVÝ PROVOZ A ZHODNOCENÍ VLIVU PARALELNÍ DRÁHY NA KAPACITU LETIŠTĚ .....</b>	<b>72</b>
<b>7.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>75</b>
<b>8.</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>77</b>
<b>9.</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>79</b>
<b>10.</b>	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>80</b>
<b>11.</b>	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>81</b>
11.1	PŘÍLOHA A - SKRIPT K MODELU V MATLABU .....	81



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK:

AC	FAA Advisory Circular / FAA Poradní oběžník
ACN	Aircraft Classification Number / Klasifikační číslo letadla
AND	The Approximate Network Delays / Model pro spočtení přibližného zpoždění
AMSL	Above mean sea level / Výška nad střední hladinou moře
AROT	Arrival Runway Occupancy Time / Doba obsazenosti přistávací dráhy
ATC	Air Traffic Control / Řízení letového provozu
ATM	Air Traffic Management / Uspořádání letového provozu
CAT	ILS category / Kategorie přístrojového přiblížení
DME	Distance measuring equipment / Měřič vzdálenosti
EIA	Environmental Impact Assessment / Posuzování vlivu na životní prostředí
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation / Evropská organizace pro bezpečnost leteckého provozu
FAA	Federal Aviation Administration / Federální letecká správa
FRTT	Flight crew reaction time to ATC take-off clearance / Reakční doba posádky na povolení ke vzletu
FT	Flight time / Letová doba
HDP	Hrubý domácí produkt
HERMES	Heuristic Runway Movement Event Simulation / Heuristická simulace pohybů na dráze
ICAO	International Civil Aviation Organization / Mezinárodní organizace pro civilní letectví
IFR	Instrument flight rules / Pravidla pro let podle přístrojů
ILS	Instrument landing systém / Systém pro přesné přiblížení a přistání
IMC	Instrument meteorological conditions / Meteorologické podmínky pro let podle přístrojů
JAR	Joint Aviation Regulations / Společné letecké předpisy
KBP	Koncová bezpečnostní plocha
LKPR	Václav Havel Airport Prague / Letiště Václava Havla Praha
LMI	Logistic Management Institute / Institut logistického managementu
LUPT	Line - up time / Čas vstupu na dráhu
MI	Mix index / index složení letadel
MTOW	Maximum take off weight / Maximální vzletová hmotnost
MÚK	Mimoúrovňová křižovatka

NM	Nautical mile / Námořní míle
NTZ	No transgression zone / Nepřekročitelná zóna
N/A	Not applicable / Neaplikovatelné
PAPI	Precision approach path indicator / Indikátor přesné sestupové roviny pro přesná přiblížení
RAMS	Reorganized ATC Mathematical Simulator / Reorganizovaný ATC matematický simulátor
ROT	Runway occupancy time / Čas obsazení dráhy letadlem
ROTA	Arrival runway occupancy time / Doba obsazení dráhy letadlem při přiletu
ROTD	Departure runway occupancy time / Doba obsazení dráhy letadlem při odletu
RWSL	Runway status lights / Indikátor stavu dráhy
RWY	Runway / Vzletová nebo přistávací dráha
ŘLP	Řízení letového provozu ČR
SIMMOD	Airport and Airspace Simulation Model / Simulační model letiště a vzdušného prostoru
TAAM	Total Airspace and Airport Modeler / Program ke zjištění celkové kapacity letiště a vzdušného prostoru
THR	Threshold / Prah dráhy
TMA	Terminal control area / Koncová řízená oblast
TWY	Taxiway / Pojezdová dráha
TOFT	Take-off roll time / Doba rozjezdu do odpoutání podvozku
VFR	Visual flight rules / Pravidla pro let za viditelnosti
VMC	Visual meteorological conditions / Meteorologické podmínky pro let za viditelnosti
VOR	VHF omnidirectional radio range / VKV všesměrový radiomaják
WAIT	Wait time / Vyčkávací čas

# 1. Úvod

Několik posledních desítek let se vyznačuje velkým progresem letecké dopravy ve světě i v České republice. Současně s tímto růstem se však na mnoha letištích začaly projevovat kapacitní nedostatky, které letiště omezují v jejich dalším rozvoji a růstu. Hlavním ukazatelem pro kapacitu letiště je množství pohybů (letadel, cestujících) uskutečněných za určitý časový interval. Neblahým důsledkem nedostatečné kapacity jsou zpoždění, která mají vliv také na kvalitu služeb, jež jsou na letišti poskytovány.

Významný nárůst je patrný i na největším letišti v České republice – letišti Václava Havla v Praze. Za poslední rok bylo přepraveno přes 16 milionů cestujících a přes 80 tisíc tun nákladu, přičemž tato čísla neustále stoupají. Avšak dráhová kapacita zůstala od 60. let v téměř nezměněném stavu. Nedostatečná kapacita letiště a obzvláště dráhového systému se začala plně projevovat v 90. letech. Letiště muselo přejít do kategorie plně koordinovaných letišť, tedy letišť, která nejsou pro letecké dopravce volně k dispozici, ale na která je nutné si pro každý let vyžádat letištní slot. Situace nedostatečné kapacity dráhového systému vrcholí počátkem 21. století, kdy už je jasné, že bez radikálního rozšíření dráhového systému na LKPR nebude letiště schopno vyhovět požadavkům neustále rostoucího počtu cestujících a leteckých společností, a proto je nutné vybudování nové paralelní dráhy. [1]

V roce 2007 se objevují první návrhy výstavby paralelní dráhy, jejího umístění a technických parametrů. Po dalších letech nečinnosti a odkládání projektu se konečně vláda v roce 2017 rozhodla podpořit výstavbu paralelní dráhy 06R/24L, jelikož hlavní dráha 06L/24R je v provozní špičce naprosto nedostačující.

Cílem této diplomové práce je popsat kapacitu letiště se zaměřením na kapacitu dráhového systému s faktory, které ji ovlivňují a představit budoucí paralelní dráhu 06R/24L na LKPR, ať už z technického či kapacitního hlediska. Dále představit metody výpočtu kapacity dráhového systému jak pro současnou jednu RWY, tak pro budoucí paralelní systém drah. Kapacita současného stavu dráhového systému na LKPR je určena na základě vytvořeného programu podle Blumsteionova modelu. Hlavní částí práce je spočítat samotnou kapacitu paralelních drah pomocí FAA Airfield Capacity Modelu a zhodnotit vliv paralelní dráhy na kapacitu letiště.

## 2. Kapacita letiště

Kapacita letiště je určena schopností jednotlivých letištních zařízení ve spolupráci s ostatními zařízeními odbavit pravidelné špičky přepravních toků v určitém časovém období za dohodnuté úrovně kvality. Měříme ji pomocí výkonových ukazatelů za určitý časový okamžik, např. počet pohybů letadel za hodinu, počet odbavených cestujících za hodinu nebo množství přepraveného nákladu za hodinu. Pokud je povolená kapacita některého zařízení překročena, vznikají zpoždění v odbavovacím procesu jak u letadel, tak i u cestujících a nákladu, a tím dochází ke snižování úrovně kvality poskytovaných služeb. Jelikož nedostatek kapacity téměř vždy způsobuje zpoždění, je plánování rozvoje kapacit jeden z nejdůležitějších úkolů každého letiště. [2]

Při plánování se musí vycházet ze špičkového přepravního toku, aby se udržovala určitá úroveň poskytovaných služeb a aby nedošlo k překročení dané kapacity. Mimo přepravní špičky je kapacita mnohdy nevyužitá. Proto se při plánování a projektování vychází z přepravního toku menšího, než je absolutní maximum. Během roku lze akceptovat po určitý počet hodin sníženou úroveň poskytovaných služeb v rámci přijatelných hodnot vzhledem k nedostatku kapacity, aniž by jakýmkoli způsobem byla ohrožena bezpečnost cestujících nebo provozu letadel. Takový to počet hodin a rozsah snížení kvality služeb by však měl být omezen. [2]



Obrázek 1: Subsystémy letiště [1]

Hodnocení kapacitní problematiky letišť můžeme vyjádřit několika způsoby:

- **dynamická kapacita** – hodnotí maximální počet činností za určitý časový interval (např. množství cestujících procházejících terminálem za daný okamžik)
- **statická kapacita** – množstevní potenciál daného zařízení nebo plochy závislý na úrovni poskytovaných služeb (např. počet cestujících, kteří se na dané ploše nacházejí v daném okamžiku)
- **schválená kapacita** – vyjádření celkové kapacity se splněnými požadavky letecké dopravy v daném časovém intervalu
- **maximální kapacita** – maximální přepravní tok, který se může uskutečnit za jednu hodinu a není v rozporu s pravidly řízení letového provozu (rozstupy, obsazení dráhy), aniž by docházelo ke snížení úrovně služeb. Maximální teoretická kapacita nepočítá s možným zpožděním. [3]

Dále rozlišujeme kapacitu z hlediska teoretického a praktického hodnocení:

- **teoretická kapacita** – limitní hodnota leteckých činností za časovou jednotku, jedná se o úplné využití dané kapacity za předpokladu, že nebude docházet k žádnému zpoždění
- **praktická kapacita** – menší než teoretická kapacita zohledňující zpoždění, jedná se o počet operací, které je letiště schopno pojmout v určitém časovém intervalu s maximálním možným přijatelným zpožděním [2,3]

Na infrastrukturu letiště je třeba nahlížet jako na vzájemně propojený systém, jehož jednotlivé části musí být kapacitně sladěny. Celková kapacita letiště odpovídá kapacitě nejslabší části.

Kapacitu letiště můžeme rozdělit na následující části: [2,3]

- kapacita provozních ploch
- kapacita terminálu
- kapacita služeb ATC
- kapacita TMA
- kapacita příjezdových komunikací
- kapacita dopravního systému letiště – město
- kapacita letištních parkovišť

Každá z těchto částí výrazně ovlivňuje plánování a projektování letiště, a proto je třeba ke každé přistupovat s jistým zřetelem. Z hlediska letištní infrastruktury se práce zabývá kapacitou provozních ploch. [2]

## 2.1 Kapacita provozních ploch

Kapacita provozních ploch se dále rozlišuje na:

- kapacitu dráhového systému
- kapacitu pojezdového systému
- kapacitu stojánek na odbavovací ploše

### 2.1.1 Kapacita dráhového systému

Kapacita dráhového systému se považuje za nejslabší článek letiště. Velmi často určuje celkovou kapacitu letiště, a proto je cílem každého letiště ji co nejpřesněji určit. Jelikož kapacitu dráhového systému nelze navyšovat postupně jako u ostatních letištních zařízení, řešením bývá výstavba nových drah nebo jejich rekonstrukce, které ale způsobují velká omezení provozu. [4]

Kapacitu dráhového systému můžeme vyjádřit dvěma způsoby:

- **maximální počet pohybů letadel zvládnutelných dráhovým systémem za rok** - v tomto případě se z důvodu maximální přesnosti výpočtu započítávají i vlivy skladby letadel, nerovnoměrnosti provozu během roku a dne, provozní využití dráhy a jiné meteorologické a provozní podmínky [2]
- **maximální počet pohybů letadel zvládnutelných dráhovým systémem za hodinu** - při těchto výpočtech se projevují vlivy meteorologických a provozních podmínek, které ovlivňují výpočet kapacity, proto se používá tzv. hodinová zátěžová kapacita [2]

Z těchto výpočtů získáme roční kapacitu, kapacitu v hodinové špičce a hodinovou zátěžovou kapacitu. Pokud by výsledky těchto kapacit byly menší než požadovaná kapacita, docházelo by ke zpoždění v odbavovacím procesu letadel, a tím by byla snížena kvalita nabízených služeb. [2]

Při plánování kapacity dráhového systému se vždy vychází ze špičkové hodiny. Počet pohybů letadel ve špičce udává požadavky na kapacity letištních zařízení sloužící pro odbavení letadel, cestujících a nákladu. I veškerá kvalita služeb se určuje podle provozu ve špičkových obdobích a neměla by se snížit pod stanovenou hodnotu. [4]

Cílem každého letiště je snaha zabezpečit maximální dráhovou kapacitu. Nejvíce ji ovlivňuje pravidelný tok letadel. Pokud by byl zajištěn přepravní tok bez překážek, pak by letadla mohla přilétat do TMA a rovnou pokračovat na přímá přiblížení. Pokud je ale přepravní tok vyšší než daná dráhová kapacita, letadlo musí setrvat po určitou dobu ve vyčkávacím prostoru. Tok

letového provozu je ale za běžných podmínek nepravidelný. Jelikož požadavky povolují pouze uspořádaný tok letadel při přiblížení na přistání, při provozu na plnou dráhovou kapacitu jsou způsobena zdržení přilétávajících letadel a dochází tak ke zpoždění. [2]

## **2.2 Faktory ovlivňující kapacitu dráhového systému**

Maximální kapacitu lze jednoduše spočítat pro počet pohybů za určité období. Problémem je, že kapacita letiště není nikdy konstantní. Liší se v průběhu roku i dne v závislosti na fyzikálních a provozních faktorech. Mezi hlavní faktory, které výslednou kapacitu ovlivňují, patří: [4]

- počet a uspořádání RWY
- složení letadel
- rozstupy mezi letadly stanovené ATM
- VFR a IFR lety
- režimy provozu na paralelním dráhovém systému
- obsazenost dráhy
- stav a výkonnost ATM
- viditelnost, oblačnost, srážky
- síla a směr větru
- umístění, počet a charakter výjezdů z RWY
- hluková a jiná omezení týkající se životního prostředí

### **2.2.1 Počet a uspořádání RWY**

Mezi jeden z nejdůležitějších parametrů, který ovlivňuje kapacitu dráhového systému, patří počet drah a jejich uspořádání. Na menších letištích se převážně setkáme pouze s jednou RWY, na větších letištích už musí být zaveden systém několika drah. Používají se buď paralelní dráhy, křížující se dráhový systém nebo otevřený V-systém drah. U systému několika drah je kromě zvýšení celkové kapacity další výhodou také možnost přesunu provozu na jinou dráhu při údržbě nebo při nepříznivých podmínkách. Mezi nevýhody těchto dráhových systémů patří jejich investiční náklady na výstavbu a vybavení a náročnější řízení provozu na provozních plochách a v TMA. [2,3]

Důležité je také rozlišovat rozdíl mezi počtem drah na letišti a počtem aktivních drah, které se v daný časový okamžik používají. Letiště může mít dostatek drah, ale nemusí je využívat všechny najednou, ať už kvůli jejich rozložení nebo hlukovým omezením. Příkladem je letiště Schiphol v Amsterdamu, které má pět hlavních drah, ale souběžně využívá maximálně tři. [4]

### 2.2.1.1 Paralelní dráhový systém

Jelikož se tato práce týká výpočtu kapacit paralelního dráhového systému, je tento dráhový systém rozebrán podrobněji.

Paralelní dráhový systém je z hlediska kapacit nejvýhodnější variantou pro letiště s hustým provozem. Můžeme zde provozovat nezávislá paralelní přiblížení, závislá paralelní přiblížení, oddělený paralelní provoz nebo nezávislé paralelní odlety. Aby byla využita maximální kapacita, musí však být provozována nezávislá paralelní přiblížení a nezávislé paralelní odlety. [5]

Pro nezávislá paralelní přiblížení musí být vzdálenost os drah minimálně 1035 m. Dále musí být letadla neustále sledována sekundárním přehledovým radarem s minimální přesností v azimutu  $0,06^\circ$  s intervalem obnovy informace max. 2,5 s. Pokud je osová vzdálenost drah větší než 1525 m, stačí použít přehledový radar s minimální přesností v azimutu  $0,3^\circ$  a periodou obnovy informace 5 s a méně. V každém případě musí být velitelé letadel informováni o provozování nezávislého paralelního přiblížení na letišti a musí jim být sděleno označení dráhy s příslušnou ILS/MLS frekvencí. Dále musí být zajištěno, aby se trať nezdařeného přiblížení pro jedno přiblížení odchylovala nejméně o  $30^\circ$  od trati nezdařeného přiblížení na sousedním přiblížení a musí být zřízena a zobrazena na situačním zobrazení nepřekročitelná zóna (NTZ) nejméně 610 m široká se stejnou vzdáleností od prodloužených os drah. Rozstupy mezi dvěma přibližujícími letadly jsou stanoveny na 3 NM. Mezi osami přiblížení je vyhlášen ochranný prostor. [2]

Nezávislé paralelní odlety lze provádět pouze pokud je splněna minimální osová vzdálenost 760 m. Dále se musí tratě paralelně odlétávajících letadel ihned po startu rozbíhat minimálně o  $15^\circ$  a provoz musí být sledován vhodným přehledovým radarem. [2]

Aby došlo k plnému využití kapacity, je důležité správně zvolit režim provozu na paralelních drahách. Tyto režimy budou podrobně popsány později.

### 2.2.2 Složení letadel

Letadla se rozdělují podle kategorie v úplavu do tří váhových kategorií dle maximální vzletové hmotnosti, viz tabulka níže. Je tak učiněno z toho důvodu, aby byly zachovány bezpečné rozstupy. Velká letadla totiž při letu způsobují proudění, tzv. turbulenci v úplavu, která je nebezpečná především pro následující malá letadla. Z pohledu kapacity je samozřejmě výhodnější, když je složení letadel homogenní tzn., že se provoz skládá zejména z jedné



kategorie letadel a rozstupy jsou vesměs konstantní, a tím pádem je letištní kapacita lépe využita. [4]

**Tabulka 1: Rozdělení letadel podle kategorie turbulence v úplavu [4]**

<b>Kategorie</b>	<b>MTOW</b>
L (lehká)	7 000 kg a méně
M (střední)	7 000 kg – 136 000 kg
H (těžká)	136 000 kg a více

### **2.2.3 Rozstupy mezi letadly stanovené ATM**

Požadavky na minimální rozstupy mezi letadly, které se týkají pouze IFR letů, udává ATM systém. Jejich cílem je zajištění bezpečnosti a plynulosti provozu. Na základě daných rozstupů je možné určit maximální počet letadel, které proletí vzdušným prostorem nebo dráhovým systémem za určitý časový okamžik. Minimální podélný rozstup mezi letadly je dle ICAO 5,6 km (3 NM) při přiblížení i odletu a liší se na základě počtu a uspořádání drah. [4]

#### **2.2.3.1 Rozstupy na jedné RWY**

Rozstupy mezi letadly se určují podle kategorie turbulence v úplavu. Letadla jsou podle tohoto kritéria rozdělena do váhových kategorií, které definují jejich rozstupy buď časem, nebo vzdáleností. Následující tabulka znázorňuje minimální rozstupy (v NM) mezi letadly při přiblížení na přistání. Používají se také při přistání, po kterém následuje odlet a při odletu, který je následován přistáním. Při odletu letounu, který je následován přibližujícím se letounem, je rozstup při rozjezdu letounu na RWY minimálně 2 NM. [4]

Na základě rozsáhlého výzkumu mezi FAA a EUROCONTROLEM se přišlo na to, že tyto rozstupy lze ještě bezpečně snížit, a tím naopak kapacitu RWY zvýšit. Tento program pro snižování rozstupů se nazývá recat a rozděluje letadla do nových šesti kategorií (A – F). Kategorie Medium je rozdělena do dalších dvou a Heavy dokonce do tří kategorií. Pro pozdější výpočty kapacit se v modelu vychází z původního rozdělení, viz následující tabulka.

**Tabulka 2: Minimální rozstupy mezi letadly (v NM) [4]**

Následující letadlo	Předcházející letadlo		
	H	M	L
H	4 NM	3 NM	3 NM
M	5 NM	3 NM	3 NM
L	6 NM	5 NM	3 NM

Další tabulka udává rozstupy mezi letadly, které jsou dány časovým intervalem. Tyto rozstupy se dodržují mezi dvěma odlétávajícími letadly.

**Tabulka 3: Minimální rozstupy mezi odlétávajícími letadly (v sekundách) [4]**

Předcházející letadlo	Následující letadlo		
	H	M	L
H	90 s	120 s	120 s
M	60 s	60 s	60 s
L	45 s	45 s	45 s

### 2.2.3.2 Rozstupy na paralelních drahách

Rozstupy pro paralelní dráhový systém se určují na základě vzdálenosti mezi jednotlivými drahami, viz tabulka níže. Dráhy se využívají buď v segregovaném režimu, kdy se jedna dráha využívá pouze pro odlety a druhá pouze pro přílety, nebo ve smíšeném režimu, kdy jsou obě RWY využívány kombinovaně, jak pro vzlety tak pro přistání. [4]

**Tabulka 4: Minimální rozstupy na paralelních drahách [4]**

Vzdálenost mezi drahami	Přílety/Přílety	Odlety/Odlety	Přílety/Odlety	Odlety/Přílety
Do 762 m	stejně jako u jedné RWY	stejně jako u jedné RWY	provede se přistání	provede se vzlet
762 m – 1310 m	1,5 NM	nezávislé	nezávislé	nezávislé
Více než 1310 m	nezávislé	nezávislé	nezávislé	nezávislé

### 2.2.3.3 Rozstupy na sbíhajících se drahách

Minimální rozstupy u sbíhajících se nebo křížujících se drah nejsou přesně definovány a liší se na základě letiště a státu. Jsou ovlivněny místem křížení drah, velikostí úhlu drah, typem

letounů, počtem pohybů a dalšími faktory. Nejvyšší kapacity je dosaženo v případě, kdy se dráhy kříží na začátku ve směru provozu, a je tak možné dosáhnout stejné kapacity jako u paralelních drah s krátkou nebo střední osovou vzdáleností. Naopak nejnižší kapacity dosáhneme v případě, kdy je provoz na jedné z drah omezován bočním větrem, což způsobuje, že je kapacita celého dráhového systému stejná jako u systému s jednou dráhou. [4]

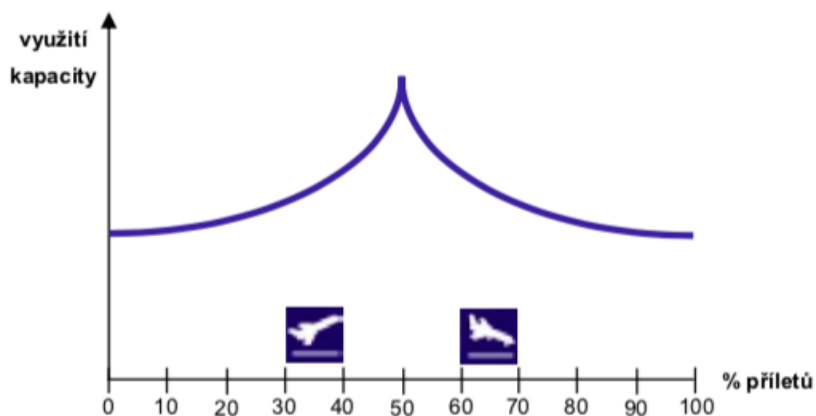
#### 2.2.4 VFR a IFR lety

Dráhová kapacita je také ovlivňována lety VFR (let za viditelnosti) a lety IFR (let podle přístrojů). Lety podle pravidel IFR snižují kapacitu dráhového systému více, než je tomu u letů podle pravidel VFR. Na velkých dopravních letištích s mezinárodním provozem jsou aplikovány operace podle pravidel IFR u více jak 90% pohybů. [2]

#### 2.2.5 Režimy provozu na paralelním dráhovém systému

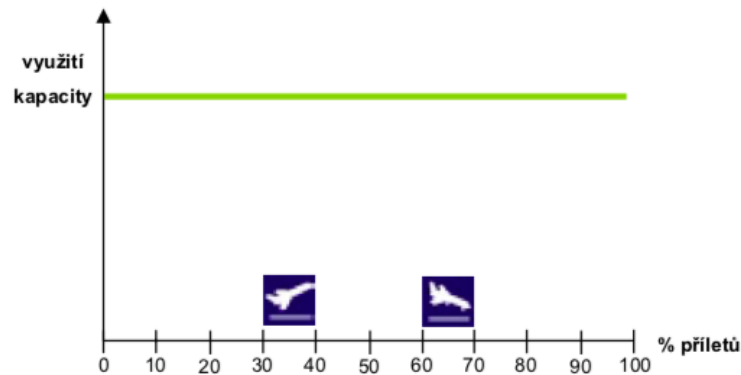
Pro dosažení maximální kapacity je důležitá správná volba režimu provozu. Rozlišují se 4 typy režimů. Každý režim je doplněn o křivku zobrazující využití kapacity v závislosti na procentu příletů.

