



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

NÁVRH METOD NA HODNOCENÍ KAPACIT LETIŠTNÍCH SUBSYSTÉMŮ

DESIGN OF ASSESSMENT METHODS FOR AIRPORT SUBSYSTEM CAPACITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAROSLAV LONDA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR VESELÝ

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jaroslav Londa

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Letecký provoz (3708T011)**

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

Návrh metod na hodnocení kapacit letištních subsystémů

v anglickém jazyce:

Design of assessment methods for airport subsystem capacity

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kapacitní problematika letišť je velmi široký pojem. Hovoříme – li o kapacitě letiště jako celku, musíme brát v potaz kapacity veškerých subsystémů podílejících se na procesu. Požadavek na propustnost systému se mění v čase podle poptávky prvků využívající systém. Tomu se v dopravě i všeobecně říká špičkové a sedlové časy. Zamyslíme – li se nad aplikací pro letiště, dojedeme k závěru, že jednotlivé subsystémy budou mít své špičkové a sedlové hodiny v průběhu dne v jiných hodinách. Například odbavovací přepážky cestujících budou mít špičku v jiný čas než kupříkladu vzletová a přistávací dráha. Proto je třeba, především z ekonomických důvodů, plánovat a koordinovat kapacitní vytížení jednotlivých subsystémů v průběhu různých časových period (den, týden, období letního nebo zimního letového řádu, atd.)

Zpracování diplomové práce si klade za cíl zmapování fungování letiště a jeho subsystémů z kapacitního hlediska a seznámení se se současnými metodami hodnocení kapacity. Dále si pak klade za cíl zpracování praktického příkladu v příslušném simulačním prostředí na modelu vybraného subsystému, analýzu výsledků a navržení možných metod na posuzování kapacity vybraného subsystému.

Cíle diplomové práce:

- Analýza současných metod hodnocení kapacity letiště
- Sestavení modelu vybraného subsystému letiště v simulačním prostředí
- Analýza výsledků simulací
- Návrh možných metod hodnocení kapacity vybraného subsystému

Seznam odborné literatury:

- [1] Ministerstvo dopravy ČR, Úřad pro civilní letectví. Letecký předpis L14: Letiště Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2009
- [2] KERNER, L., KULČÁK L., SÝKORA V.: Provozní aspekty letišť, Vydavatelství ČVUT, vydáno v Praze 2003, ISBN 80-01-02841-0
- [3] VESELÝ, P.: Kapacita nástupního gatu v závislosti na stání odbavovací plochy. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, 2007. 76 s. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Kerner
- [4] DE NEUFVILLE, R., ODoni, A.: Airport systems – planning, design and management. New York: McGraw – Hill, 2003. 883p. ISBN 0-07-138477-4

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Veselý

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 16.11.2012

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Práce pojednává o kapacitě letištních subsystémů a popisuje různé metody hodnocení kapacity včetně faktorů, které ji ovlivňují. První část obsahuje teoretický rozbor způsobů hodnocení letištních subsystémů, především dráhového systému a terminálu. Praktická část se zabývá experimentováním v simulačním programu Visual Simmod. Cílem těchto experimentů je vyhodnotit vliv daných faktorů na provoz dráhového systému a jak se mění průběh zpoždění v závislosti na kapacitě. Na závěr jsou analyzovány všechny výsledky simulací včetně grafického znázornění.

Klíčová slova

Kapacita, letiště, simulační experiment, dráhový systém, zpoždění, hodnocení, Visual Simmod

Abstract

This thesis discusses the capacity of airport subsystems and describes various assessment methods of capacity including factors that affect it. The first part contains theoretical analysis of assessment methods for airport subsystems especially runway and terminal. The practical part deals with experimentation using the simulation software Visual Simmod. The objective of these experiments is to evaluate the effect of certain factors to runway operations and observe the change of aircraft delay over the capacity. In the end all simulation results are analyzed and shown in graphs.

Key words

Capacity, airport, simulation experiment, runway system, delay, assessment, Visual Simmod

Bibliografická citace

LONDA, J. *Návrh metod na hodnocení kapacit letištních subsystémů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Veselý.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci na zadané téma jsem vypracoval samostatně s použitím veškerých uvedených literárních pramenů a jiných zdrojů pod vedením vedoucího práce pana Ing. Petra Veselého.

V Brně dne 22. 5. 2013

.....

Bc. Jaroslav Londa

Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval panu Ing. Petru Veselému za cenné rady a připomínky při zpracování diplomové práce.

Obsah

1	Úvod	10
2	Struktura dopravního letiště	11
2.1	Rozdělení letišť	11
2.2	Subsystemy letiště.....	12
2.2.1	Neveřejná zóna letiště.....	13
2.2.2	Veřejná zóna letiště	13
2.3	Organizační struktura letiště	14
3	Kapacitní problematika letišť	15
3.1	Kapacita provozních ploch	17
3.1.1	Kapacita dráhového systému	17
3.1.2	Faktory ovlivňující kapacitu dráhového systému.....	18
3.1.3	Předpoklady pro maximální kapacitu	22
3.1.4	Metody pro výpočet kapacity dráhového systému	22
3.1.5	Počítačové modely