- a) Segregovaný provoz - jedna dráha využívána pouze pro přílety a druhá pouze pro odlety



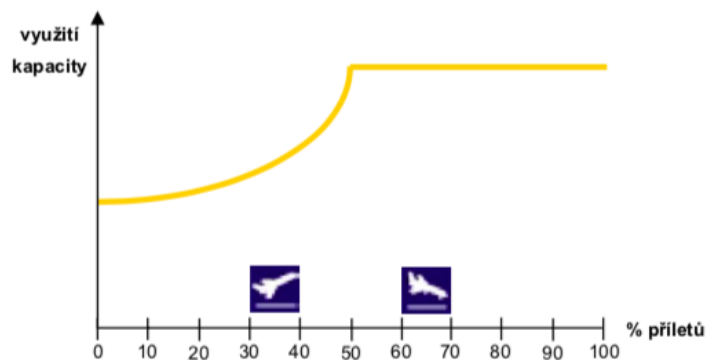
Obrázek 2: Využití kapacity při segregovaném provozu [3]

b) Smíšený provoz – obě dráhy jsou využívány kombinovaně, jak pro vzlety, tak pro přistání



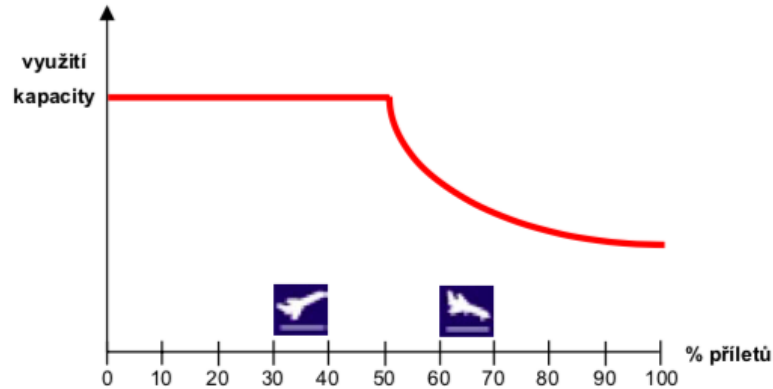
Obrázek 3: Využití kapacity při smíšeném provozu [3]

c) Polosmíšený příletový provoz – jedna dráha je využita výhradně pro přílety, na druhé dráze je provoz smíšený. Jak je vidět na obrázku, kapacita není dostatečně využita, pokud počet odletů převyší počet příletů.



Obrázek 4: Využití kapacity při polosmíšeném příletovém provozu [3]

d) Polosmíšený odletový provoz – jedna dráha je vyhrazena pouze pro odlety, na druhé je provoz smíšený. V tomto případě není dostatečně využita kapacita v momentě, kdy počet příletů převyší počet odletů, viz obrázek 5. [3]



Obrázek 5: Využití kapacity při polosmíšeném odletovém provozu [3]

Provozně nejjednodušší je segregovaný provoz, ale z hlediska kapacity je nevyhodnější smíšený provoz, který umožňuje maximální možné využití kapacity dráhového systému a neklade žádná provozní omezení. Segregovaný provoz je kapacitně výhodnější pouze v případě, kdy se počet příletů rovná počtu odletů. Jinak dochází v určité chvíli k přetížení příletové dráhy a naopak k nevyužití odletové dráhy a dochází tak ke ztrátám. [3]

## 2.2.6 Obsazenost dráhy

Dalším faktorem, který se podílí na celkové dráhové kapacitě, je doba letadel strávená na RWY. Tato doba se označuje jako obsazenost dráhy a je závislá jak na umístění dráhy a počtu rychloodboček, tak na přibližovací rychlosti přistávajícího letadla. Čím je přibližovací rychlost nižší, tím je nižší i dráhová kapacita. Aby se dosáhlo co nejvyšší kapacity RWY, musí se brát zřetel na mnoho protichůdných požadavků, jako jsou krátká doba obsazení dráhy letadlem, vysoká úroveň bezpečnosti provozu (doržování minimálních rozstupů), ekonomické požadavky dopravců (nízké opotřebení brzd, redukce výkonu při vzletu) a požadavky cestujících na přepravní komfort (akcelerace a decelerace). [3]

Pro každou dráhu měříme následující hodnoty:

**ROT** (Runway Occupancy Time) - čas obsazení dráhy letadlem, dělí se na ROTA a ROTD

**ROTA** (Arrival Runway Occupancy Time) - doba obsazení dráhy letadlem při příletu - časový interval mezi přeletem THR a vyklizením RWY (čas vyklizení RWY - okamžik, kdy se letadlo svou nejzazší částí ocitne mimo RWY)

**ROTD** (Departure Runway Occupancy Time) - doba obsazení dráhy letadlem při odletu - časový interval mezi protnutím vyčkávacího místa a přeletem konce RWY

Čas obsazení ROTD lze dále rozdělit na několik dalších časových úseků, kdy platí:

$$\text{ROTD} = \text{LUPT} + \text{WAIT} + \text{FRTT} + \text{TOFT} + \text{FT}$$

**LUPT** (Line - Up Time) - čas vstupu na dráhu (interval mezi protnutím vyčkávacího místa a usazením letadla do osy RWY)

**WAIT** (Wait Time) - čas vyčkávání na RWY

**FRTT** (Flight Crew Reaction Time to ATC Take - off Clearance) - reakční doba posádky na povolení ke vzletu

**TOFT** (Take - off Roll Time) - interval mezi rozjezdem a odpoutáním hlavního podvozku od RWY

**FT** (Flight Time) - čas mezi odpoutáním hlavního podvozku a přeletem konce RWY [3]

### 2.2.7 Stav a výkonnost ATM

K dosažení maximální možné dráhové kapacity je potřeba výkonný ATM systém s dobře vycvičeným a zkušeným personálem. Řídicím letového provozu jsou poskytovány skrz ATM přesné informace o poloze letadel, díky nimž mohou aplikovat minimální možný rozstup dvou po sobě následujících letadel na přistání, a tím zvýšit propustnost vzletové a přistávací dráhy. [4]

### 2.2.8 Viditelnost, oblačnost, srážky

Kapacitu dráhového systému ovlivňují také meteorologické podmínky. Rozlišují se VMC a IMC letové podmínky během letu. Za podmínek VMC, což jsou meteorologická minima pro provedení letu za pomoci vizuální kontroly polohy letadla v prostoru, je kapacita vyšší než za podmínek IMC, což jsou meteorologické minima nižší než VMC pro bezpečné provedení letu za pomoci přístrojové kontroly polohy letadla v prostoru. Minimum pro lety za viditelnosti se rozlišuje podle tříd vzdušného prostoru. Pro vzdušný prostor třídy B, C, D a E musí být vzdálenost od oblaků alespoň 1500 m horizontálně a 300 m vertikálně a letová dohlednost musí dosahovat alespoň 8 km nad 3050 m (10000 ft) AMSL a 5 km pod 3050 m (10000 ft) AMSL. Pro vzdušný prostor třídy F a G se musí letoun vyskytovat vně oblaků za stálé viditelnosti země a letová dohlednost musí být alespoň 5 km. [4]

Dále výrazně působí na kapacitu dráhového systému srážky a námraza. Tím dochází ke snížení viditelnosti, zhoršují se brzdící účinky kol letadel a je potřeba zařízení pro odmrazování. V případě zhoršených brzdících účinků se redukují povolené meze pro boční vítr. Nejhůře

ovlivňují provoz letiště sněhové či tropické bouře, které většinou vedou až k úplnému uzavření letiště. [4]

### **2.2.9 Síla a směr větru**

Dalším faktorem ovlivňujícím výrazně kapacitu dráhového systému je boční vítr, pro který jsou stanovené určité limity, které se nesmí překročit. Vlivem větru dochází k časté změně velikosti kapacity, která se v čase mění. Pak lze mluvit o proměnlivosti kapacity dráhového systému způsobené nepříznivými povětrnostními podmínkami. [4]

### **2.2.10 Umístění, počet a charakter výjezdů z RWY**

K dosažení maximální kapacity musí být vhodně naplánován počet, umístění a charakter všech TWY. Ty totiž velmi ovlivňují dobu obsazení dráhy letadlem při příletu, který je definován jako časový okamžik mezi přeletem THR dráhy a okamžikem vyklizení RWY (okamžik, kdy se letadlo svou nejzazší částí nachází mimo RWY). Proto se pro redukci času obsazenosti RWY, a tím zvýšení kapacity dráhového systému konstruuje tzv. „rychlodbočky“, což jsou pojezdové dráhy pro rychlé odbočení. Nevýhodou těchto „rychlodboček“ jsou však náklady na jejich výstavbu, které jsou vyšší než náklady na klasické 90° výjezdy. [4]

### **2.2.11 Hluková omezení týkající se životního prostředí**

Letecký provoz s sebou přináší z pohledu na životní prostředí také negativní vlivy. Mezi nejdiskutovanější patří hluk z leteckého provozu, který se stává stále významnějším tématem. Zdroje zvuku pochází jak z proudové jednotky nebo turbovrtulové jednotky, tak i z draku (podvozek, vztlaková mechanizace). Z tohoto důvodu se vyhlašují hluková pásma v okolí letiště, kde v zóně nejbližší letišti, by neměla probíhat žádná výstavba určená pro bydlení. Jedním z nástrojů k řešení hluku jsou hlukové poplatky. Tyto poplatky jsou rozděleny do pěti kategorií a platí je každé letadlo s MTOW vyšší než 9 tun. Finanční prostředky získané z hlukových poplatků jsou určeny k financování protihlukových opatření v okolí letiště či na monitoring hluku. Mezi další řešení redukující hluk patří provozní opatření a omezení. Jedná se o rozdělení provozu na letišti tak, aby letadla nelétala přes hustě osídlené oblasti. Dále sem patří protihlukové postupy pro přílety a odlety, pravidla omezující použití reverzního tahu motorů při brzdění letadel, pravidla pro realizaci motorových zkoušek nebo pravidla pro využívání záložního zdroje. [1]

### **2.3 Předpoklady pro maximální kapacitu**

Pro maximální kapacitu se předpokládají nulové a pouze minimální přejezdy letadel přes aktivní dráhu pro zamezení vzniku ztráty kapacity dráhového systému. Tzn., že zařízení pro odbavování letadel bude pouze ve vzácných případech umístěno za dráhovým systémem. Dalším předpokladem je vybavení RWY zařízením pro přesné přístrojové přiblížení a zajištění dané RWY pojezdovým radarem. Samozřejmostí je dostatečně vyškolený ATC personál, který má k dispozici plně automatizované radarové zařízení. Kapacita vzdušného prostoru by neměla omezovat kapacitu letiště a v TMA by se mělo vyskytovat pouze jedno dopravní letiště s mezinárodním provozem, které je schopné odbavit letadla všech kategorií. [2]

V budoucnu se předpokládá snížení přistávacích intervalů díky vyspělejšími technologiím, a také se očekává eliminace vlivu turbulence v úplavu za pomoci různých konstrukčních úprav letadel. [2]

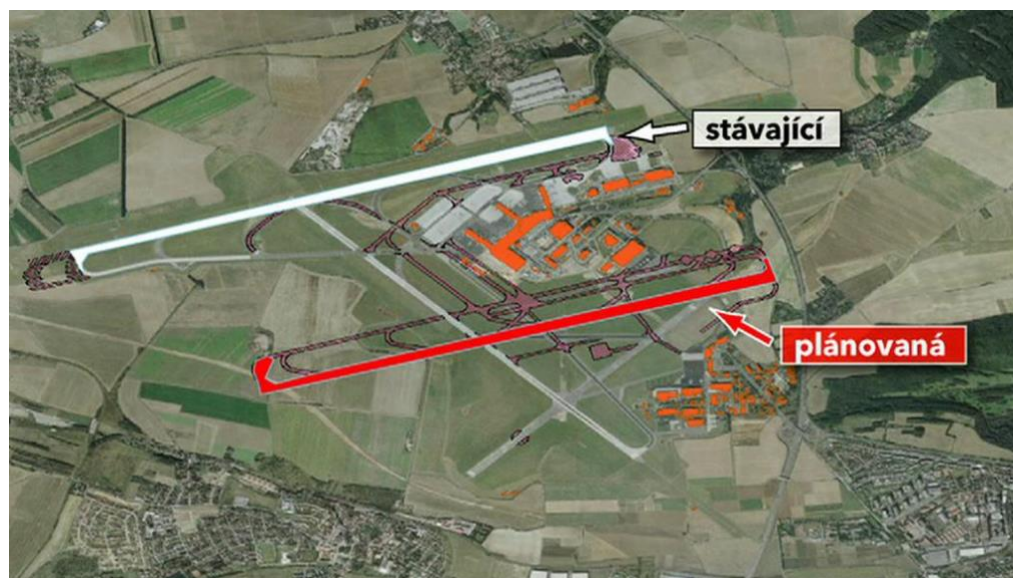


### 3. Paralelní dráha 06R/24L

Za nejslabší článek Letiště Václava Havla v Praze, které odbavuje cca 93 % všech cestujících v České republice, je považována kapacita dráhového systému. Počet odbavených cestujících i letů na letišti v Ruzyni rapidně roste již od devadesátých let. V roce 2006 došlo k navýšení terminálové kapacity pro odbavení cestujících v dlouhodobém horizontu, kdy byl otevřen nový Terminál 2. Naopak dráhový systém se i přes rychlý růst objemu cestujících a provozu od 60. let téměř nezměnil. Důsledkem toho je nedostačující kapacita dráhového systému letiště převážně v období provozních špiček, která je hlavní překážkou v dalším rozvoji letecké dopravy na LKPR. Jelikož se očekává, že počet odbavených cestujících a letadel poroste, problém nedostačující kapacity lze vyřešit pouze stavbou nové paralelní dráhy. S touto výstavbou se počítalo v územně plánovací dokumentaci hlavního města Prahy již při stavbě současné hlavní dráhy RWY 06/24 (dříve RWY 07/24) v sedmdesátých letech minulého století. [1]

Vybavení dráhy musí splňovat nejpřísnější kritéria na bezpečnost a plynulost provozu. Z hlediska režimu provozu se na paralelním dráhovém systému bude provozovat po dokončení dráhy segregovaný provoz, tedy použití jedné dráhy výhradně pro přílety a druhé pouze pro odlety.

Stavba zasahuje do katastrálních území: Ruzyně, Liboc, Přední Kopanina, Nebušice, Hostivice a Litovice. Investorem stavby je Letiště Praha s. p. [6]



Obrázek 6: Plánovaný paralelní dráhový systém na LKPR [7]

### 3.1 Výhody paralelní dráhy

Jak již bylo řečeno, plán výstavby paralelní dráhy 06R/24L se datuje až do 60. let minulého století, avšak do současné doby nebyla stále zahájena její výstavba. Nová dráha bude mít pozitivní dopad především na tisíce obyvatel Prahy a Kladenska, které v současné době obtěžuje hluk letadel z vedlejší dráhy 12/30. Tato dráha bude po výstavbě nové paralelní dráhy uzavřena. Další výhodou dvou souběžných drah je daleko efektivnější a bezpečnější provoz, který je i šetrnější k životnímu prostředí, protože letadla už nebudou muset čekat v období provozních špiček ve vzduchu na uvolnění přistávací dráhy. Zvýší se potřebná dráhová kapacita, díky které je letiště schopné uspokojit rostoucí poptávku cestujících po letecké dopravě nejméně na několik příštích desetiletí a sníží se zátěž řídicích letového provozu. [1]

Letiště Václava Havla je jedním z nejdůležitějších zaměstnavatelů v regionu Prahy a výstavba nové dráhy tak podpoří vznik nových pracovních míst jak na letišti, tak i v jeho okolí. Nezanedbatelný je také přínos letiště pro cestovní ruch. Podle odhadů ekonomů by toto odvětví mělo dále růst a podílet se na zvyšování HDP České republiky i příspěvků do veřejných rozpočtů, a to z toho důvodu, že je letiště důležitým dopravním uzlem a má pozitivní dopad na příliv zahraničních investic a příjmů z cestovního ruchu. [1]

### 3.2 Umístění paralelní dráhy

Nová dráha bude umístěna přibližně na místě současné dráhy 04/22, která je dlouhodobě mimo provoz a slouží pouze k parkování letadel. Dráha bude rovnoběžná se stávající hlavní dráhou RWY 06L/24R ve vzdálenosti 1525 m, aby bylo možné provozovat nezávislý provoz na obou drahách současně. Dráha 12/30, která nyní slouží jako vedlejší dráha, bude uzavřena a bude začleněna do systému pojezdových drah. [6]

Prah dráhy 24L je umístěn v závislosti na situování mimoúrovňové křižovatky Ruzyně silničního okruhu, a proto je navrženo trvalé posunutí prahu 24L o 150 m. Umístění této MÚK je v souladu s územním plánem hlavního města Prahy v ploše pro veřejné prospěšné stavby, proto se tato situace nedá jinak vyřešit. Prah dráhy 06R je ovlivněn obytnou zástavbou města Hostivice a obcí Jeneč. Zkrácení dráhy na 3400 m týkající se vzletu ve směru 06R a přistání ve směru 24L nemá žádný vliv na využitelnost dráhy a je provozně akceptovatelné. Jsou dodrženy všechny předepsané viditelnosti překážek na dráze a viditelnost koncové přičky. Dojezdová dráha je na východním konci navržena ve stoupání, aby se přibližovací překážková plocha a vzletová překážková plocha dostala co nejvýše nad křižovatku na silničním okruhu. [6]

### 3.3 Technické parametry paralelní dráhy

Základní parametry dráhy musí splňovat požadavky provozovatele letiště a leteckých předpisů. Umístění a délka dráhy jsou ovlivněny současnou a plánovanou zástavbou v okolí letiště. Délka dráhy je určena na základě složení typů letadel, která bude v budoucnu letiště obsluhovat a dle režimu provozu, který bude na letišti provozován. Jelikož je plánovaný segregovaný provoz, nová dráha bude využívána převážně pro přistání, pro vzlety pak bude sloužit stávající RWY 06L/24R. V noci bude paralelní dráha pro provoz uzavřena. [1]

Součástí výstavby nové dráhy 06R/24L včetně pojezdových drah pro spojení se severním a jižním odbavovacím areálem je i potřebné vybavení dráhy, zásobování energií, potřebné přeložky sítí a komunikací, řešení styku nové dráhy s plánovanými stavbami v okolí letiště a rovněž i potřebný rozvoj odbavovacích a parkovacích kapacit v severním odbavovacím areálu. [6]

délka dráhy: stavební 3550 m, práh dráhy (THR) 24L trvale posunut o 150 m

šířka dráhy: 45 m (s nejvyšší únosností)

60 m (základní)

75 m (vč. postranních pásů)

pás dráhy: délka - 3 670 m - přesah 60 m za konec dráhy (resp. dojezdové dráhy)

šířka - 300 m

předpolí: 150 x 240 m pro oba směry (předpolí začíná u THR)

u THR 06R je součástí KBP

u THR 24L je jeho součástí dojezdová dráha

osová vzdálenost od stávající RWY 06/24: 1525 m

koncová bezpečnostní plocha (KBP) za konci obou směru RWY: délka - u THR 06R: 325 m

délka - u THR 24L: 240 m

šířka - 300 m

únosnost dráhy: odpovídající ACN letadel, která mohou využívat dráhu výše uvedených parametrů

příčný sklon dráhy: střežovitý

povrch: konstrukce vozovky se v místech extrémního namáhání (u THR) předpokládá s cementobetonovým povrchem, ve střední části se živičným povrchem. Ochranná vrstva bude tvořena štěrkokopískem, podkladní vrstvy štěrkokodrtí a cementovou stabilizací, kryt bude cementobetonový nebo asfaltobetonový. Celková tloušťka konstrukce bude přibližně jeden metr. [1]

### 3.4 Kapacitní parametry dráhy

Celkový počet přepravených cestujících za rok:	21,2 mil.
Celkový počet pohybů letadel za rok:	274 500
- z toho celkový počet pohybů v noční době (22:00 – 06:00) za rok:	13 700
Počet pohybů letadel za 6 měsíců v letním období (květen – říjen):	150 960
- z toho počet pohybů ve dne za 6 měsíců v letním období:	143 600
- počet pohybů v noci za 6 měsíců v letním období:	7 360

#### Kapacita pro charakteristický letový den

Počet pohybů v charakteristickém letovém dni (za 24 hodin):	820
- z toho počet pohybů v denní době (06:00 – 22:00):	780
- z toho počet pohybů v noční době (22:00 – 06:00):	40

Uvažované kapacity se v rámci procesu EIA považují za maximální a vyplývají:

- z respektování navrženého stavebního řešení paralelní dráhy včetně navrhovaných nájezdů a výjezdů na paralelní dráhu
- z respektování stávajících platných standardů a doporučení Mezinárodní organizace pro civilní letectví, vydané na základě čl. 37 Úmluvy o mezinárodním civilním letectví ve znění přijatém Českou republikou a Společných leteckých předpisů (Joint Aviation Regulations - JAR) vydané Sdruženými leteckými úřady podle předpisů Evropských společenství ve znění přijatém Českou republikou
- z upravené prognózy letiště Praha/Ruzyně do roku 2020 [6]

### 3.5 Pojezdové dráhy TWY

#### Základní technické parametry:

šířka: 25 m (v přímém úseku)  
44 m (vč. postranních pásů)

max. podélný sklon: 1,25 %

max. příčný sklon: 1,5 %

Rozšíření v obloucích je navrženo na průjezd letadla typu Boeing 747, 777 a Airbus 340-600. Základní šířka drah je prozatím zvolena pouze pro letadla k.p. E, jelikož provoz letadel k.p. F bude zpočátku minimální. Dodatečné rozšíření je vždy možné provést ve zvolených trasách

podle provozních potřeb letišť. Konstrukce vozovek se předpokládá živičná, únosnost stejná jako u RWY. [8]

### **3.6 Výjezdy z RWY**

Výjezdy jsou navrženy jako pojezdové dráhy pro rychlé odbočení, tzv. rychloodbočky. Jediné výjezdy, které nejsou navrženy pro rychlé odbočení jsou výjezdy na obou koncích dráhy. První výjezdy jsou umístěny směrem k severnímu odbavovacímu areálu, a jsou tak situovány s ohledem na to, aby plynule navazovaly na další pojezdové dráhy směrem k odbavovací ploše SEVER. Druhý a třetí výjezd je optimalizován pro střední a těžká proudová letadla. Výjezdy jsou navrženy v následujících vzdálenostech od prahů (tečný bod oblouk výjezdu). [8]

směr 24L: 1382 m, 1900 m a 2500 m ( TWY K1-K3)

směr 06R: 1480 m, 1900 m a 2500 m ( TWY K4-K6)

Výjezdy k odbavovací ploše JIH nejsou navrženy jako pojezdové dráhy pro rychlé odbočení a jsou umístěny v následujících vzdálenostech.

směr 24L: 770 m (TWY P), 1325 m (TWY L); je možné odbočení na RWY 13 ve vzdálenosti 1755 m

směr 06R: 1460 m (na RWY 13), 1920 m (TWY L), 2430 m (TWY P)

### **3.7 Nájezdy na RWY**

Nájezdy na dráhu jsou umístěny po třech a jsou na obou koncích dráhy (ve směru od odbavovací plochy SEVER). Nájezdy jsou navrženy jako provozně nezávislé TWY pro flexibilnější řazení letadel na odletu. Dva nájezdy jsou umístěny vždy na začátku dráhy, třetí (určen pro malá letadla) je posunut o cca 500 m a používá se v případě, že letoun nevyžaduje plnou délku dráhy pro vzlet (tzv. intersection take-off). Každý nájezd je řešen s dvěma vyčkávacími plochami pro případné zdržení nebo předjetí letadel. Jedno vyčkávací místo je ve vzdálenosti 90 m od osy RWY 06R/24L pro běžný provoz (CAT I), druhé ve vzdálenosti 150 m od osy pro provoz za nízkých dohledností (CAT II/III). [8]

Nájezdy letadel na dráhu z odbavovacího prostoru JIH budou možné pouze z TWY P (v místě 480 m za THR RWY 24L) a to pouze pro letadla k.p. C. Větší letadla pro směr 24L a všechna

letadla pro směr 06R budou muset využívat nájezdy od odbavovacího prostoru SEVER, tzn., že budou muset nejdříve překřížit vlastní dráhu. [6]

Povrch vozovek se předpokládá živičný, v místech vyčkávacích ploch u obou prahů pak tuhý (cementobetonová deska).

### **3.8 Vybavení provozních ploch**

Oba směry dráhy 06R/24L budou vybaveny světelnou soustavou pro přesné přiblížení CAT III doplněnou o sestupovou soustavu PAPI. Pro CAT IIIB musí být dráhová dohlednost 50 m bez udání výšky rozhodnutí (plně automatické přistání). To znamená, že je možné přiblížení a přistání letadel i za nepříznivých meteorologických podmínek, respektive i za nulové viditelnosti bez manuálních zásahů posádky. Paralelní dráha je navržena tak, aby vyhovovala všem typům letadel, a to včetně těch největších, jako jsou Airbus A380 nebo Boeing B747.

Jako jedno z mála letišť v Evropě bude LKPR vybaveno systémem RWSL, který slouží ke zvýšení bezpečnosti a plynulosti na provozních plochách letiště a zabraňuje incidentům souvisejícím s nepovoleným vjezdem/přejezdem na dráhu. [6]

#### Vizuální navigační zařízení

- denní značení a značky
- světelné zabezpečovací zařízení (světelná návěstidla a prosvětlené znaky)

#### Radionavigační zařízení

- přesné přibližovací majáky systému ILS (Glide Path a Localizer)
- měřiče vzdálenosti DME (spojeno s ILS)
- přemístění všesměrového majáku VOR

#### Meteorologické zařízení

- 3x transmissometr (měření dráhové dohlednosti) - v každé třetině dráhy
- 3x měřič rychlosti a směru větru - v každé třetině dráhy
- 2x ceilometr (měření výšky oblačnosti) - cca 900 m před THR
- 2x měřiče stavu povrchu RWY - sondy zabudovány v dráze
- další vhodná zařízení (měřič bouřkové aktivity, měřič profilu větru, měřič stříhu větru) dle skutečných potřeb [6]

### 3.9 Plánovaný provoz s paralelní dráhou

Již výše je zmíněn maximální možný počet pohybů letadel v charakteristickém letovém dni:

- počet pohybů v charakteristickém letovém dni (za 24 hodin): 820
- z toho počet pohybů v denní době (06:00 – 22:00): 780
- počet pohybů v noční době (22:00 – 06:00): 40

LKPR bude nadále provozováno jako plně koordinované letiště, kde maximální možný počet plánovaných pohybů v době 22:00 - 23:59 a v době 5:30 - 5:59 pro jednu konkrétní noční dobu je vymezen na max. 40. To znamená, že budou potvrzeny sloty pro max. 40 pohybů (startů a přistání), které musí být rozloženy do výše uvedených dvou částí noční doby. [6]

V noční době od 24:00 do 05:29 bude zcela zastaven letecký provoz, kdy poslední koordinace bude na 23:30 a doba mezi 23:30 až 23:59 bude vyhrazena pouze pro zpožděné přílety nebo odlety.

V rámci denního provozu bude uplatňována následující preference drah pro vzlety a přistání:

- RWY 06L/24R bude v denní době primárně používána pro vzlety
- RWY 06R/24L bude v denní době primárně používána pro přistání (s výjimkou uzavření RWY 06L/24R nebo v případech jiných nezbytných situací)
- RWY 13/31 nebude v denní době za standardního provozu pro vzlety a přistání vůbec používána
- vzlety a přistání z/na RWY 13/31 v denní době se budou provádět pouze v těchto případech:
  - kdy je RWY 06L/24R uzavřena pro vzlety a přistání
  - kdy je RWY 06R/24L uzavřena pro vzlety a přistání
  - pokud to bude nutné z důvodu bezpečného provedení letu [6]

Pro omezení hluku z nočního provozu budou uplatňována následující opatření:

- RWY 13/31 a RWY 06R/24L budou uzavřeny pro noční provoz s výjimkou následujících případů:
  - vzlet nebo přistání z/na RWY 06R/24L bude možné pouze v případě, že RWY 06L/24R je uzavřena pro vzlety a přistání
  - vzlet nebo přistání z/na RWY 13/31 bude možné pouze v případě, že obě RWY 06RLR/24LR jsou uzavřeny pro vzlety a přistání, nebo pokud to bude nutné z důvodu bezpečného provedení letu

- do nočního provozu letiště Václava Havla Praha budou přípouštěna pouze letadla o MTOW do 100 t, vyhovující hlukové kategorii letiště Praha Ruzyně 1 a 2, respektive letadla o MTOW nad 100 t vyhovující hlukové kategorii letiště Praha Ruzyně 1
- letecký provoz v noční době bude plánován tak, aby nedošlo k překročení zavedené hlukové kvóty [6]



## **4. Metody pro výpočet kapacit dráhového systému**

Kromě pochopení definic a komplexních vztahů určujících kapacitu, je nezbytností mít také výpočetní nástroje, které poskytují odhady kapacit dráhových systémů za jakýchkoli stanovených podmínek. V průběhu let bylo vytvořeno několik matematických a simulačních metod, které to umožňují. Tato kapitola se zabývá jak jednoduššími matematickými modely určenými pouze pro výpočet kapacity jedné RWY, tak i složitějšími počítačovými modely a simulacemi, které se používají pro výpočet kapacit u dráhového systému několika drah. [4]

### **4.1 Matematické metody**

Pro stanovení kapacity dráhového systému bylo vytvořeno několik matematických metod. V této práci je do detailu rozebrána metoda Alfreda Blumsteina, jak teoreticky, tak i za pomoci zhotoveného programu v Matlabu pro výpočet dráhové kapacity jedné RWY.

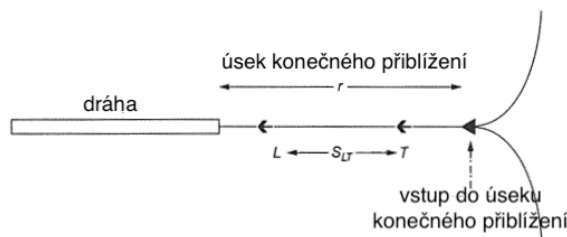
#### **4.1.1 Metoda Alfreda Blumsteina (single RWY)**

Tento matematický model navzdory mnoha zjednodušujícím předpokladům nabízí pohled na fyzikální proces řídící kapacitu dráhy, a rovněž poskytuje dobré aproximace kapacit pozorovaných v praxi. Také je zvláště vhodný pro analýzu citlivosti, při které se zkoumá, jakými faktory a v jakém množství je kapacita ovlivňována. Model ilustruje koncepční přístup, který používají prakticky všechny počítačové matematické modely, které jsou nyní široce používány pro výpočet kapacity a zpoždění. [4]

Tento jednoduchý matematický model stanovil Alfred Blumstein v roce 1959. Model odhaduje kapacitu dráhového systému s jednou RWY používanou výhradně pro přílety. Stejný postup lze však snadno aplikovat i na dráhy používané výhradně pro odlety nebo na dráhy se smíšeným provozem. [4]

##### **4.1.1.1 Postup pro výpočet kapacity dráhy – přílety**

Na obrázku níže je zobrazeno schéma jedné dráhy používané pouze pro přistání. Letadlo sestupuje v pomyslném směru na konečné přiblížení, dále dosedá na dráhu, kde zpomaluje a míří k výjezdu na systém pojezdových drah.



Obrázek 7: Nákres situace konečného přiblížení na přistání [4]

Letové cesty přilétávajících letadel se střetávají v bodě, který je označen jako „vstup do úseku konečného přiblížení“ a typicky se nachází 5 až 8 NM od prahu dráhy. Po celou dobu úseku konečného přiblížení musí být dodrženy bezpečné podélné rozstupy, které jsou v souladu s požadavky ATM. Dále se musí počítat s obsazeností RWY, aby každé letadlo bezpečně opustilo dráhu před přistáním dalšího letadla. Tato bezpečnostní pravidla stanovují limity pro maximální přepravní kapacitu. [4]

Uvažujme případ, kdy přistávající letadlo typu  $i$  je bezprostředně následované letadlem typu  $j$ . Minimální požadovaný rozstup mezi oběma letadly je označen  $s_{ij}$ . Tyto rozstupy jsou uvedeny v následující tabulce. Jelikož byl tento model vynalezen v době před reorganizací minimálních rozstupů, používá se zde původní rozdělení letadel do skupin Heavy, Medium a Light.

**Tabulka 5: Minimální podélné rozstupy mezi dvěma letadly v konečné části přiblížení (v NM) [4]**

Přistávající letadlo	Následující letadlo		
	H	M	L
H	4	5	6
M	3	3	5
L	3	3	3

Cílem je spočítat minimální možný časový interval mezi po sobě jdoucími letadly, to znamená minimální časový odstup mezi příletem obou letadel, kterého lze dosáhnout bez narušení ATM rozstupů. Tento minimální časový interval mezi dvěma letadly, značený  $T_{ij}$ , lze spočítat následovně:

$$T_{ij} = \max \left[ \frac{r + s_{ij}}{v_j} - \frac{r}{v_i}, o_i \right] \text{ kde } v_i > v_j \quad (3.1)$$

$$T_{ij} = \max \left[ \frac{s_{ij}}{v_j}, o_i \right] \text{ kde } v_i \leq v_j \quad (3.2)$$

Kde jsou parametry definovány takto:

$r$  = délka fáze konečného přiblížení na přistání

$o_i$  = doba obsazení dráhy letadlem (od momentu dosednutí letadla na dráhu po okamžik jeho opuštění)

$v_i$  = rychlost prvního letadla ve fázi konečného přiblížení

$v_j$  = rychlost druhého letadla ve fázi konečného přiblížení

$s_{ij}$  = minimální podélný rozstup mezi letadly

$T_{ij}$  = minimální časový interval mezi přiletem dvou letadel

V případě  $v_i > v_j$  se vzdálenost mezi oběma letadly neustále zvyšuje, jelikož rychlost prvního letadla je vyšší než letadla následujícího. Proto je za dodržení minimálních rozstupů vzdálenost od dráhy rovna  $r + s_{ij}$  a časový rozdíl mezi oběma letadly při dosednutí na dráhu je roven

$$\frac{r+s_{ij}}{v_j} - \frac{r}{v_i}$$

Časový interval musí být taktéž dlouhý minimálně po dobu  $o_i$ , aby byl zajištěn dostatek času letadla pro opuštění dráhy, a tím došlo k uvolnění místa pro následující letadlo. Proto je minimální časový interval mezi přiletem dvou letadel roven té větší proměnné (maximum).

Předpokládejme, že pravděpodobnost situace, kdy je přistávající letadlo  $i$  následováno letadlem  $j$ , je dána hodnotou  $p_{ij}$ , pak je doba přistání mezi dvěma letadly dána vztahem:

$$E[T_{ij}] = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_{ij} \cdot T_{ij} \quad (3.3)$$

Kde  $E[T_{ij}]$  označuje očekávanou (nebo průměrnou) hodnotu  $T_{ij}$  a  $k$  udává počet tříd letadel, které FAA vytvořila za účelem stanovení separací, které jsou požadovány při konečném přiblížení: Heavy (H), Medium (M), Light (L). Vzhledem k tomu, že různé typy letadel třídy L mají odlišné rychlosti na přiblížení, je tato třída dělena ještě na podtřídu L1 a L2. Třídy H, M, L1 a L2 se označují indexy 1 až 4. [4]

Pravděpodobnost  $p_{ij}$  je dána vztahem:

$$p_{ij} = p_i \cdot p_j, \quad (3.4)$$

Kde pravděpodobnost, že přistávající letadlo bude typu  $i$ , je rovna  $p_i$  a pravděpodobnost, že následující letadlo bude typu  $j$ , je rovna pravděpodobnosti  $p_j$ .

V praxi je nesmírně obtížné dosáhnout dokonalé přesnosti ve vzdálenostech mezi letadly. Předpokládá se, že skutečné vzdálenosti a s tím spojené časové intervaly budou vyšší, jelikož zde hraje klíčovou roli lidský faktor. Ve skutečnosti se musí započítat vliv reakcí pilotů, povětrnostní podmínky nebo schopnosti řídicích letového provozu. Všechny tyto vlivy pak při výpočtech vyjadřuje konstanta  $b$ , která přidává extra čas pro výše zmíněné situace. Skutečný čas potom tedy je:

$$t_{ij} = T_{ij} + b \quad (3.5)$$

Vypočítaná hodnota  $t_{ij}$  udává průměrný časový interval mezi postupným přistáváním na RWY. Rovnice 3.3 bude tedy upravena následovně:

$$E[t_{ij}] = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_{ij} \cdot t_{ij} \quad (3.6)$$

Nakonec, pokud je spočítán průměrný časový interval mezi postupným přistáváním, maximální provozní kapacita (počet přistání za hodinu) je dána vztahem:

$$\mu = \frac{1}{E[t_{ij}]} \quad (3.7)$$

Kde,  $E[t_{ij}]$  je měřeno v hodinách. [4]

#### 4.1.1.2 Postup pro výpočet kapacit dráhy – odlety

Model, který byl použit v předcházející kapitole pro výpočet kapacity dráhy pro přílety, lze po menších úpravách použít také pro výpočet odletové kapacity.

Uvažujme stejnou dráhu jako v příkladu s přílety, s tím rozdílem, že se z dráhy momentálně provádí pouze odlety. To znamená, že se předpokládá situace, kdy je odlétávající letadlo typu  $i$  bezprostředně následováno letadlem typu  $j$ . Minimální požadovaný rozstup mezi oběma letadly je opět označen  $s_{ij}$ . Tyto rozstupy jsou dány časovým intervalem, viz tabulka 6. Hodnoty jsou uvedeny v sekundách. Jelikož byl tento model vynalezen v době před rekatégorizací minimálních rozstupů, používá se zde původní rozdělení letadel do skupin Heavy, Medium a Light. [4]

**Tabulka 6: Minimální rozstupy mezi dvěma následujícími odlety (v sekundách) [4]**

Předcházející letadlo	Následující letadlo		
	H	M	L
H	90 s	120 s	120 s
M	60 s	60 s	60 s
L	45 s	45 s	45 s

V případě odletu se předpokládá, že se průměrný časový interval mezi začátkem vzletu letadla typu  $i$  a letadla typu  $j$  rovná minimálnímu požadovanému rozstupu mezi těmito letadly. Tudiž se v tomto případě  $s_{ij} = t_{ij}$  pro všechny dvojice letadel.

Opět je dané stejné složení letadel jako u příletů a to znamená, že se musí spočítat pravděpodobnost situace, kdy je odlétávající letadlo  $i$  následováno letadlem  $j$ . Tato pravděpodobnost se značí  $p_{ij}$  a je dána vztahem:

$$p_{ij} = p_i \cdot p_j, \quad (3.8)$$

Kde pravděpodobnost, že odlétávající letadlo bude typu  $i$ , je jednoduše rovna  $p_i$  a pravděpodobnost, že následující letadlo bude typu  $j$ , je rovna pravděpodobnosti  $p_j$ .

Po spočtení jednotlivých pravděpodobností se dosadí do následujícího vzorce pro výpočet doby mezi dvěma následnými odlety:

$$E[t_{ij}] = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_{ij} \cdot t_{ij} \quad (3.9)$$

Kde, jak už bylo řečeno výše, je  $s_{ij} = t_{ij}$ , a proto se místo  $t_{ij}$  dosazují do vzorce hodnoty  $s_{ij}$ .

Po výpočtu průměrného časového intervalu mezi odlety se spočte maximální provozní kapacita (počet odletů za hodinu) podle vztahu:

$$\mu = \frac{1}{E[t_{ij}]} \quad (3.10)$$

Kde,  $E[t_{ij}]$  je měřeno v hodinách. [4]

#### 4.1.1.3 Postup pro výpočet kapacity dráhy – smíšený provoz

Stejný matematický model může být použit i pro odhad kapacity dráhy, na které je provozován smíšený provoz. V tomto případě je důležité znát strategii, kterou používají řídicí letového provozu pro řízení přistání a vzletů na jedné dráze. Nejčastěji je provoz řízen tak, že se střídají sekvence např. 5 - 10 příletů v řadě s např. 5 - 10 následnými odlety.

Dráhová kapacita se spočítá jako průměr z  $\mu_a$ , což je kapacita dráhy používané pouze pro přílety, a z  $\mu_d$ , kapacity dráhy používané pouze pro odlety. [4]

## 4.2 Příručka vydaná FAA – Capacity Handbook Approach

Další možností, jak určit kapacitu dráhy, je využití obsáhlé příručky vydané pro FAA pro účely plánování letišť. Příručka obsahuje postupy pro stanovení letištní kapacity a určení zpoždění letadel. Obsahuje 62 diagramů a tabulek pro odhad hodinových letištních kapacit. Vychází ze znalosti těchto proměnných: [9]

- složení letadel
- využití RWY pro odlety a přílety
- operace „touch and go“
- rozdílné konfigurace výjezdů z RWY
- podmínky prostředí (IFR, VFR)
- způsob konfigurace RWY a její využití

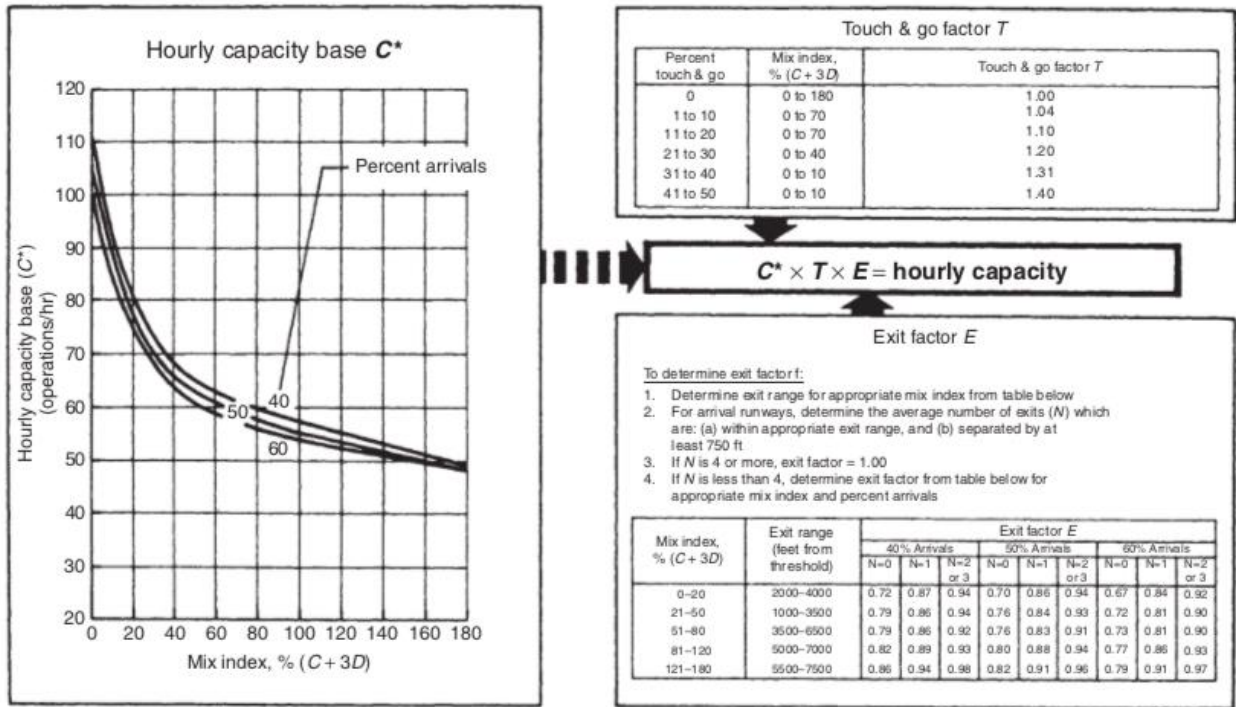
Příručka rozděluje letadla do čtyř tříd:

- třída A – malá jednomotorová letadla, 6 250 kg a méně
- třída B – malá dvumotorová letadla, 6 250 kg a méně
- třída C – středně velká letadla, 6 250 kg až 150 000 kg

- třída D – velká letadla, 150 000 kg a více

Kapacita dráhy se v tomto případě počítá pomocí diagramů, které využívají tzv. mix indexu  $MI$ . Tento mix index je určen z procentuálního zastoupení letadel třídy C a D. [9]

$$\text{Mix index} = (\% \text{ letadel třídy C}) + 3 \times (\% \text{ letadel třídy D})$$



Obrázek 8: Diagram pro určení hodinové kapacity jedné RWY za VFR podmíněk [9]

Prostřednictvím diagramu na obrázku číslo 8 lze určit pomocí znalosti mix indexu a procenta přiletů předpokládanou hodinovou kapacitu. Základní hodnota hodinové kapacity  $C^*$  lze vyčíst z diagramu. K této hodnotě se poté započítá „touch and go“ faktor  $T$  a vliv umístění výjezdů z dráhy, který je vyjádřen pomocí faktoru  $E$ . Výsledná hodinová kapacita se získá vynásobením následujících proměnných

$$\text{hodinová kapacita} = C^* \cdot T \cdot E \quad (3.11)$$

FAA zveřejnila další metody odhadující hodinové i roční kapacity letiště při různých konfiguracích drah. Tyto odhady jsou vhodné pouze pro předběžné analýzy kapacity. Kromě uspořádání dráhového systému jsou zohledněny i rozdíly způsobené povětrnostními

vlivy (podmínky VFR a IFR) a složením letadel. Opět se vychází ze znalosti mix indexu  $MI$ , pomocí kterého lze určit odhadovanou kapacitu. [9]

Kapacity na následujícím obrázku jsou dány na základě těchto podmínek:

- dostatečný vzdušný prostor pro všechny potřeby letadel
- radarové pokrytí s minimálně jednou přistávací dráhou vybavenou ILS
- dostatečné množství pojezdových drah pro urychlení provozu na dráze a mimo ni

Configuration	Runway configuration diagram	Mix index — percent (C + 3D)	Hourly capacity (operations per hour)		Annual service volume (operation per year)
			VFR	IFR	
A Single Runway		0–20	98	59	230,000
		21–50	74	57	195,000
		51–80	63	56	205,000
		81–120	55	53	210,000
		121–180	51	50	240,000
B Dual Lane Runways		0–20	197	59	355,000
		21–50	145	57	275,000
		51–80	121	56	260,000
		81–120	105	59	285,000
		121–180	94	60	340,000
C Independent IFR Parallels		0–20	197	119	370,000
		21–50	149	114	320,000
		51–80	126	111	305,000
		81–120	111	105	315,000
		121–180	103	99	370,000
D Parallels plus Crosswind Runway		0–20	197	62	355,000
		21–50	149	63	285,000
		51–80	126	65	275,000
		81–120	111	70	300,000
		121–180	103	75	365,000
E Four Parallels		0–20	394	119	715,000
		21–50	290	114	550,000
		51–80	242	111	515,000
		81–120	210	117	565,000
		121–180	189	120	675,000
F Open V Runways		0–20	150	59	270,000
		21–50	108	57	225,000
		51–80	85	56	220,000
		81–120	77	59	225,000
		121–180	73	60	265,000
G Parallels plus Crosswind Runway		0–20	295	59	385,000
		21–50	210	57	305,000
		51–80	164	56	275,000
		81–120	146	59	300,000
		121–180	129	60	355,000

Obrázek 9: Analýza kapacit dle konfigurace RWY [9]



### 4.3 Počítačové modely a simulace

Výše zmíněné diagramy a tabulky, které slouží v praxi pouze pro přibližný odhad kapacity letiště, nepočítají s časovou závislostí, a proto bývají mnohdy nepřesné. Z tohoto důvodu jsou pro přesnější určení kapacity vyvinuty speciální počítačové modely, které umožňují stanovit kapacitu v závislosti na provozních podmínkách.

V poslední době bylo vytvořeno mnoho takových modelů či počítačových simulací. Bohužel většina z nich potřebuje různé modernizace z důvodu neustálých provozních změn letišť. Také je velice těžké určit, které modely jsou ty nejpřesnější. Každý z nich používá rozdílnou úroveň podrobnosti, odlišnou metodologii, má různou flexibilitu a adaptibilitu. [3]

Modely se proto rozdělují do dvou skupin, a to na makroskopické a mikroskopické. Makroskopické modely se zaměřují na procesy, které souvisí s nasycením dráhového systému. Používají se převážně při výpočtech nákladů týkajících se zpoždění, a také při překročení stávající kapacity, kdy je potřeba řešit novou. Mezi tyto počítačové modely patří FAA Airfield Capacity Model, kterému je věnována větší pozornost v další kapitole, dále analytický model DELAYS, který se aplikuje při výpočtu zpoždění, a nebo také modely LMI (Logistic Management Institute) Runway Capacity Model a AND (The Approximate Network Delays). [11]

Mikroskopické modely se používají při provádění detailní analýzy přepravního toku a při provádění předběžného či koncového řešení. Mezi nejznámější model této skupiny patří model SIMMOD (Airport and Airspace Simulation Model). Ten se zabývá problémy týkající se zpoždění a efektivnosti provozu, ale také problematikou související s kapacitou letiště a vzdušného prostoru. Aplikuje se při plánování provozních parametrů letišť, při výpočtu kapacity vzdušného prostoru v oblasti letiště a při rozbořech služeb řízení letového provozu. [11]

Dalšími mikroskopickými modely, které jsou schopné provádět i trojrozměrné simulace, jsou TAAM (Total Airspace and Airport Modeler), RAMS (Reorganized ATC Mathematical Simulator) a HERMES (HEuristic Runway Movement Event Simulation). TAAM umožňuje i určení kapacity letištních terminálů, a také stanovení kapacity středisek pro třídění zavazadel. RAMS se aplikuje při analýze letových situací a HERMES se vyznačuje vysokou adaptibilitou na konkrétní podmínky. [11]

### 4.3.1 FAA Airfield Capacity Model

FAA Airfield Capacity Model je počítačový program, který slouží jako prototypový modelovací nástroj. Je schopný analyticky vypočítat maximální provozní kapacitu přistávací dráhy za určitých podmínek. Model je navržen tak, aby fungoval jako nástroj pro plánování menších letišť, kde se převážně setkáme pouze s jednou RWY, ale také složitějších letišť, kde je zaveden systém několika drah. [12]

Model se používá pro výpočet průměrné hodinové kapacity pro následující konfigurace drah:

- jedna RWY
- paralelní systém drah
- dvě protínající se dráhy

Každou dráhovou konfiguraci lze speciálně přizpůsobit prostřednictvím vybraných vstupních parametrů tak, aby přesně odpovídala podmínkám konkrétního letiště uživatele. Model spočte kapacity dráhy používané pouze pro přílety, pouze pro odlety a nebo kapacitu smíšeného provozu na dráze.

Při použití tohoto modelu pro odhad kapacity letiště je přehled kroků i s požadovanými vstupy následující:

- 1) Vybrat základní model
  - jedna RWY
  - paralelní systém drah
  - dvě protínající se dráhy
  - kombinace výše zmíněných konfigurací
- 2) Definovat podmínky na letišti
  - meteorologické podmínky (let za viditelnosti, let podle přístrojů)
  - RWY výjezdy a dostupnost pojezdových drah pro paralelní dráhu
  - přítomnost kontrolní věže
  - křížení drah a „touch and go“ operace
- 3) Definovat složení letadel
  - rozdělení letadel do tříd podle kategorie v úplavu (Small Single Engine, Heavy..)
  - průměrný čas obsazenosti dráhy při příletu pro dané třídy
  - průměrná přibližovací rychlost ve fázi konečného přiblížení pro dané třídy
- 4) Regulovat požadavky na rozstupy a provozní buffer (časová nebo vzdálenostní rezerva pro zajištění bezpečnosti, dále nazývána pro potřeby práce buffer)

- minimální rozstupy mezi přílety
- minimální rozstupy mezi odletem a příletem
- standardní odchylka aktuálních rozstupů mezi příletem a odletem
- ATC bezpečnostní buffer pro rozstupy mezi příletem a odletem [12]

Stanovení kapacity letiště je v zásadě založeno na průměrném časovém intervalu mezi přilétávajícím a/nebo odlétávajícím letadlem, což umožňuje, aby se za hodinu uskutečnil určitý počet příletů nebo odletů. Model simuluje interakce mezi třídami letadel v daném mixu letadel a řídí se všemi vstupy týkajícími se zachování minimálních rozstupů a dodržování pravidel letového provozu. Když dojde mezi jednotlivými přílety nebo odlety k dostatečnému odstupu, může být v tomto okamžiku uvolněn jeden nebo více odletů/příletů, což umožňuje simulovat skutečný smíšený provoz na letišti. Kapacitně nejvýhodnější je situace, kdy se počet příletů rovná počtu odletů. [12]

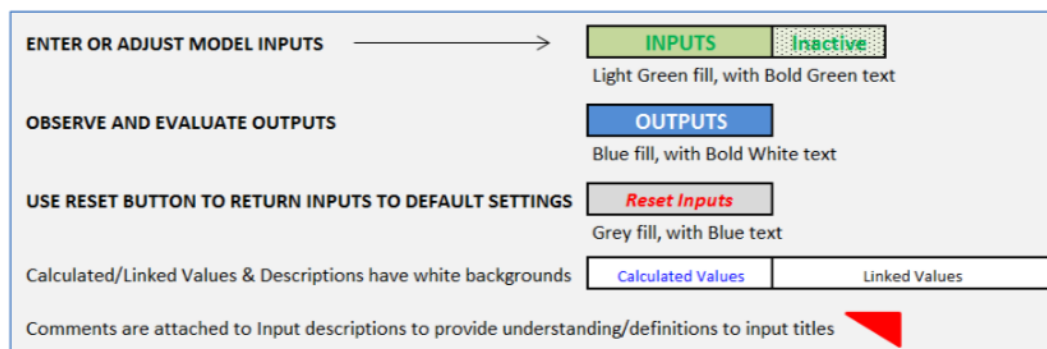
Pomocí modelu jsme schopni spočítat následující hodnoty:

- minimální rozstup mezi přílety
  - na základě: složení letadel, přibližovací rychlosti, minimálních rozstupů mezi konkrétními letouny, provozního bufferu
- kapacitu dráhy používanou pouze pro přílety
  - na základě: průměrných časových rozstupů mezi přílety
- minimální rozstup mezi odlety
  - na základě: složení letadel, minimálních rozstupů mezi konkrétními letouny, provozního bufferu
- kapacitu dráhy používanou pouze pro odlety
  - na základě: průměrných časových rozstupů mezi odlety
- minimální časový požadavek na zavedení odletů mezi dvojicí příletů
  - na základě: minimálních časů obsazenosti dráhy, minimálních rozstupů mezi přílety a odlety, přibližovací rychlosti
- prokládanou odletovou kapacitu
  - na základě: průměrných rozstupů mezi přílety, časových požadavků vloženého odletu [12]

FAA Airfield Capacity Model pracuje v Excelu na několika listech. Tyto listy obsahují dané konfigurace letišť, výpočetní listy a pomocné informace týkající se používání modelu a

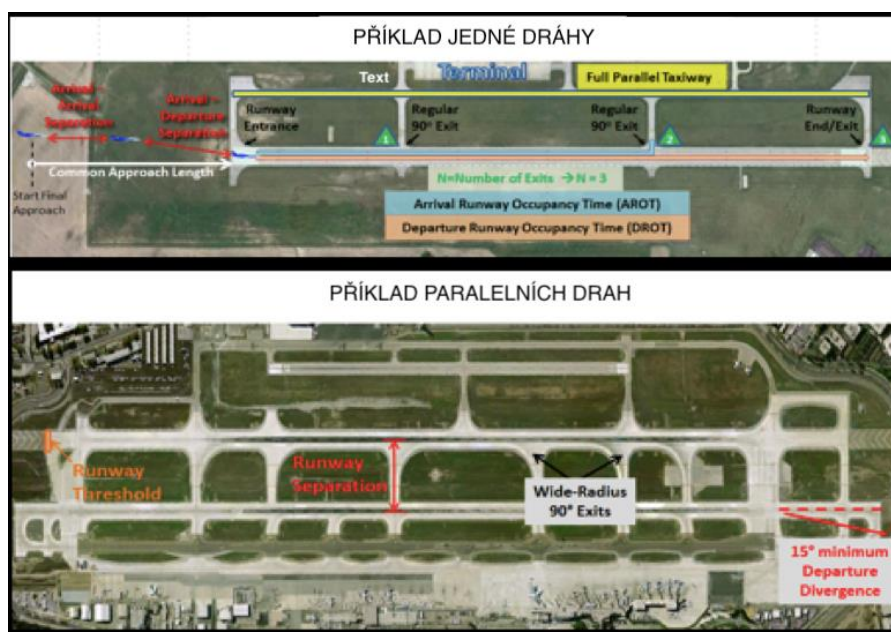
porozumění vstupů a jejich vlivu na výstup. Výstupem je hodinová kapacita letiště spočtená na základě daných vstupních údajů a vybraném modelu, které jsou pro každé letiště specifické.

Sešit obsahuje úvodní list s názvem „*INTRO*“, ve kterém nalezneme několik užitečných definic prospěšných při navigaci v modelu. Na tomto listu také nalezneme legendu nebo „klíč“ k obsahu buňky, která pomocí textových barev a výplní napomáhá identifikovat data v modelu, viz obrázek níže.




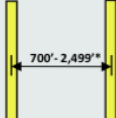
Obrázek 10: „*INTRO*“ list [12]

Dalším listem v sešitě je „*Runway Layouts*“ neboli dráhová konfigurace, kde jsou graficky zobrazeny některé termíny a konfigurace letišť, se kterými model pracuje. Tento list pomáhá uživateli lépe porozumět interakcím zahrnutým v modelu a celému procesu souvisejícímu s výpočty rozstupů mezi letadly, viz obrázek 11.



Obrázek 11: List dráhových konfigurací [12]

Třetím listem v sešitu je „Lookup Table“, tzv. vyhledávací tabulka. Tato tabulka pouze odhaduje přibližné kapacity založené na interakcích provedených s použitím výchozího nastavení a předpokladů, které jsou v souladu s podmínkami vyjádřenými ve FAA AC. V tabulce je pět typů dráhových konfigurací: jedna RWY, tři typy paralelních drah, které se liší vzdáleností os a křížující se dráhový systém. Dále zde nalezneme rozdělení letadel do kategorie podle úpravu a odhadovanou hodinovou a roční kapacitu letiště. Tyto kapacity se mění v závislosti na procentuálním složení letadel, jak je vidět na obrázku níže. [12]

Konfigurace drah	Třídy letadel (v procentech)							Hodinová kapacita pohyby/hod		Roční objem pohyby/rok
	A	B	C	C	C	C	D	VFR	IFR	
	S-S	S-T	S+	L-TP	L-J	L-757	H			
1.) Jedna RWY 	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	90	66	223 000
	25%	50%	25%	0%	0%	0%	0%	74	62	213 000
	5%	20%	20%	25%	25%	5%	0%	63	56	206 000
	0%	5%	10%	10%	65%	5%	5%	62	50	209 000
	0%	0%	5%	5%	55%	5%	30%	60	48	225 000
2.) Paralelní dráhy 	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	180	66	378 000
	25%	50%	25%	0%	0%	0%	0%	144	62	275 000
	5%	20%	20%	25%	25%	5%	0%	104	56	242 000
	0%	5%	10%	10%	65%	5%	5%	96	84	352 000
	0%	0%	5%	5%	55%	5%	30%	88	72	353 000

Obrázek 12: Část vyhledávací tabulky zobrazující jednotlivé konfigurace dráhy [12]

Na dalším listu „Fleet Mix“ se nachází tabulka s třídami letadel a příklady jednotlivých letadel, které do těchto tříd patří. Model rozděluje letadla do sedmi tříd: Small-S, Small-T, Small-+, Large - TP, Large - Jet, Large - 757, Heavy. Na základě těchto tříd jsou pak stanoveny rozstupy mezi letadly. Pro jednodušší klasifikaci jednotlivých letounů jsou u každé třídy zapsána všechna letadla, která do ní patří, viz tabulka 7.

Tabulka 7: Třídy letadel s jednotlivými příklady [12]

Klasifikační třída	Jednotlivé typy letadel
<b>Small - S</b> Popis: S - jednomotorové MTOW: < 12,500 lb	BE36 - Beech Bonanza 36
	C172 - Cessna Skyhawk 172/Cutlass
	C210 - Cessna 210 Centurion
	PA28 - Piper Cherokee
	PA38 - Piper Tomahawk PA38
	PA46 - Piper Malibu

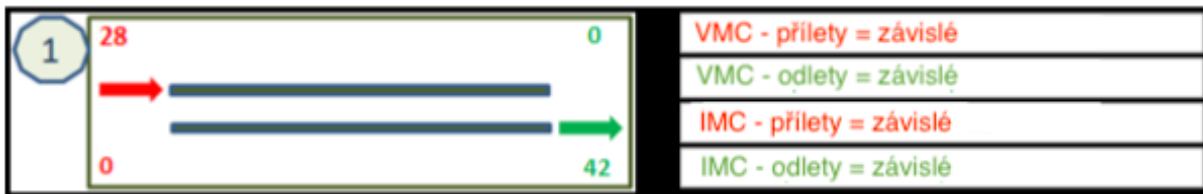
	PC12 - Pilatus PC-12
	TBM7 - Socata TBM-7
	SR20 - Cirrus SR-20
<b>Small - T</b> Popis: S - dvoumotorové MTOW: < 12,500 lb	BE19 - Beech 19 Sport
	BE20 - Beech 200 Super King
	BE30 - Raytheon 300 Super King Air
	BE55 - Beech Baron 55
	BE58 - Beech 58
	BE9L - Beech King Air 90
	C425 - Cessna 425 Corsair
	C441 - Cessna Conquest
	C500 - Cessna 500/Citation I
	DHC6 - DeHavilland Twin Otter
	PA44 - Piper Seminole
<b>Small - +</b> Popis: S – dvoumotorové MTOW: 12,500 - 41,000 lb	BE40 - Raytheon/Beech Beechjet 400/T-1
	C25A - Cessna Citation CJ2
	C560 - Cessna Citation V/Ultra/Encore
	C750 - Cessna Citation X
	CL30 - Bombardier (Canadair) Challenger 300
	EMB120-Brasilia
	FA50 - Dassault Falcon/Mystère 50
	GALX - IAI 1126 Galaxy/Gulfstream G200
	LJ35 - Bombardier Learjet 35
	LJ55 - Bombardier Learjet 55
	SBR1 - North American Rockwell Sabre 40/60
<b>Large - TP</b> Popis: L - turbovtulové MTOW: 41,000 - 255,000 lb	ATR 42
	ATR 72
	Dash 8 Q100/200 (váhová výjimka)
	Dash 8 Q300/400
	Saab 340 (váhová výjimka)
<b>Large - Jet</b> Popis: L- proudové MTOW: 41,000 - 255,000 lb	Airbus 318/319/320/321
	Boeing 737 Series
	DC-9 Series
	MD 80/82/83/88/89

	Gulfstream III/IV/V
	CRJ100/200
	CRJ700/900
	ERJ135/140/145
	EMB170/175/190/195
	CL60 - Bombardier Challenger 600/601/604
<b>Large - 757</b>	Boeing 757-200
Popis: L - Boeing 757 Series	
MTOW: 255,000 - 300,000 lb	Boeing 757-300
<b>Heavy</b>	Airbus 300/310
Popis: H - vícemotorové	Airbus 330/340/350
MTOW: > 300,000 lb	Airbus 380
	Boeing 747 Series
	Boeing 767/777
	Boeing 787
	DC-10/MD-11

Na dalších třech listech se nachází jednotlivé dráhové konfigurace pro odhad hodinové kapacity letiště - „*Single Model*“, „*Dual Model*“ a „*Intersecting Model*“. Jelikož je cílem této práce spočítat kapacitu paralelních drah na LKPR, bude dále rozebrán model pro výpočet těchto kapacit, tedy „*Dual Model*“.

#### 4.3.1.1 „*Dual Model*“ pro kapacitu paralelních drah

Oproti „*Single Model*“ umožňuje tento model uživateli volbu mezi osmi různými provozními scénáři. V každém scénáři se předpokládá, že jsou dráhy vůči sobě buď závislé nebo nezávislé. Titulek konfigurace obsahuje číslo scénáře a obsahuje rámeček, který zobrazuje přílety v červené barvě a odlety v zelené barvě, viz obrázek 13. Pravý sloupec označuje na základě povětrnostních podmínek a vzdálenosti os drah, zda jsou povoleny nezávislé souběžné přílety nebo nezávislé souběžné odlety. Tyto operace lze provádět pouze na nezávislých paralelních drahách. [12]



Obrázek 13: Titulek konfigurace dráhy v daném modelu se scénářem 1 [12]

V ukázce je zobrazen scénář 1, kdy je první dráha používána pouze pro přílety a na druhé dráze jsou prováděny pouze odlety. Tato konfigurace drah je závislá, jelikož jsou dráhy vůči sobě závislé, a proto nelze provádět nezávislé souběžné přílety či odlety. Výstupem této dráhové konfigurace je 28 příletů a 42 odletů v rámci daných vstupů.

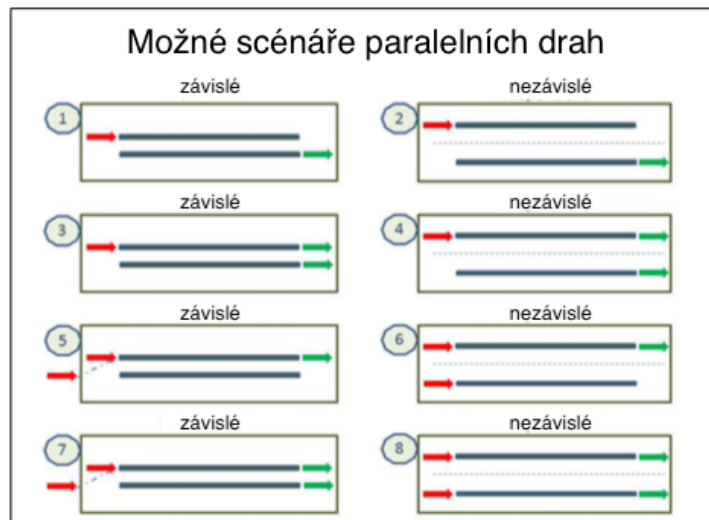
Následující tabulka uvádí seznam osových vzdáleností drah, které určují závislost mezi dvěma dráhami pro duální souběžné přílety nebo odlety. Z tabulky je zřejmé, že za podmínek VMC mohou být dvojice drah s osovou vzdáleností 700 stop a více považovány za nezávislé jedná-li se o odlety, ale pro nezávislé přílety musí být vzdálenost drah alespoň 2500 stop. Za podmínek IMC je minimální vzdálenost drah pro nezávislé odlety alespoň 2500 stop a pro nezávislé přílety minimálně 3400 stop.

**Tabulka 8: Vzdálenosti os paralelních drah za podmínek VMC a IMC [12]**

VMC		Paralelní dráhy vzdálenost os drah	IMC	
přílety	odlety		přílety	odlety
závislé	závislé	< 700 stop	závislé	závislé
závislé	nezávislé	700 – 2499 stop	závislé	závislé
nezávislé	nezávislé	2500 – 3399 stop	závislé	nezávislé
nezávislé	nezávislé	3400 – 4299 stop	nezávislé	nezávislé
nezávislé	nezávislé	≥ 4300 stop	nezávislé	nezávislé

Obrázek 14 zobrazuje výše zmiňovaných osm scénářů, které model nabízí. Tečkovaná čára ve scénářích se sudými čísly naznačuje nezávislost drah, na kterých lze provádět nezávislé souběžné přílety a odlety.





Obrázek 14: Osm scénářů paralelních drah [12]

Model pro výpočet kapacity paralelních drah vyžaduje oproti modelu pro výpočet kapacity jedné dráhy tyto dodatečné vstupy:

- vybrat jeden z osmi scénářů paralelních drah
- určit neexistenci nebo existenci divergentních odletových tras
- stanovit vzdálenost os drah (ve stopách)
- stanovit vzdálenost mezi dvojicí diagonálních příletů (v NM) – pouze u závislého paralelního systému drah [12]

Všechny ostatní potřebné vstupy a samotný postup určení kapacit paralelních drah je podrobně popsán v kapitole výpočet kapacit dráhového systému.

Výstupem modelu pro podmínky VMC a IMC jsou následující informace:

- kapacita dráhy používaná pouze pro přílety (s/bez „touch and go“ aktivitou)
- kapacita dráhy používaná pouze pro odlety (s/bez „touch and go“ aktivitou)
- celkový počet smíšených operací [12]

## 5. Výpočet kapacit dráhového systému

Tato kapitola se zabývá samotným výpočtem kapacit dráhového systému na LKPR. V první řadě se spočítá kapacita současného dráhového systému, tedy kapacita single RWY na letišti, a dále se pokračuje s výpočtem kapacit dráhového systému paralelních drah.

### 5.1 Single RWY (současný stav)

Ačkoliv je hlavním cílem spočítat kapacitu paralelních drah, je nejprve potřeba zjistit kapacitu současného stavu na letišti, což znamená určit kapacitu single RWY. Postupuje se podle výše rozebraného modelu Alfreda Blumsteina.

#### 5.1.1 Výpočet kapacity – přílety

Jako první je potřeba zjistit složení letadel na letišti a z toho důvodu byly pro potřebu stanovení vstupních parametrů modelu vybrány dva libovolné dny - neděle v říjnu a pátek v dubnu. Pomocí Flightradar24, který sleduje lety v reálném čase, lze přesně zjistit, jaké typy letadel se v daný den nacházely na letišti, viz tabulky 7 a 8. Na základě stejného procentuálního rozdělení letadel ve sledovaných dnech lze předpokládat, že složení letadel bude i v jiných dnech podobné, proto je možné použít jeden ze sledovaných dnů. Dále se k vyskytujícím typům letadel přiřadí kategorie podle MTOW, obsazenost dráhy a rychlost letadla v konečné fázi přiblížení. Obsazenost dráhy lze změřit pomocí stopek od momentu dosednutí letadla na dráhu po okamžik jeho opuštění. Rychlost letadla v konečné fázi přiblížení se určuje podle ICAO kategorie přibližovací rychlosti. Všechna letadla se sečtou, rozdělí do kategorií podle MTOW a určí se v procentech pravděpodobnost výskytu. Jelikož Flightradar24 nezobrazuje letadla kategorie Light, je počet letadel určen na základě informací poskytnutých od ŘLP ČR, s.p.

**Tabulka 9: Letadla vyskytující se během dne na letišti v Praze (říjen) [vlastní zpracování]**

říjen, neděle	počet	MTOW	$o_t$ [s]	$v_t$
Airbus A220-300	2	M	65	C
AIRBUS A319	24	M	63	C
Airbus A320	91	M	69	C
Airbus A321	23	M	68	C
Airbus A330	6	H	74	D
Airbus A380	2	H	83	D
Boeing 737	114	M	68	C

Boeing 787	2	H	79	D
Embraer ERJ-170	7	M	64	C
Embraer ERJ-175	2	M	56	C
Embraer ERJ-190	4	M	57	C
Embraer ERJ-195	6	M	60	C
ATR-72	24	M	55	B
ATR-42-300	2	M	53	B
Sukhoi Superjet 100	2	M	58	C
Bombardier Dash 8 Q400	7	M	64	C
Bombardier CRJ-900	7	M	60	C
Bombardier CRJ-1000	2	M	62	C
Letadla kategorie LIGHT	10	L	56	A
<b>Celkem: 337</b>				

**Heavy: 10 -> 3%**

**Medium: 317 -> 94%**

**Light: 10 -> 3%**

**Tabulka 10: Letadla vyskytující se během dne na letišti v Praze (duben) [vlastní zpracování]**

<b>duben, pátek</b>	<b>počet</b>	<b>MTOW</b>	<b><math>o_i</math> [s]</b>	<b><math>v_i</math></b>
Airbus A220-300	4	M	65	C
Airbus A318	2	M	55	C
Airbus A319	25	M	63	C
Airbus A320	90	M	69	C
Airbus A321	25	M	68	C
Airbus A330	5	H	74	D
Airbus A380	2	H	83	D
Boeing 717	4	M	53	C
Boeing 737	132	M	68	C
Boeing 747	2	H	81	D
Boeing 787	2	H	79	D
Embraer ERJ-170	2	M	64	C
Embraer ERJ-175	2	M	56	C
Embraer ERJ-190	8	M	57	C
Embraer ERJ-195	4	M	60	C

ATR-72	31	M	55	B
McDonnell Douglas MD-82	4	M	52	C
Bombardier Dash 8 Q400	20	M	64	C
Bombardier CRJ-900	8	M	60	C
Bombardier CRJ-1000	2	M	62	C
Letadla kategorie LIGHT	10	L	56	A
<b>Celkem: 384</b>				

**Heavy: 11 -> 3%**

**Medium: 363 -> 94%**

**Light: 5 -> 3%**

Podle daných tříd potřebných pro výpočet se vytvoří nová tabulka. Tyto třídy (Heavy, Medium, Light) udávají pravděpodobnost výskytu daných typů letounů na letišti, tzv. mix letadel, jeden z nejdůležitějších faktorů ovlivňující kapacitu dráhového systému. Rychlost je daná v uzlech, proto je potřeba ji převést na stejné jednotky jako obsazenost dráhy. Obsazenost je doplněna na základě reálných hodnot poskytnutých ŘLP, ČR s.p.

**Tabulka 11: Jednotlivé třídy letadel s jejich parametry [vlastní zpracování]**

<i>i</i> (typ letadla)	$p_i$ (pravděpodobnost)	$v_i$ (uzly)	$o_i$ (sekundy)
1 (H)	0,03 %	150 = 77,10 s	79
2 (M)	0,94 %	130 = 66,82 s	68
3 (L1)	0,03 %	110 = 56,54 s	56
4 (L2)	0,00 %	90 = 46,24 s	38

Dalším parametrem, který je potřeba k výpočtu, jsou minimální podélné rozstupy mezi dvěma letadly v konečné části přiblížení. Tyto rozstupy jsou uvedeny v následující tabulce:

**Tabulka 12: Minimální podélné rozstupy v úseku konečného přiblížení (v NM) [4]**

$s_{ij}$		Následující letadlo <i>j</i>		
		H	M	L1,L2
Přistávající letadlo <i>i</i>	H	4	5	6
	M	3	3	5
	L1,L2	3	3	3

Parametr  $r$ , což je délka dráhy konečného přiblížení, je roven 5 NM. Jelikož jsou již vyjádřeny všechny potřebné parametry, lze dosadit do vzorců 3.1 a 3.2. Z výsledků, které se získají po dosazení, se sestaví následující tabulka, která zobrazuje minimální časový interval mezi danými třídami letadel. [4]

**Tabulka 13: Matice  $T_{ij}$  minimálních časových intervalů [vlastní zpracování]**

$T_{ij}$		Následující letadlo $j$			
		1 (H)	2 (M)	3 (L1)	4 (L2)
<b>Přistávající letadlo <math>i</math></b>	1 (H)	96,0830 s	157,0588 s	240,2075 s	0,00 s
	2 (M)	72,0623 s	83,1488 s	188,9744 s	0,00 s
	3 (L1)	72,0623 s	83,1488 s	98,2667 s	0,00 s
	4 (L2)	0,00 s	0,00 s	0,00 s	0,00 s

V praxi se předpokládá, že skutečné časové intervaly budou vyšší, jelikož se musí započítat vliv reakcí pilotů, povětrnostní podmínky nebo schopnosti řídicích letového provozu. Všechny tyto vlivy jsou vyjádřeny konstantou  $b$ . Pro skutečný čas použijeme vzorec 3.5. [4]

Konstanta  $b$  většinou překračuje minimální časové intervaly o 5 až 10 sekund. V tomto případě je zvolena  $b = 10$  s. Matice minimálních časových intervalů bude vypadat následovně:

**Tabulka 14: Matice minimálních časových intervalů opravených o konstantu  $b$  [vlastní zpracování]**

$t_{ij}$		Následující letadlo $j$			
		1 (H)	2 (M)	3 (L1)	4 (L2)
<b>Přistávající letadlo <math>i</math></b>	1 (H)	106,0830 s	167,0588 s	250,2075 s	0,00 s
	2 (M)	82,0623 s	93,1488 s	198,9744 s	0,00 s
	3 (L1)	82,0623 s	93,1488 s	108,2667 s	0,00 s
	4 (L2)	0,00 s	0,00 s	0,00 s	0,00 s

V tuto chvíli je potřeba vzít v potaz mix letadel, který se vyjadřuje pomocí pravděpodobnosti výskytu  $p_{ij}$ . Pravděpodobnost je dána vzorcem 3.4. Vytvoří se matice pravděpodobnosti výskytu, viz následující tabulka.

**Tabulka 15: Matice pravděpodobnosti výskytu – přílety [vlastní zpracování]**

$p_{ij}$		Následující letadlo $j$			
		1 (H)	2 (M)	3 (L1)	4 (L2)
Přistávající letadlo $i$	1 (H)	0,0009	0,0282	0,0009	0,00
	2 (M)	0,0282	0,8836	0,0282	0,00
	3 (L1)	0,0009	0,0282	0,0009	0,00
	4 (L2)	0,00	0,00	0,00	0,00

Dále se dosadí matice  $t_{ij}$  a  $p_{ij}$  do vzorce 3.6, z jehož výsledků lze zjistit průměrný časový interval mezi postupným přistáváním:

$$E[t_{ij}] = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_{ij} \cdot t_{ij} = 98,061326 \text{ s} \quad (4.1)$$

A konečně maximální provozní kapacita (počet přistání za hodinu), která je dána vztahem 3.7, kde  $E[t_{ij}]$  je měřeno v hodinách, což znamená, že je potřeba si vzorec lehce upravit.

$$\mu_a = \frac{1}{E[t_{ij}]} = \frac{3600}{98,061326} = 36,711721 \quad (4.2)$$

Výsledná kapacita dráhy sloužící pouze pro přistání činí **36 přistání za hodinu.**

### 5.1.2 Výpočet kapacity – odlety

Model, který byl použit v předcházející kapitole pro výpočet kapacity dráhy pro přílety, lze použít po menších úpravách i pro výpočet odletové kapacity.

Opět se vychází ze stejného složení letadel jako v předchozím případě. Z tabulky 7 nebo 8 lze zjistit pravděpodobnost výskytu daných typů letadel, viz tabulka 16. Jelikož se jedná pouze o odlety, k výpočtu není potřeba znát obsazenost dráhy a rychlost letadla v poslední fázi přiblížení, jako v předchozím případě.

**Tabulka 16: Pravděpodobnosti výskytu [vlastní zpracování]**

<i>i</i> (typ letadla)	<i>p<sub>i</sub></i> (pravděpodobnost)
1 (H)	0,03 %
2 (M)	0,94 %
3 (L1)	0,03 %
4 (L2)	0,00 %

Dalším parametrem, který je nezbytný k výpočtu, jsou minimální požadované rozstupy mezi dvěma letadly při odletu. Tyto rozstupy jsou dány časovým intervalem a jsou zobrazeny v následující tabulce. Hodnoty jsou uvedeny v sekundách. [4]

**Tabulka 17: Minimální rozstupy mezi dvojicí odlétávajících letadel (v sekundách) [4]**

Předcházející letadlo <i>i</i>	Následující letadlo <i>j</i>		
	H	M	L1,L2
H	90 s	120 s	120 s
M	60 s	60 s	60 s
L1,L2	45 s	45 s	45 s

V případě odletu platí, že se průměrný časový interval mezi začátkem vzletu letadla typu *i* a letadla typu *j* rovná minimálnímu požadovanému rozstupu mezi těmito letadly. Proto se píše  $s_{ij} = t_{ij}$  pro všechny dvojice letadel. [4]

V tuto chvíli se bere v potaz mix letadel, který je vyjádřen pomocí pravděpodobnosti výskytu  $p_{ij}$ , což je pravděpodobnost situace, kdy je odlétávající letadlo *i* následováno letadlem *j*. Tato pravděpodobnost se značí  $p_{ij}$  a je dána vztahem 3.8. Vytvoří se matice pravděpodobnosti výskytu.

**Tabulka 18: Matice pravděpodobnosti výskytu – odlety [vlastní zpracování]**

<i>p<sub>ij</sub></i>		Následující letadlo <i>j</i>			
		1 (H)	2 (M)	3 (L1)	4 (L2)
Přistávající letadlo <i>i</i>	1 (H)	0,0009	0,0282	0,0009	0,00
	2 (M)	0,0282	0,8836	0,0282	0,00
	3 (L1)	0,0009	0,0282	0,0009	0,00
	4 (L2)	0,00	0,00	0,00	0,00

Dále se dosadí matice  $t_{ij}$  a  $p_{ij}$  do vzorce 3.9 a vyjde průměrný časový interval mezi následnými odlety:

$$E[T_{ij}] = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k p_{ij} \cdot t_{ij} = 61,323 \text{ s} \quad (4.3)$$

Kde, jak již bylo řečeno výše,  $s_{ij} = t_{ij}$ , a proto se místo  $t_{ij}$  dosazují do vzorce hodnoty  $s_{ij}$ .

A konečně maximální provozní kapacita (počet odletů za hodinu), která je dána vztahem 3.10, kde  $E[t_{ij}]$  je měřeno v hodinách, což znamená, že je potřeba si vzorec lehce upravit.

$$\mu_d = \frac{1}{E[t_{ij}]} = \frac{3600}{61,323} = 58,705543 \quad (4.4)$$

Výsledná kapacita dráhy sloužící pouze pro odlety činí **58 odletů za hodinu.**

### 5.1.3 Výpočet kapacity – smíšený provoz

Stejný matematický model se použije i pro výpočet kapacity dráhy, na které je provozován smíšený provoz. Pro tento režim provozu je výpočet kapacity nejjednodušší při znalosti kapacity dráhy používané pouze pro přílety a kapacity používané pouze pro odlety.

Dráhová kapacita se spočítá jako průměr z  $\mu_a$ , což je kapacita dráhy používané pouze pro přílety, a z  $\mu_d$ , což je kapacita dráhy používané pouze pro odlety. Dosadí se hodnoty spočtené z předchozích příkladů a vyjde kapacita dráhy pro smíšený provoz. [4]

$$\mu = \frac{\mu_a + \mu_d}{n} = \frac{36 + 58}{2} = 47 \quad (4.5)$$

Výsledná kapacita dráhy provozující smíšený provoz, to znamená kapacita provozována v současné době na letišti Václava Havla v Praze, je **47 pohybů za hodinu.**

Ověření výpočtu kapacity na základě modelu vytvořeného pomocí Blumsteinovy metody odpovídá informaci získané přímo z letiště, která udává, že počet provozovaných pohybů za hodinu opravdu odpovídá 47 pohybům.



### 5.1.4 Program v Matlabu pro výpočet kapacit

Pro usnadnění výpočtu kapacit dráhového systému pomocí Blumsteinovy metody je zhotoven program v Matlabu. Tento program slouží výhradně pro výpočet kapacity dráhy určené pouze pro přílety, jelikož je z výše zmíněných postupů nejsložitější. To znamená, že pro kapacitu smíšeného provozu, je potřeba spočítat kapacity dráhy určené pouze pro odlety pomocí výše popsané metody a z obou výsledků spočítat průměr. Na následujícím obrázku je zobrazen samotný program. Celý skript k programu je k naleznutí v příloze.

SINGLE RUNWAY LANDING CAPACITY

**Tij**

R:  ■

Sij:  ■

Vi:  ■

Vj:  ■

Oi:  ■

B:  ■

$T_{ij} + B = 68 + 10$   
 $t_{ij} = 78$

**NM to m**

NM is 1852 m ■

m is 1 NM ■

**Panel**

	p (%)	v (kt)	o (s)
H	0.0300	77.1000	79
M	0.9400	66.8200	68
L1	0.0300	56.5400	56
L2	0	46.2400	38

	H	M	L1	L2
H	4	5	6	6
M	3	3	5	5
L1	3	3	3	3
L2	3	3	3	3

	H	M	L1	L2
H	96.0830	157.0588	240.2075	320.4672
M	72.0623	83.1488	188.9744	261.9378
L1	72.0623	83.1488	98.2667	156.6374
L2	72.0623	83.1488	98.2667	120.1557

	H	M	L1	L2
H	0.0865	4.4291	0.2162	0
M	2.0322	73.4702	5.3291	0
L1	0.0649	2.3448	0.0884	0
L2	0	0	0	0

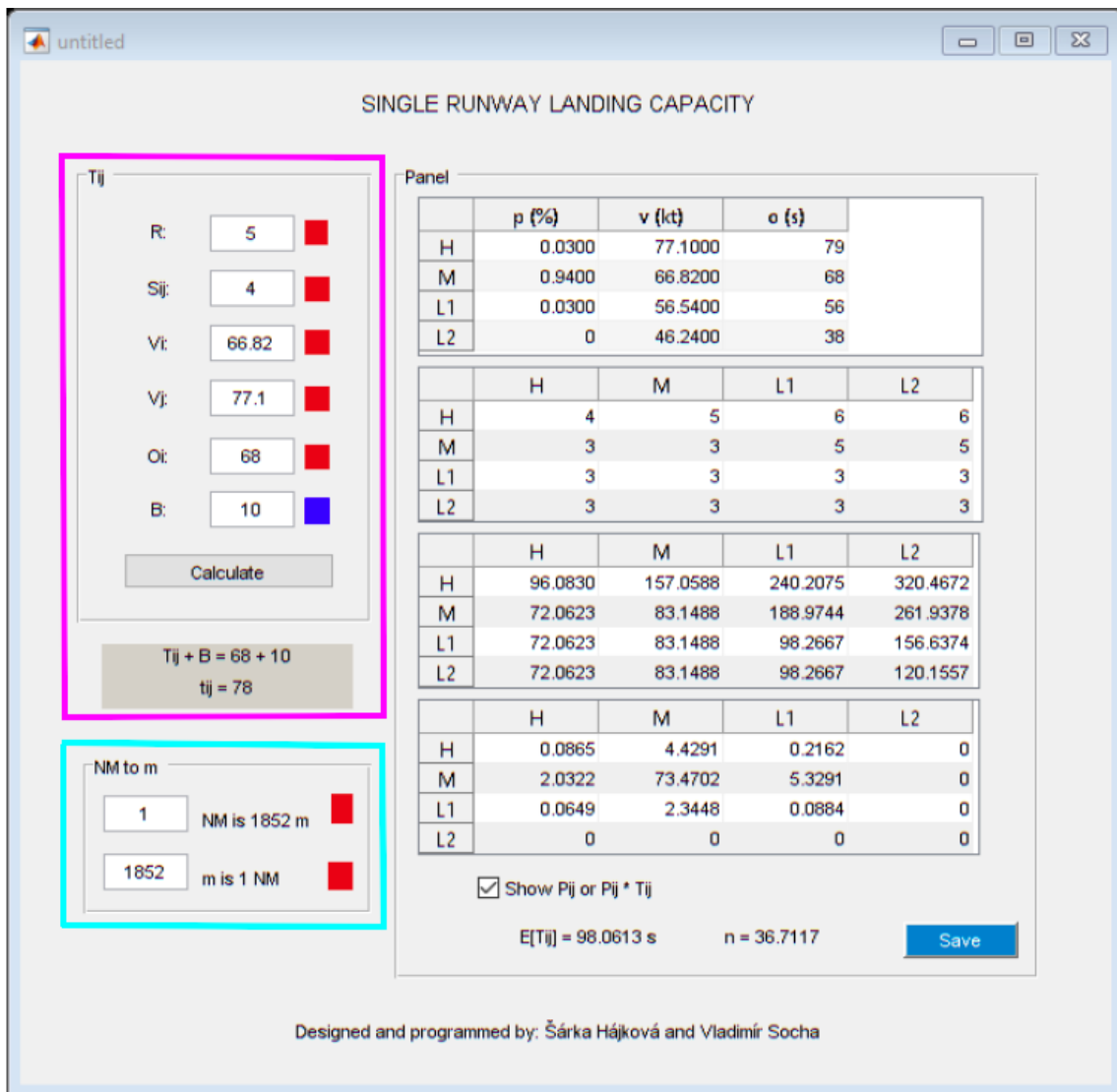
Show Pij or Pij \* Tij

E[Tij] = 98.0613 s      n = 36.7117     

Designed and programmed by: Šárka Hájková and Vladimír Socha

Obrázek 15: Program v Matlabu pro výpočet kapacit [vlastní zpracování]

Program je rozdělen do dvou částí. První část programu (levý sloupec) je pouze doplňkový a slouží pro ověření jedné z hodnot výpočtu. Pro samotný výpočet kapacity je stěžejní druhá část programu (pravý sloupec), jejímž výstupem je přesný počet přiletů za hodinu.



Obrázek 16: Popis první části programu [vlastní zpracování]

Jak je již zmíněno výše, tato část není klíčová pro konečný výpočet kapacit. V růžové tabulce si lze po zadání hodnot ze vzorců 3.1 a 3.2 zvlášť spočítat minimální časový interval mezi přiletem dvou letadel  $T_{ij}$ , ze kterého se vychází při výpočtu kapacity. Výsledek se zobrazí v šedém obdélníku. Do tohoto výpočtu lze zahrnout i konstantu  $b$ , která nabývá hodnoty  $b = 10$  s. V šedém obdélníku se tak zobrazí druhý výsledek, a to  $T_{ij} + b$ .

V modré tabulce si lze pro kontrolu převádět jednotky z námořních mílů na metry a naopak, jelikož je tento převod pro výpočet kapacity zásadní.

Panel

	p (%)	v {kt}	o (s)	
H	0.0300	77.1000	79	
M	0.9400	66.8200	68	
L1	0.0300	56.5400	56	
L2	0	46.2400	38	

	H	M	L1	L2
H	4	5	6	6
M	3	3	5	5
L1	3	3	3	3
L2	3	3	3	3

	H	M	L1	L2
H	96.0830	157.0588	240.2075	320.4672
M	72.0623	83.1488	188.9744	261.9378
L1	72.0623	83.1488	98.2667	156.6374
L2	72.0623	83.1488	98.2667	120.1557

	H	M	L1	L2
H	0.0865	4.4291	0.2162	0
M	2.0322	73.4702	5.3291	0
L1	0.0649	2.3448	0.0884	0
L2	0	0	0	0

Show Pij or Pij \* Tij

E[Tij] = 98.0613 s      n = 36.7117

Save

Obrázek 17: Popis druhé části programu [vlastní zpracování]

První dvě tabulky zobrazují pouze potřebné parametry pro výpočet kapacity. Červená tabulka udává v prvním sloupci pravděpodobnost výskytu daných typů letounů na letišti podle tříd (Heavy, Medium, Light 1, Light 2), tzv. mix letadel. V následujícím sloupci jsou znázorněny rychlosti letadel v konečné fázi přiblížení. Rychlost je již převedena na sekundy, tedy na stejné jednotky jako obsazenost dráhy, která se nachází v posledním sloupci.

Dalším parametrem, který je potřeba k výpočtu, jsou minimální podélné rozstupy mezi dvěma letadly v konečné části přiblížení. Tyto rozstupy jsou zobrazeny v modré tabulce.

Jelikož již jsou vyjádřeny všechny parametry, lze spočítat minimální časový interval mezi přiletem dvou letadel  $T_{ij}$ . Program dosadí do vzorců 3.1 a 3.2. a z výsledků sestaví tabulku, která zobrazuje minimální časový interval mezi danými třídami letadel, viz zelená tabulka.

V poslední žluté tabulce si lze v okénku pod tabulkou zvolit možnost zobrazit matici pravděpodobnosti výskytu  $p_{ij}$  a nebo součin matic  $t_{ij}$  a  $p_{ij}$ . Tyto matice  $t_{ij}$  a  $p_{ij}$  pak program dosadí do vzorce 3.6 a vyjde průměrný časový interval mezi postupným přistáváním  $E[t_{ij}]$ , ze kterého pomocí vzorce 3.7 získáme maximální provozní kapacitu  $n$ , tedy počet přistání za hodinu.

## 5.2 Paralelní dráhy (budoucí stav)

Jelikož je již kapacita současného stavu na LKPR známa, je nyní potřeba zjistit kapacitu budoucího stavu letiště, tedy kapacitu paralelního systému drah. Postupuje se podle výše rozebraného FAA Airfield Capacity modelu.

### 5.2.1 FAA Airfield Capacity Model

FAA Airfield Capacity Model je počítačový program, který pracuje v Excelu, viz obrázek 18. Model spočte kapacity dráhy používané jak pouze pro přiletý nebo pouze pro odlety, tak i kapacitu smíšeného provozu na dráze. Výstupem je hodinová kapacita letiště spočtená na základě daných vstupních údajů a vybraném modelu, který je v tomto případě systém paralelních drah. Proto je použit „Dual Model“, jak již bylo zmíněno výše. [12]

The screenshot displays the 'SPREADSHEET CAPACITY MODEL - DUAL PARALLEL RUNWAYS' in Excel. It is divided into several sections:

- Inputs:**
  - Meteorological Conditions:** VMC % Occurrence (30%), IMC % Occurrence (10%).
  - Runway Scenario Selection:** 2 (Dual Parallel Runway Scenario).
  - Divergent Departure Routes:** Yes (15 deg or more).
  - Runway Separation Distance:** 5,003 ft.
  - VMC/IMC Separations:** VMC Departure-Arrival (3.0 nm), IMC Departure-Arrival (3.0 nm), Length of Common Approach (7.0 nm).
  - Operations Assumption on Touch-N-Go's:** 0%.
  - RESET INPUTS:** Aircraft Classification (Small-S, Small-T, Small+, Large-TP, Large-Jet, Large-757, Heavy), Previous FAA Category (A, B, C, D), Maximum Gross Takeoff Weight (MTOW), Operating Fleet Mix, Share Allocations (0.0%, 0.0%, 1.4%, 12.0%, 81.1%, 3.0%), Arrival Runway Occupancy Time (32, 42, 50, 70, 67, 0, 79 seconds), Average Approach Speeds (90, 100, 110, 130, 140, 150 knots), Runway Exit Availability (100%), Full Parallel Taxiway (100%), Airport Traffic Control Tower (Yes).
  - SHOW/HIDE Advanced Features:** Arrival Gap Spacing Buffer (0.0 sec), Departure Hold Buffer (10.0 sec), Arrival Gap Spacing Buffer (0.0 nmiles), Diagonal Separation Allowed (1.5 nmiles).
- Outputs:**
  - Runway Allocations:** VMC, IMC, Average.
  - Arrivals only capacity (Runway 1):** 32, 29, 32.
  - Arrivals capacity (Runway 1) (inc. TNGs):** 32, 29, 32.
  - Mixed Departures Capacity (Runway 1) (inc. TNGs):** 0, 0, 0.
  - Arrivals only capacity (Runway 2):** 0, 0, 0.
  - Arrivals capacity (Runway 2) (inc. TNGs):** 0, 0, 0.
  - Mixed Departures Capacity (Runway 2) (inc. TNGs):** 0, 0, 0.
  - Departures only capacity (Runway 2):** 39, 39, 39.
  - Total Arrivals & Departures Capacity:** 72, 68, 71.
  - Arrivals Percentage:** 45%, 43%, 45%.

Obrázek 18: FAA Airfield Capacity Model [12]

### 5.2.1.1 Vstupy modelu

V této části jsou nejprve popsány samotné vstupy modelu a poté je vždy vložen obrázek, který zobrazuje dané vstupy v modelu již s vloženými hodnotami. Hodnoty jsou zadány na základě podkladů, které mi přímo pro potřeby této práce poskytlo ŘLP ČR, s.p.

Vstupy se dělí na dvě části - obecné vstupy a pokročilé vstupy. Obecné vstupy umožňují uživateli nastavit meteorologické podmínky, podmínky na letišti a složení letadel. Tyto vstupy je potřeba vyplnit tak, aby simulovaly dané podmínky zkoumaného letiště, jelikož jsou nezbytné pro vytvoření přiměřené a relevantní hodinové kapacity letiště. Pokročilé vstupy umožňují další zpřesnění údajů, jako jsou minimální separační požadavky, které mohou být upraveny. Jedná se o stanovení minimálních rozstupů zvláště mezi přílety a zvláště mezi odlety pro podmínky VMC i IMC. [12]

#### 1) Obecné vstupy

V první části obecných vstupů se provádí výběr týkající se specifických provozních podmínek a postupů řízení letového provozu (ATC) pro uvažované letiště, viz obrázek 19.

Primárně je potřeba určit procento času, kdy letiště pracuje za vizuálních meteorologických podmínek („*VMC, % Occurrence*“) a meteorologických podmínek pro let podle přístrojů („*IMC, % Occurrence*“) v sekci „*Metorological Conditions*“. Pro lety za viditelnosti musí být vzdálenost od oblaků alespoň 1500 m horizontálně a 300 m vertikálně a letová dohlednost musí dosahovat alespoň 5 km. [12]

Po volbě procentuálních výskytů VMC a IMC si uživatel zvolí v sekci „*Runway Scenario Selection*“ jeden z osmi scénářů konfigurací drah zmiňovaných již v předchozí kapitole. Dále se určuje, zda jsou nebo nejsou k dispozici „*Divergent Departure Routes*“, tedy divergentní odletové trasy pro provádění případných současných odletů. V další sekci „*Runway Separation Distance*“ se zadá osová vzdálenost mezi drahami, na jejímž základě se určuje, zda jsou na sobě dráhy závislé či nezávislé. Buňky „*Runway 1 operation*“ a „*Runway 2 operation*“ se vyplní samy v závislosti na zvoleném scénáři. [12]

Dalším vstupem je „*Departure - Arrival Separations*“ neboli vzdálenostní rozstup mezi příletem, který je následován odletem. Jedná se o minimální vzdálenost mezi přilétávajícím letadlem a prahem dráhy, kde vyčkává letadlo připravené k odletu a čeká na povolení k obsazení dráhy a povolení ke vzletu. Tato hodnota se může pohybovat od 1 do 5 NM nebo i více, v závislosti

na okolních podmínkách. Hodnoty se mohou lišit pro let podle VMC a pro let podle podmínek IMC. [12]

„*Length of Common Approach*“ neboli délka společného přiblížení je dalším potřebným vstupem. Jedná se o vzdálenost od vnějšího polohového návěstidla (počátečního bodu fáze konečného přiblížení) k prahu dráhy. Během této fáze letu se mohou letadla pohybující se různými rychlostmi dostat blíže nebo dále od sebe při konečném sestupu na dráhu. Tato hodnota je obvykle mezi 5 a 10 NM.

Poté se musí učinit předpoklad týkající se procentuálního podílu celkových operací, které se skládají z operací typu „*touch and go*“. Tato hodnota je většinou 0, pokud se na letišti nevyskytuje letecká škola nebo vojenská letecká základna.

Následuje „*Arrival-Arrival Standard Deviation*“ a „*Departure ROT Standard Deviation*“ neboli standardní odchylka příletů a standardní odchylka času obsazenosti dráhy u odletů. Vstup simuluje potřebné rozstupy mezi přilétávajícími a odlétávajícími páry letadel v sekundách. [12]

Vstup „*Z - Value*“ neboli Z-hodnoty nelze upravit, jelikož se jedná o standardní statistickou hodnotu použitou k dosažení 95% úrovně spolehlivosti.

Následující obrázek zobrazuje všechny výše vypsané vstupy modelu s doplněnými hodnotami pro LKPR. Jelikož jsou dráhy od sebe vzdáleny dostatečně na to, aby byly navzájem nezávislé, jsou v modelu použity pouze scénáře pro nezávislé dráhy, které jsou označeny čísly 2, 4, 6 a 8.

INPUTS					
Meteorological Conditions	VMC, % Occurrence	90%	IMC, % Occurrence	10%	
Runway Scenario Selection	2	← Select a Dual Parallel Runway Scenario in cell C8			
Divergent Departure Routes	Yes	15 deg or more	Runway 1 Operations	Arrivals Only	
Runway Separation Distance	5 003	ft	Runway 2 Operations	Departures Only	
VMC-Departure-Arrival Separation	3,0	nm	Arrival - Arrival Std. Dev.	20,0	sec
IMC-Departure-Arrival Separation	3,0	nm	Departure ROT Std. Dev.	10,0	sec
Length of Common Approach	7,0	nm	Z-Value, 95% Confidence	1,645	-----
Operations Assumption on Touch -N- Go's	0%		T-Factor (Touch-N-Go's)		1,00

Obrázek 19: První část obecných vstupů [vlastní zpracování]

Druhá část obecných vstupů se zaměřuje na složení letadel, a s tím související provozní specifikace, ale také na informace týkající se dostupnosti a využívání dráhy, pojezdových drah a kontrolní věže. V modelu jsou rozšířeny původní klasifikační třídy letadel ze čtyř kategorií

na sedm, aby uživatelé poskytly větší variabilitu při identifikaci mixu letadel na uvažovaném letišti. Celá tabulka obsahující rozdělení letadel do nových tříd se nachází v modelu na samotném listu, viz výše zmíněná tabulka 7.

Prvním vstupem v této části je „*Operating Fleet Mix*“ neboli mix letadel. Cílem tohoto vstupu je co nejlépe prezentovat složení letadel na uvažovaném letišti a určit matici pravděpodobnosti, která udává pravděpodobnost mezi jednotlivými možnými dvojicemi letadel z daných klasifikačních tříd. Vstup je podmíněně naformátován, aby upozornil uživatele, pokud se součet všech klasifikačních tříd nerovná 100 %. [12]

Složení letadel na LKPR je již známé z předchozího výpočtu kapacit pro single RWY. Pomocí Flightradar24 lze zjistit, jaké typy letadel se v daný den vyskytovaly na letišti, viz následující tabulka.

**Tabulka 19: Klasifikační třídy vyskytující se na letišti v Praze [vlastní zpracování]**

Klasifikační třída	Jednotlivé typy letadel
<b>Small - S</b>	PA46 - Piper Malibu
	PC12 - Pilatus PC-12
	TBM7 - Socata TBM-7
<b>Small – T</b>	BE20 - Beech 200 Super King
	BE58 - Beech 58
	BE9L - Beech King Air 90
<b>Small - +</b>	C25A - Cessna Citation CJ2
	C750 - Cessna Citation X
	FA50 - Dassault Falcon/Mystère 50
	GALX - IAI 1126 Galaxy/Gulfstream G200
<b>Large - TP</b>	ATR – 72
	Dash 8 Q300/400
<b>Large - Jet</b>	Airbus 220-300
	Airbus 318
	Airbus 319
	Airbus 320
	Airbus 321
	Boeing 717
	Boeing 737 Series

	EMB170
	EMB175
	EMB190
	EMB195
	McDonnell Douglas MD 82
	Bombardier CRJ900
	Bombardier CRJ1000
<b>Heavy</b>	Airbus 330
	Airbus 380
	Boeing 747 Series
	Boeing 787

V další tabulce se nachází procentuální složení letadel přilétávajících nebo odlétávajících na/z LKPR, které se zadává jako vstup do modelu.

**Tabulka 20: Procentuální zastoupení letadel na letišti v Praze [vlastní zpracování]**

<b>Třída letadel</b>	<b>Počet</b>	<b>Procentuální zastoupení</b>
Small – S	3	0,8 %
Small – T	3	0,8 %
Small - +	4	1,0 %
Large – TP	51	13,3 %
Large – Jet	312	81,2 %
Heavy	11	2,9 %

„Arrival Runway Occupancy Time“ (AROT) neboli doba obsazenosti přistávací dráhy je specifická pro každé letadlo, stejně jako rychlost přiblížení („Approach Speed“). Obsazenost je doplněna na základě reálných hodnot poskytnutých od ŘLP, ČR s.p. Rychlost letadla v konečné fázi přiblížení se určuje podle ICAO kategorie přibližovací rychlosti.

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny vstupy modelu týkající se složení letadel s doplněnými hodnotami pro LKPR.



Aircraft Classification New Category	Small - S	Small - T	Small +	Large-TP	Large-Jet	Large-757	Heavy
Previous FAA Category	A	B	C	C	C	C	D
Maximum Gross Takeoff Weight (MTOW)	Less than 12,500 lbs (Single Engine)	Less than 12,500 lbs (Twin Engine)	Between 12,500 lbs and 41,000 lbs	Between 41,000 lbs and 255,000 lbs	Between 41,000 lbs and 300,000 lbs	Boeing 757 Series	More than 300,000 lbs
Operating Fleet Mix Share Allocations	Enter the actual or expected % share for each aircraft class						
	0,8%	0,8%	1,4%	12,9%	81,1%	0,0%	3,0%
Arrival Runway Occupancy Time Time in Seconds	Enter the estimated time from touchdown to runway exit						
	32	43	56	70	67	0	79
Average Approach Speeds Velocity in Knots	Enter the average suggested manufacturers final approach speed under normal conditions						
	90	100	110	130	130	140	150

Obrázek 20: Vstupy modelu týkající se složení letadel [vlastní zpracování]

Následně je potřeba vyplnit pole „Runway Exit Availability“ a „Full Parallel Taxiway“. U vstupu dostupnost výjezdů z RWY se určuje počet výjezdů na dráze, avšak pokud je počet výjezdů u drah odlišný, vkládá se menší hodnota. Dále se počítá s tím, že je na letišti dostupná celá paralelní pojezdová dráha, díky které se redukuje zpoždění na dráze. V dalším kroku se předpokládá přítomnost řídicí věže („Airport Traffic Control Tower“) a výskyt pouze zanedbatelných přejezdů RWY („Runway Crossing Delay“), které nezpůsobují žádná zratelná zpoždění za standardních podmínek. [12]

Runway Exit Availability	Excellent (4 or more Exits)	100%	Runway Crossing Delay ?	No	0
Full Parallel Taxiway	Full Taxiway	100%	Average Crossing Delay	0	sec
Airport Traffic Control Tower	Yes	Availability	Crossings during Peak Hour	0	Frequency

Obrázek 21: Vstupy týkající se podmínek na letišti [vlastní zpracování]

## 2) Pokročilé vstupy

První část pokročilých vstupů poskytuje možnost zavedení bufferu pro umožnění více odletů mezi přílety („Arrival Gap Spacing Buffer“). Tento vstup lze zvyšovat, dokud není dosaženo požadovaného počtu dodatečných odletů nebo dokud přílety a odlety nedosahují určitého poměru. Dalším vstupem je „Departure Hold Buffer“. Ten neslouží ke zvýšení celkové kapacity, ale naopak snižuje kapacitu letiště, protože dodržení určité úrovně bezpečnosti může vyžadovat větší odstup mezi odlety na základě specifických provozních podmínek. [12]

Dalším vstupem je „Diagonal Separation Allowed“ neboli diagonální vzdálenost v NM mezi dvojicí příletů letících souběžně po osách paralelních drah. Tento parametr se používá pouze v případě, kdy se jedná o závislý paralelní systém drah, z čeho vyplývá, že pro výpočet kapacit na LKPR není potřeba. [12]

Arrival Gap Spacing Buffer	0,0	sec	←—OR—→	Arrival Gap Spacing Buffer	0,0	n miles
Departure Hold Buffer	10,0	sec		Diagonal Separation Allowed	1,5	n miles

Obrázek 22: Pokročilé vstupy modelu [vlastní zpracování]

Druhá část pokročilých vstupů se zabývá minimálními rozstupy mezi přílety, které jsou v modelu nastaveny na základě souboru FAA EM-78- 8A, „*Airport Capacity and Delay*“, který poskytuje pokyny pro minimální rozstupy. Tyto hodnoty minimálních rozstupů mohou být ve většině případech použity, pokud nejsou dostupné minimální separace z konkrétního letiště. Požadavky na minimální rozstupy mezi přílety jsou dány v námořních mílech a představují minimální bezpečnou vzdálenost mezi danými dvojicemi letadel. Hodnoty jsou dosazeny na základě informací z ŘLP ČR, s.p.

Každý pár se skládá z přistávajícího a následujícího letadla. Minimální vzdálenosti mezi letadly se určují na základě kategorie turbulence v úplavu. Rozstupy mezi letadly jsou větší za podmínek IMC. Výchozí hodnoty minimálních vzdáleností jsou nastaveny na 1,9 NM pro VMC a 3,0 NM pro IMC. Pokud jsou průměrné doby obsazenosti přistávacích drah kratší než 50 sekund, lze použít jako minimální rozstup 2,5 NM. [12]

Arrival-Arrival Separation Requirements		Distance in Nautical Miles (nm)		
		VMC	IMC	
Trailing Aircraft				
Small-S --- Heavy	Small-S, Small-T	2,5	3,0	2,5
Small-S --- Small+	Small +	2,5	3,0	2,5
Large --- Heavy	Small +	2,5	3,0	2,5
Small-S --- Small+	Large-TP, Jet	5,0	5,0	
Large --- Heavy	Large-TP, Jet	2,5	3,0	2,5
Small-S --- Small+	Large-757	6,0	6,0	
Large --- Heavy	Large-757	2,5	3,0	
Small-S --- Small-T	Heavy	7,0	7,0	
Small + --- 757	Heavy	4,0	4,0	
Heavy	Heavy	2,5	3,0	

**Alternate IMC Minimum**  
If Observed AROT < 50 Seconds,  
2.5 nm can be used in place of 3.0 nm

Obrázek 23: Minimální rozstupy mezi přílety [vlastní zpracování]

Poslední část pokročilých vstupů se zabývá minimálními rozstupy mezi odlety. Tyto minimální rozstupy jsou v modelu nastaveny na základě souboru FAA EM-78- 8A, „*Airport Capacity and Delay*“, který poskytuje pokyny pro minimální rozstupy. Tyto hodnoty mohou být ve většině případech použity, pokud nejsou dostupné minimální separace z konkrétního letiště. Hodnoty jsou dosazeny na základě informací z ŘLP ČR, s.p.

Požadavky na minimální rozstupy mezi odlety jsou dány v sekundách a chrání před účinky úplavu předcházejícího letadla. Běžně je používán minimální odstup mezi odlety 60 sekund, což umožňuje odlétávajícímu letadlu dostatek času na vzlet, přičemž nedovolí následujícímu letadlu vstoupit do úplavu předcházejícího letadla. [12]

Departure - Departure Separation Requirements		Time in Seconds	
Trailing Aircraft	Leading Aircraft	VMC	IMC
Small-S --- Small +	Small-S- Small +	80	80
Large -TP --- Large 757	Small-S- Small +	60	60
Heavy	Small-S- Small +	60	60
Small-S --- Small+	Large TP, Large Jet	120	120
Large --- Heavy	Large TP, Large Jet	80	80
Small-S --- Large Jet	Large 757, Heavy	120	120
Large 757, Heavy	Large 757, Heavy	90	90

Obrázek 24: Minimální rozstupy mezi odlety [vlastní zpracování]

### 5.2.1.2 Výstupy modelu

Výstupem je hodinová kapacita letiště spočtená na základě daných vstupních údajů, a to zvlášť pro podmínky VMC a zvlášť pro podmínky IMC. Příklad tabulky s výstupy, který je zobrazen na obrázku níže, zobrazuje zvlášť kapacity obou drah. Znárodnuje kapacitu dráhy 1 určenou pouze pro přílety, kapacitu dráhy 1 určenou pouze pro přílety s operacemi „touch and go“, kapacitu dráhy 1 pro smíšené operace, a dále kapacitu dráhy 2 určenou pouze pro přílety, kapacitu dráhy 2 určenou pouze pro přílety s operacemi „touch and go“, kapacitu dráhy 2 pro smíšené operace a kapacitu dráhy 2 určenou pouze pro odlety. Hlavním výstupem je celková kapacita dráhy (přílety i odlety) a je doplněna procentuálním zastoupením příletů vůči odletům. [12]

Pokud je potřeba tabulka výstupů pro jiný než segregovaný režim, je nutné zvolit odlišný scénář režimu provozu v první části vstupů.

OUTPUTS			
Runway Allocations	VMC	IMC	Average
Arrivals only capacity (Rnwy 1)	33	30	33
Arrivals capacity (Rnwy 1) (inc. TNGs)	33	30	33
Mixed Departures Capacity (Rnwy 1) (inc. TNGs)	0	0	0
Arrivals only capacity (Rnwy 2)	0	0	0
Arrivals capacity (Rnwy 2) (inc. TNGs)	0	0	0
Mixed Departures Capacity (Rnwy 2) (inc. TNGs)	0	0	0
Departures only capacity (Rnwy 2)	39	39	39
Total Arrivals & Departures Capacity	72	69	72
Arrivals Percentage	46%	43%	45%

Obrázek 25: Tabulka výstupu modelu [vlastní zpracování]

Kromě výše zmíněné tabulky výstupů zobrazuje model výsledky také ve formě náčrtu paralelních drah, který zobrazuje konkrétní počty příletů a odletů uvažovaných drah pro zvolený režim provozu, viz následující kapitola.

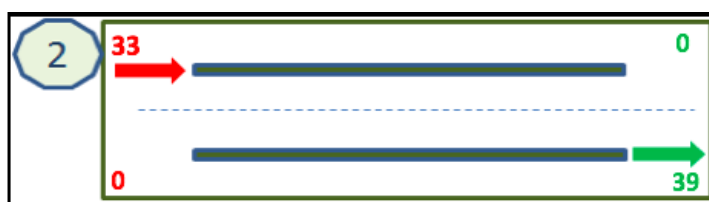
### 5.2.1.3 Výsledné kapacity

Jak již je zmíněno výše, pro vzájemně nezávislé dráhy existují čtyři scénáře: segregovaný provoz, smíšený provoz, jedna dráha pouze odlety, druhá smíšený provoz a jedna dráha pouze přílety a druhá smíšený provoz.

V případě provozu paralelních drah na LKPR je počítáno se segregovaným provozem, tedy s odlety z jedné dráhy a s přílety na dráhu druhou. Přesto jsou spočteny kapacity pro podmínky VMC pro všechny čtyři scénáře.

#### 1) Segregovaný provoz

Při tomto režimu je paralelní systém drah využit tak, že je jedna dráha určena pouze pro odlety a druhá pouze pro přílety. Řídicí letového provozu často upřednostňují tento režim provozu na paralelních drahách, jelikož jsou zjednodušeny operace ATM. Na obrázku a v tabulce níže jsou zobrazeny spočtené kapacity.



Obrázek 26: Kapacita segregovaného provozu [vlastní zpracování]

Tabulka 21: Kapacita pro segregovaný režim [vlastní zpracování]

přílety	33
odlety	39
<b>celkem</b>	<b>72</b>

#### 2) Jedna dráha pouze odlety, druhá smíšený provoz

Při tomto režimu jsou obě dráhy využívány pro odlety, ale pouze jedna pro přílety. Vzhledem k využití obou drah pro odlety, dosahuje kapacita při použití tohoto režimu o něco vyššího čísla, jak zobrazuje obrázek.



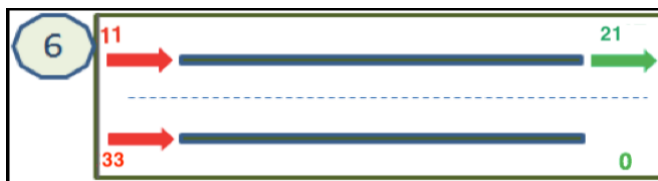
Obrázek 27: Kapacita při využívání jedné dráhy pouze pro odlety a druhé pro smíšený provoz [vlastní zpracování]

**Tabulka 22: Kapacita při využívání jedné dráhy pouze pro odlety a druhé pro smíšený provoz [vlastní zpracování]**

přiletý	33
odlety	41
<b>celkem</b>	<b>74</b>

3) Jedna dráha pouze přiletý, druhá smíšený provoz

Při tomto režimu jsou obě dráhy využívány pro přiletý, ale pouze jedna pro odlety. Jak ukazuje následující obrázek, tento režim není nejvhodnější, jelikož nenabízí dostatečnou kapacitu pro odlety.



Obrázek 28: Kapacita při využívání jedné dráhy pouze pro přiletý a druhé pro smíšený provoz [vlastní zpracování]

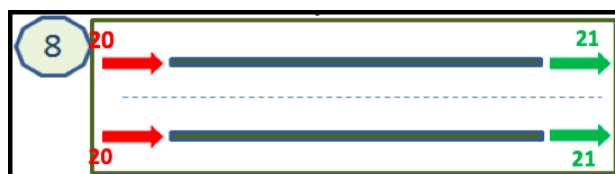
**Tabulka 23: Kapacita při využívání jedné dráhy pouze pro přiletý a druhé pro smíšený provoz [vlastní zpracování]**

přiletý	44
odlety	21
<b>celkem</b>	<b>65</b>

4) Smíšený provoz

Při tomto režimu je paralelní systém drah využit tak, že jsou obě dráhy používány jak pro přiletý, tak pro odlety. Následující obrázek znázorňuje, že tento režim provozu nabízí největší možnou kapacitu ze všech režimů. Nejčastěji je provoz řízen tak, že se střídají sekvence např. 5 - 10

příletů v řadě s např. 5 - 10 následnými odlety. Také je možné použít tzv. volné odlety, tedy vložení jednoho nebo více odletů mezi dva přílety.



Obrázek 29: Kapacita smíšeného provozu [vlastní zpracování]

Tabulka 24: Kapacita pro smíšený režim [vlastní zpracování]

přílety	40
odlety	42
<b>celkem</b>	<b>82</b>

Jak je možné vidět ze spočtených kapacit, nejvyšší kapacity dosahuje systém paralelních drah při smíšeném režimu, a to 82 pohybů za hodinu. Tento režim je náročnější z hlediska řízení letového provozu, a s tím spojené dodržování minimálních rozstupů. Dále také z provozního a finančního hlediska, kdy je potřeba mít obě dráhy uzpůsobené pro přílety, což znamená vystavění potřebných „rychlodboček“, které urychlují tok provozu.

Kapacita při využívání jedné dráhy pouze pro odlety a druhé pro smíšený provoz dosahuje 74 pohybů za hodinu a zavádí se na letiště, která využívají segregovaný provoz a dochází často k překročení maximální kapacity drah. V tomto případě se při vysokém počtu příletů některé z nich přesměrovávají na dráhu, která je původně využívána pouze pro odlety a to samé se děje při přebytku odletů.

Segregovaný provoz, který se plánuje na LKPR, dosahuje kapacity o něco nižší, a to 72 pohybů za hodinu. Samotní řídicí letového provozu často upřednostňují použití samostatných drah pro přílety a pro odlety. Výhodou je zjednodušení ATM provozu při dodržování minimálních rozstupů, ale jak dokazuje výpočet výše, nejedná se o neoptimálnější řešení z hlediska celkové kapacity letiště.

Poslední použitý režim, kdy jsou obě dráhy využívány pro přílety, ale pouze jedna je určena pro odlety, dosahuje nejmenší kapacity ze všech režimů, a to 65 operací za hodinu.

Výsledek kapacity **72 pohybů** za hodinu pro segregovaný režim na LKPR, který byl vypočten na základě FAA Airfield Capacity modelu, dosahuje takřka stejných hodnot poskytnutých od ŘLP ČR, s.p., kde hodinová kapacita odpovídá 70 pohybům.

## 6. Výhledový provoz a zhodnocení vlivu paralelní dráhy na kapacitu letiště

Po uvedení paralelní dráhy do provozu bude současná dráha použita pro vzlety, zatímco paralelní dráha bude sloužit pouze pro přistání. Z uvedených výpočtů vyplývá, že přínos paralelní dráhy bude zásadní, jelikož kapacita paralelního systému drah vzroste ze stávajících 46 pohybů za hodinu až na 72 pohybů za hodinu při podmínkách VMC a na 69 pohybů za hodinu při podmínkách IMC.

Nárůst kapacity je více jak 50 % původní hodnoty při použití obou drah. Pokud by bylo potřeba zvýšit kapacitu ještě více, musel by být zvolen jiný režim provozu na drahách, jelikož při segregovaném režimu žádné větší nárůsty již nejsou možné. Je to z důvodu dodržování minimálních rozstupů, neboť na pouze příletových a odletových drahách jsou rozstupy mezi letadly větší, než při používání drah při smíšeném provozu, který funguje v režimu přílet – odlet – přílet. Ten je časově efektivnější, protože je mezi příletem a odletem menší časový rozstup, a tudíž jsou rozstupy kratší. Proto je možné při smíšeném režimu dosáhnout až dvojnásobné kapacity původní dráhy. Pro dosažení takovéto kapacity je však potřeba dobře zvolit minimální rozstupy pro sekvence přílet – odlet – přílet. Jelikož je na LKPR plánovaný segregovaný provoz, ŘLP ČR, s.p. poskytlo informace pouze pro tento režim, a proto jsou rozstupy pro výše zmíněné sekvence určeny na základě výchozích hodnot modelu a nejsou konkrétně uzpůsobené pro LKPR, tudíž není výsledná kapacita dvojnásobkem původní dráhy. I přesto nabízí smíšený režim nejvyšší možnou kapacitu ze všech výše zmíněných režimů.

Předpokládá se, že rozvoj letiště nebude mít pouze prospěšný vliv na kapacitu letiště, ale také na ekonomiku nejenom leteckého průmyslu, ale celé České republiky. Vlivem paralelní dráhy dojde ke zvýšení českého hrubého domácího produktu (HDP). Vzniknou nová pracovní místa a dojde ke snížení úrovně nezaměstnanosti a zvýšení příjmové části veřejných rozpočtů. Zvýšení atraktivity pražského letiště prospěje jak rozvoji cestovního ruchu, tak i rozvoji služeb. [1]

Letiště vychází z nejnovějších dat Mezinárodního sdružení letišť, kdy v roce 2018 odbavilo přes 16 milionů cestujících a stalo se tak 5. nejrychleji rostoucím letišťem v Evropě v kategorii 10–25 milionů odbavených cestujících. Dá se navíc předpokládat, že počet obyvatel České republiky využívající leteckou dopravu dále poroste. Výstavba paralelní dráhy je tedy pro letiště Václava Havla nezbytná. Aby byla výstavba vůbec proveditelná, je potřeba modernizovat infrastrukturu letiště a zavést určitá vylepšení, která tento růst podpoří. Tato možná vylepšení však vyžadují pevnou spolupráci mezi organizacemi a zapojení všech zúčastněných stran.



Zlepšení týkající se dráhového systému a ATC postupů a jejich vliv na kapacitu jsou shrnuty v následující tabulce. Nárůst je maximální možný, kterého lze dosáhnout pro specifikovaná doporučení.

**Tabulka 25: Nutná vylepšení pro zvýšení kapacity na LKPR [13]**

Vylepšení	RWY	Součas. stav [pohyby/hod]	Potenciál [pohyby/hod]	Nárůst [pohyby/hod]
Snížit současné radarové rozstupy na minimální radarové rozstupy (3 NM) mezi přílety v sekvenci přílet – přílet	06	28,9	33,6	+4,7
	24	27,1	32,6	+5,5
Snížit ROT pomocí vylepšení procedur (zaměřeno na posádku letadla)	06	28,9	33,6	+4,7
	24	27,1	32,6	+5,5
Snížit ROT pomocí vylepšení letištní infrastruktury	06	28,9	36,2	+7,3
	24	N/A	N/A	N/A
Dosáhnout konzistentního rozstupu 6 NM u příletu-odletu-příletu	06	41,47	45,18	+3,71
	24	41,78	45,57	+3,79
Snížit standardní rozstupy mezi odlety ze 120 s na 90 s	06	25,8	32,4	+6,6
	24	26,8	34,9	+8,1
Snížit standardní rozstupy mezi odlety ze 120 s na 75 s	06	25,8	37,1	+11,3
	24	26,8	39,5	+12,7
Snížit standardní rozstupy mezi odlety ze 120 s na 60 s	06	25,8	41,3	+15,5
	24	26,8	42,4	+15,6

Kromě výše zmíněných vylepšení je také potřeba postavit nové odmrazovací plochy a nový hangár G, který bude umístěn vedle již existujícího hangáru F. Další důležitou stavbou, která se musí realizovat současně s výstavbou paralelní dráhy, je prodloužení budovy Terminálu 2 jižním směrem, jejíž kapacita by byla zvětšena přibližně o dalších 10 gatů. Rozšířený terminál bude znamenat zvýšení počtu stojánek pro letadla ze současných 50 na 75, a také navýšení počtu nástupních mostů. V jeho stávající budově lze do budoucna navýšit počet odbavovacích ostrovů, odbavovacích přepážek i stanovišť bezpečnostní kontroly. Dále se plánuje výstavba tzv. Airport City, tedy výstavba administrativních center, hotelů či parkovacích domů v areálu letiště. Součástí plánu je také kolejové napojení letiště s dalšími částmi města. Po dokončení

plánované modernizace letiště Václava Havla v Praze se kapacita navýší až na 21 miliónů odbavených cestujících ročně. [15]

## 7. Závěr

Hlavní náplní diplomové práce je výpočet kapacit dráhového systému na LKPR, jak pro současnou jednu RWY, tak pro budoucí paralelní systém drah a seznámení se způsoby výpočtu kapacit dráhového systému. V první části práce jsou podrobně vysvětleny pojmy kapacita letiště, kapacita dráhového systému a faktory, které tyto kapacity ovlivňují. Obsahem této části je důkladný popis každého z faktorů a přiblížení způsobu, jakým ovlivňuje a omezuje kapacitu letiště. Také jsou zde zmíněny předpoklady pro maximální kapacitu letiště.

Následující část práce se věnuje samotné paralelní dráze 06R/24L. Je zde zmíněn stručný historický vývoj letiště od vystavění první dráhy až po nezbytnost vybudování nové paralelní dráhy. Dále jsou zde popsány výhody dráhy, které nesouvisí pouze se zvýšením kapacity, umístění dráhy a její technické parametry. Kapacitní parametry spolu s vybavením provozních ploch a plánovaným provozem s paralelní dráhou jsou také součástí této kapitoly. Je zde probrána i problematika pojezdových drah a počtu nájezdů či výjezdů na/z dráhy.

Další kapitola se zabývá způsoby výpočtu kapacit dráhového systému. Jsou zde popsány jak jednodušší matematické modely určené pouze pro výpočet kapacity jedné RWY, tak i složitější počítačové modely a simulace, které se používají pro výpočet kapacit u dráhového systému několika drah. Z matematických modelů je detailně objasněn teoretický princip metody Alfreda Blumsteina, pomocí kterého lze odhadnout kapacitu dráhového systému s jednou RWY používanou výhradně pro přílety. Stejný postup lze však snadno aplikovat i na dráhy používané pouze pro odlety nebo na dráhy se smíšeným provozem. Také je v této kapitole zmíněn Capacity Handbook Approach, neboli příručka vydaná pro FAA pro účely plánování letišť. Příručka na základě tzv. mix indexu pouze odhaduje předpokládanou hodinovou kapacitu, a proto je vhodná jen pro předběžné analýzy kapacity.

Kromě jednoduchých matematických metod se práce věnuje i počítačovým modelům a simulacím, které jsou vyvinuty pro přesnější určování kapacity, a umožňují tak určit kapacitu v závislosti na provozních podmínkách. Modely se rozdělují do dvou základních skupin, na makroskopické a mikroskopické, a to na základě flexibility, adaptability nebo použité metodologie. Mezi mikroskopické patří SIMMOD, TAAM, RAMS a HERMES. Poslední tři zmíněné modely jsou schopné provádět i trojrozměrné simulace. Mezi makroskopické modely se řadí LMI Runway Capacity Model, DELAYS, AND a FAA Airfield Capacity Model, který je v práci podrobně popsán, jelikož slouží k výpočtu kapacity pro paralelní dráhy. FAA Airfield

Capacity Model je počítačový program, jehož výstupem je hodinová kapacita letiště spočtená na základě daných vstupních údajů, které jsou pro každé letiště specifické.

Hlavní částí práce je samotný výpočet kapacit dráhového systému. Nejdříve je spočtena kapacita současného dráhového systému, a dále následuje výpočet kapacity paralelních drah. Pro usnadnění výpočtu kapacity jedné dráhy pomocí Blumsteinovy metody je zhotoven program v Matlabu. Tento program je možné použít pro jakékoli letiště operující na jedné dráze. Po vložení potřebných hodnot k výpočtu vyšla výsledná kapacita dráhy sloužící pouze pro přistání 36 pohybů za hodinu. Kapacita dráhy sloužící pouze pro odlety činí 58 odletů za hodinu. A kapacita dráhy pro smíšený provoz, tedy kapacita současné dráhy na letišti Václava Havla v Praze, činí 47 pohybů za hodinu. Tento výsledek odpovídá informaci získané přímo z letiště, která udává, že počet provozovaných pohybů za hodinu opravdu odpovídá 47 pohybům.

Pro výpočet kapacity paralelních drah je potřeba dosadit potřebné hodnoty do FAA Airfield Capacity Modelu. Tyto hodnoty jsou vloženy na základě informací poskytnutých výhradně pro tuto práci od ŘLP ČR, s.p. V práci jsou všechny vstupy podrobně popsány spolu s obrázky, které dané vstupy zobrazují v modelu s aktuálními hodnotami. Výstupem je tabulka, která zobrazuje hodinovou kapacitu letiště. Kapacita paralelních drah je spočtena pro čtyři scénáře – segregovaný provoz, smíšený provoz, jedna dráha pouze odlety, druhá smíšený provoz a jedna dráha pouze přílety a druhá smíšený provoz. V případě provozu paralelních drah na LKPR je počítáno se segregovaným provozem, tedy s odlety z jedné dráhy a s přílety na dráhu druhou. Výsledná kapacita segregovaného režimu odpovídá 72 pohybům za hodinu a dosahuje takřka stejných hodnot poskytnutých od ŘLP ČR, s.p., kde hodinová kapacita odpovídá 70 pohybům.

Z uvedeného vyplývá, že přínos paralelní dráhy bude zásadní, ať už z kapacitního hlediska, kdy kapacita dráhového systému vzroste ze stávajících 46 pohybů na 72 pohybů za hodinu, nebo z ekonomického hlediska, kdy díky nové dráze dojde ke zvýšení českého hrubého domácího produktu (HDP) a ke vzniku nových pracovních míst. Na základě toho dojde ke snížení úrovně nezaměstnanosti a zvýšení příjmové části veřejných rozpočtů. Nezanedbatelným důsledkem bude i to, že se zvýší atraktivita pražského letiště, což prospěje jak rozvoji cestovního ruchu, tak i rozvoji služeb.

## 8. Literatura

[1] LETIŠTĚ PRAHA. *Prague Airport: Paralelní dráha* [online]. Praha. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://www.prg.aero/paralelni-draha>

[2] KERNER, L., V. SÝKORA a L. KULČÁK. *Provozní aspekty letišť*. Vydavatelství ČVUT. Praha, 2003, 270 s. ISBN 80-010-2841-0. [cit. 2019-01-16]

[3] ŽIHLA, Z. a kol. *Provozování podniků letecké dopravy a letišť*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2010, 301 s. ISBN 978-80-7204-677-5. [cit. 2019-04-12]

[4] DE NEUFVILLE, R. a A. R. ODONI. *Airport systems - planning, design and management*. McGraw – Hill Education. New York, 2003, 883 p. ISBN 0-07-138477-4. [cit. 2019-01-24]

[5] ÚŘAD PRO CIVILNÍ LETECTVÍ. *Letecký předpis: letiště L14*. 641/2009-220-SP/4 [online]. Praha, 2016. [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: [https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-14/data/print/L-14\\_cely.pdf](https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-14/data/print/L-14_cely.pdf)

[6] *Posudek EIA paralelní RWY 06R/24L* – Stanovisko k posouzení vlivů provedení záměru na životní prostředí podle zákona č. 100/2001 Sb. v platném znění. Praha, 2009. [cit. 2019-02-16]

[7] ČT24. *Letiště Praha získalo kladný posudek na novou dráhu* [online]. Praha, 2011. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/ekonomika/1235998-letiste-praha-ziskalo-kladny-posudek-na-novou-drahu>

[8] WEB AFC. *Aviation Fun Club* [online]. Praha. [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: [http://www.aviation-fan-club.com/paralelni\\_draha.htm](http://www.aviation-fan-club.com/paralelni_draha.htm)

[9] ASHFORD, N., S. MUMAYIZ a P. H. WRIGHT. *Airport Engineering: Planning, Design and Development of 21st Century Airports*. John Wiley & Sons, 4th Edition. New York, 2011, 768 p. ISBN 978-0-470-39855-5. [cit. 2019-04-10]

[10] RECAT-EU. *European Wake Turbulence Categorisation and Separation Minima on Approach and Departure* [online]. Eurocontrol. Brusel, 2018. [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/sesar/recat-eu-released-september-2018.pdf>

- [11] MODELING RESEARCH UNDER NASA/AATT. *Existing and Required Modeling Capabilities for Evaluating ATM Systems and Concepts*. International center for air transportation. Massachusetts institute of technology, březen 1997. [cit. 2019-04-16]
- [12] AIRPORT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM. *Report 79, Evaluating Airfield Capacity, Appendix A, Prototype Airfield Capacity Spreadsheet Model*. National Academy of Sciences. Washington, 2012. ISBN 978-0-309-25873-9. [cit. 2019-05-02]
- [13] PRAGUE AIRPORT, AIR NAVIGATION SERVICES OF THE CZECH REPUBLIC A EUROCONTROL. *Prague Ruzyně Airport, Runway Capacity Study*. Praha, únor 2016. [2019-05-10]
- [14] PRAGUEAIRPOT.CO.UK. *Airport Parallel Runway* [online]. 2018. [cit-2019-05-20].  
Dostupné z: <https://www.pragueairport.co.uk/airport-parallel-runway/>
- [15] IDNES.CZ. *Ruzyni čeká obří expanze za 27 miliard. Přibude ranvej, zvětší se terminál* [online]. Praha, 5. duben 2017. [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/ekonomika/doprava/letiste-ruzyne-modernizace.A170405\\_130625\\_eko-doprava\\_rts](https://www.idnes.cz/ekonomika/doprava/letiste-ruzyne-modernizace.A170405_130625_eko-doprava_rts)
- [16] CURRAN. R. *Air Transport and Operations*. Delft University of Technology. IOS Press, Nizozemsko, červen 2012. ISBN 978-1-61499-119-9. [cit. 2019-05-13]
- [17] MATHWORKS. *Matlab* [online]. The MathWorks, Inc. 2019. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/help/matlab/>
- [18] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Airport Software Detail, FAARfield 1.42* [online]. Washington, září 2017. Dostupné z: <https://www.airporttech.tc.faa.gov/Products/Airport-Pavement-Software-Programs/Airport-Software-Detail/ArtMID/3708/ArticleID/4/FAARFIELD-142>

## 9. Seznam obrázků

Obrázek 1: Subsystémy letiště [1]

Obrázek 2: Využití kapacity při segregovaném provozu [3]

Obrázek 3: Využití kapacity při smíšeném provozu [3]

Obrázek 4: Využití kapacity při polosmíšeném příletovém provozu [3]

Obrázek 5: Využití kapacity při polosmíšeném odletovém provozu [3]

Obrázek 6: Plánovaný paralelní dráhový systém na LKPR [7]

Obrázek 7: Náskres situace konečného přiblížení na přistání [4]

Obrázek 8: Diagram pro určení hodinové kapacity jedné RWY za VFR podmínek [9]

Obrázek 9: Analýza kapacit dle konfigurace RWY [9]

Obrázek 10: „INTRO“ list [12]

Obrázek 11: List dráhových konfigurací [12]

Obrázek 12: Část vyhledávací tabulky zobrazující jednotlivé konfigurace dráhy [12]

Obrázek 13: Titulek konfigurace dráhy v daném modelu se scénářem 1 [12]

Obrázek 14: Osm scénářů paralelních drah [12]

Obrázek 15: Program v Matlabu pro výpočet kapacit [vlastní zpracování]

Obrázek 16: Popis první části programu [vlastní zpracování]

Obrázek 17: Popis druhé části programu [vlastní zpracování]

Obrázek 18: FAA Arfield Capacity Model [12]

Obrázek 19: První část obecných vstupů [vlastní zpracování]

Obrázek 20: Vstupy modelu týkající se složení letadel [vlastní zpracování]

Obrázek 21: Vstupy týkající se podmínek na letišti [vlastní zpracování]

Obrázek 22: Pokročilé vstupy modelu [vlastní zpracování]

Obrázek 23: Minimální rozstupy mezi přílety [vlastní zpracování]

Obrázek 24: Minimální rozstupy mezi odlety [vlastní zpracování]

Obrázek 25: Tabulka výstupu modelu [vlastní zpracování]

Obrázek 26: Kapacita segregovaného provozu [vlastní zpracování]

Obrázek 27: Kapacita při využívání jedné dráhy pouze pro odlety a druhé pro smíšený provoz [vlastní zpracování]

Obrázek 28: Kapacita při využívání jedné dráhy pouze pro přílety a druhé pro smíšený provoz [vlastní zpracování]

Obrázek 29: Kapacita smíšeného provozu [vlastní zpracování]

## 10. Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení letadel podle kategorie turbulence v úplavu [4]

Tabulka 2: Minimální rozstupy mezi letadly (v NM) [4]

Tabulka 3: Minimální rozstupy mezi odlétávajícími letadly (v sekundách) [4]

Tabulka 4: Minimální rozstupy na paralelních drahách [4]

Tabulka 5: Minimální podélné rozstupy mezi dvěma letadly v konečné části přiblížení (v NM) [4]

Tabulka 6: Minimální rozstupy mezi dvěma následnými odlety (v sekundách) [4]

Tabulka 7: Třídy letadel s jednotlivými příklady [12]

Tabulka 8: Vzdálenosti os paralelních drah za podmínek VMC a IMC [12]

Tabulka 9: Letadla vyskytující se během dne na letišti v Praze (říjen) [vlastní zpracování]

Tabulka 10: Letadla vyskytující se během dne na letišti v Praze (duben) [vlastní zpracování]

Tabulka 11: Jednotlivé třídy letadel s jejich parametry [vlastní zpracování]

Tabulka 12: Minimální podélné rozstupy v úseku konečného přiblížení (v NM) [4]

Tabulka 13: Matice  $T_{ij}$  minimálních časových intervalů [vlastní zpracování]

Tabulka 14: Matice minimálních časových intervalů opravených o konstantu  $b$  [vlastní zpracování]

Tabulka 15: Matice pravděpodobnosti výskytu – přílety [vlastní zpracování]

Tabulka 16: Pravděpodobnosti výskytu [vlastní zpracování]

Tabulka 17: Minimální rozstupy mezi dvojicí odlétávajících letadel (v sekundách) [4]

Tabulka 18: Matice pravděpodobnosti výskytu – odlety [vlastní zpracování]

Tabulka 19: Klasifikační třídy vyskytující se na letišti v Praze [vlastní zpracování]

Tabulka 20: Procentuální zastoupení letadel na letišti v Praze [vlastní zpracování]

Tabulka 21: Kapacita pro segregovaný režim [vlastní zpracování]

Tabulka 22: Kapacita při využívání jedné dráhy pouze pro odlety a druhé pro smíšený provoz [vlastní zpracování]

Tabulka 23: Kapacita při využívání jedné dráhy pouze pro přílety a druhé pro smíšený provoz [vlastní zpracování]

Tabulka 24: Kapacita pro smíšený režim [vlastní zpracování]

Tabulka 25: Nutná vylepšení pro zvýšení kapacity na LKPR [13]



## 11. Přílohy

### 11.1 Příloha A - Skript k modelu v Matlabu

```
function varargout = untitled(varargin)
% UNTITLED MATLAB code for untitled.fig
%     UNTITLED, by itself, creates a new UNTITLED or raises the
%     existing
%     singleton*.
%
%     H = UNTITLED returns the handle to a new UNTITLED or the handle
%     to
%     the existing singleton*.
%
%     UNTITLED('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the
%     local
%     function named CALLBACK in UNTITLED.M with the given input
%     arguments.
%
%     UNTITLED('Property','Value',...) creates a new UNTITLED or
%     raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value
%     pairs are
%     applied to the GUI before untitled_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property
%     application
%     stop. All inputs are passed to untitled_OpeningFcn via
%     varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows
%     only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help untitled

% Last Modified by GUIDE v2.5 11-Jan-2019 11:35:34

% Begin initialization code - DO NOT EDIT

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @untitled_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @untitled_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
```

```

else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before untitled is made visible.
function untitled_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to untitled (see VARARGIN)

% Choose default command line output for untitled
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
set(handles.text9, 'BackgroundColor', [0.85 0.2 0.2]);
set(handles.text10, 'BackgroundColor', [0.85 0.2 0.2]);
set(handles.text11, 'BackgroundColor', [0.85 0.2 0.2]);
set(handles.text12, 'BackgroundColor', [0.85 0.2 0.2]);
set(handles.text13, 'BackgroundColor', [0.85 0.2 0.2]);
set(handles.text27, 'BackgroundColor', [0.85 0.2 0.2]);
set(handles.text26, 'BackgroundColor', [0.85 0.2 0.2]);
set(handles.text18, 'BackgroundColor', 'blue');

DataT1={ 0.03  77.1  79;
         0.94  66.82  68;
         0.03  56.54  56;
         0.0  46.24  38};

DataT2={4 5 6 6;
        3 3 5 5;
        3 3 3 3;
        3 3 3 3};

DataT3={' ' ' ' ' ' ' ';
        ' ' ' ' ' ' ' ';
        ' ' ' ' ' ' ' ';
        ' ' ' ' ' ' ' '};

DataT4={' ' ' ' ' ' ' ';
        ' ' ' ' ' ' ' ';
        ' ' ' ' ' ' ' ';
        ' ' ' ' ' ' ' '};

set(handles.uitable1, 'Data', DataT1);
set(handles.uitable2, 'Data', DataT2);
set(handles.uitable3, 'Data', DataT3);
set(handles.uitable4, 'Data', DataT4);

CalcAll(handles);

```

```

function varargout = untitled_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function r_Callback(hObject, eventdata, handles)
Value=get(hObject, 'String');
if isnan(str2double(Value))
    set(handles.text9, 'BackgroundColor', [0.85 0.2 0.2]);
else
    set(handles.text9, 'BackgroundColor', 'blue');
end

function sij_Callback(hObject, eventdata, handles)
Value=get(hObject, 'String');
if isnan(str2double(Value))
    set(handles.text10, 'BackgroundColor', [0.85 0.2 0.2]);
else
    set(handles.text10, 'BackgroundColor', 'blue');
end

function vi_Callback(hObject, eventdata, handles)
Value=get(hObject, 'String');
if isnan(str2double(Value))
    set(handles.text11, 'BackgroundColor', [0.85 0.2 0.2]);
else
    set(handles.text11, 'BackgroundColor', 'blue');
end

function vj_Callback(hObject, eventdata, handles)
Value=get(hObject, 'String');
if isnan(str2double(Value))
    set(handles.text12, 'BackgroundColor', [0.85 0.2 0.2]);
else
    set(handles.text12, 'BackgroundColor', 'blue');
end

function oi_Callback(hObject, eventdata, handles)
Value=get(hObject, 'String');
if isnan(str2double(Value))
    set(handles.text13, 'BackgroundColor', [0.85 0.2 0.2]);
else
    set(handles.text13, 'BackgroundColor', 'blue');
end

```

```

function B_Callback(hObject, eventdata, handles)

Value=get(hObject, 'String');
if isnan(str2double(Value))
    set(handles.text18, 'BackgroundColor', [0.85 0.2 0.2]);
else
    set(handles.text18, 'BackgroundColor', 'blue');
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
r=str2double(get(handles.r, 'String'));
sij=str2double(get(handles.sij, 'String'));
vi=str2double(get(handles.vi, 'String'));
vj=str2double(get(handles.vj, 'String'));
oi=str2double(get(handles.oi, 'String'));
b=str2double(get(handles.B, 'String'));

if isnan(vi) || isnan(vj) || isnan(r) || isnan(oi) ||...
    isnan(sij) || isnan(b)

    disp('Wrong')
    set(handles.T, 'String', 'Cant perform calculation');
    set(handles.Tall, 'String', 'tij = ???')
    errordlg('Vše musí být zadané', 'Error', 'modal');

else

    disp('OK')
    if vi<=vj
        Tij=max([(sij/vj);oi]);
        display((sij/vj));
    else
        Tij=max([(r+sij)/vj)-(r/vi);oi]);
    end
end

```

```

        set(handles.T,'String',['Tij + B = ', num2str(Tij),' + ',
num2str(b)])
        set(handles.Tall,'String',['tij = ', num2str(Tij+b)])
        Value=get(hObject,'String');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function oi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,...
    'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function r_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,...
    'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function sij_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,...
    'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function vi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,...
    'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function vj_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,...
    'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function B_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,...

```

```

        'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

% --- Executes when entered data in editable cell(s) in uitable1.
function uitable1_CellEditCallback(hObject, eventdata, handles)
CalcAll(handles);

% --- Executes when entered data in editable cell(s) in uitable2.
function uitable2_CellEditCallback(hObject, eventdata, handles)

DataT2=get(handles.uitable2, 'Data');
DataT2(~cellfun(@isnumeric, DataT2(:))) = {NaN};
DataT2=cell2mat(DataT2).*1852;

display(DataT2)

% --- Executes when entered data in editable cell(s) in uitable3.
function uitable3_CellEditCallback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes when entered data in editable cell(s) in uitable4.
function uitable4_CellEditCallback(hObject, eventdata, handles)

function editNM_Callback(hObject, eventdata, handles)

number=str2double(get(hObject, 'String'))*1852;
set(handles.text20, 'String', ['NM is ', num2str(number), ' m']);
Value=get(hObject, 'String');
if isnan(str2double(Value))
    set(handles.text26, 'BackgroundColor', [0.85 0.2 0.2]);
else
    set(handles.text26, 'BackgroundColor', 'blue');
end
% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function editNM_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to editNM (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
            called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'), get(0, ...
    'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

```

```

function editM_Callback(hObject, eventdata, handles)
number=str2double(get(hObject,'String'))/1852;
set(handles.text21,'String',['m is ', num2str(number), ' NM']);
Value=get(hObject,'String');

if isnan(str2double(Value))
    set(handles.text27,'BackgroundColor',[0.85 0.2 0.2]);
else
    set(handles.text27,'BackgroundColor','blue');
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function editM_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to editM (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
    called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,...
    'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function CalcAll(handles)

DataT1=get(handles.uitable1,'Data');
DataT1(~cellfun(@isnumeric,DataT1(:))) = {NaN};
DataT1=cell2mat(DataT1);

DataT2=get(handles.uitable2,'Data');
DataT2(~cellfun(@isnumeric,DataT2(:))) = {NaN};
DataT2=cell2mat(DataT2).*1852;

display(DataT2)

Tij=[];
pij=[];

for i=1:4
    for j=1:4

        vi=DataT1(i,2);
        vj=DataT1(j,2);

        if vi<=vj
            Tij(i,j)=max([(DataT2(i,j)/vj); DataT1(i,3)]);
        else

```

```

        Tij(i,j)=max([(9260+DataT2(i,j))/vj)-(9260/vi);
DataT1(i,3)]);
    end

    pij(i,j)=DataT1(i,1)*DataT1(j,1);

end
end

set(handles.uitable3,'Data',Tij);

if get(handles.checkbox2,'Value')==1
set(handles.uitable4,'Data',pij.*Tij);
else
set(handles.uitable4,'Data',pij);
end

display(['hello ', num2str(sum(sum(pij.*(Tij+10))))])

set(handles.textE,'String', ['E[Tij] = ',
    num2str(sum(sum(pij.*(Tij+10)))
    ),... ' s']);
set(handles.textn,'String', ['n = ',...
    num2str( (3600/( sum(sum(pij.*(Tij+10)))))]);

% --- Executes on button press in checkbox2.
function checkbox2_Callback(hObject, eventdata, handles)
CalcAll(handles);

% --- Executes on button press in Save.
function Save_Callback(hObject, eventdata, handles)

filter = {'*.xls'; '*.xlsx'};

[file, path] = uiputfile(filter);

try

    if file==0

    else
        DataT1 = get(handles.uitable1,'Data');
        DataT2 = get(handles.uitable2,'Data');
        DataT3 = get(handles.uitable3,'Data');
        DataT4 = get(handles.uitable4,'Data');
    end
end

```



```

    Tabs(1,:)={' ' ' ' ' ' ' '};
    Tabs(1,3:end)=get(handles.uitable1,'ColumnName')
    ; Tabs(2:5,1)=get(handles.uitable1,'RowName');
    Tabs(2:5,3:5)=DataT1;

    Tabs(6,:)={' ' ' ' ' ' ' '};
    Tabs(7,:)={' ' ' ' ' ' ' '};
    Tabs(7,2:end)=get(handles.uitable2,'ColumnName')
    ; Tabs(7,1)={'Sij'};
    Tabs(8:11,1)=get(handles.uitable2,'RowName')
    ; Tabs(8:11,2:end)=DataT2;
    Tabs(12,:)={' ' ' ' ' ' ' '};
    Tabs(13,:)={' ' ' ' ' ' ' '};
    ; Tabs(13,1)={'Tij'};
    Tabs(13,2:end)=get(handles.uitable3,'ColumnName')
    );
    Tabs(14:17,1)=get(handles.uitable3,'RowName');
    Tabs(14:17,2:end)=num2cell(DataT3);
    Tabs(18,:)={' ' ' ' ' ' ' '};
    Tabs(19,:)={' ' ' ' ' ' ' '};
    ; Tabs(19,1)={'Pij'};
    Tabs(19,2:end)=get(handles.uitable4,'ColumnName')
    );
    Tabs(20:23,1)=get(handles.uitable4,'RowName');
    Tabs(20:23,2:end)=num2cell(DataT4);
    Tabs(24,:)={' ' ' ' ' ' ' '};
    Tabs(25,:)={' ' ' ' ' ' ' '};
    Tabs(26,1)={get(handles.textE,'String')}
    ;
    Tabs(27,1)={get(handles.textn,'String')}
    ;

    display(Tabs)
    xlswrite([path,file],Tabs)
    ; end

catch Error
    errordlg('Something is wrong','Error - Saving problem','modal');
end

```

DataT2 =

7408	9260	11112	11112
5556	5556	9260	9260
5556	5556	5556	5556
5556	5556	5556	5556

hello 88.0613

untitled

### SINGLE RUNWAY LANDING CAPACITY

**Tij**

R:  ■

Sij:  ■

Vi:  ■

Vj:  ■

Oi:  ■

B:  ■

---

**NM to m**

NM is 0 m ■

m is 0 NM ■

**Panel**

	p (%)	v (kt)	o (s)
H	0.0300	77.1000	60
M	0.9400	66.8200	47
L1	0.0300	56.5400	30
L2	0	46.2400	30

	H	M	L1	L2
H	4	5	6	6
M	3	3	5	5
L1	3	3	3	3
L2	3	3	3	3

	H	M	L1	L2
H	96.0830	157.0588	240.2075	320.4672
M	72.0623	83.1488	188.9744	261.9378
L1	72.0623	83.1488	98.2667	156.6374
L2	72.0623	83.1488	98.2667	120.1557

	H	M	L1	L2
H	0.0865	4.4291	0.2162	0
M	2.0322	73.4702	5.3291	0
L1	0.0649	2.3448	0.0884	0
L2	0	0	0	0

Show Pij or Pij \* Tij

E[Tij] = 88.0613 s      n = 40.8806

Designed and programmed by: Šárka Hájková and Vladimír Socha

*Published with MATLAB® R2016b*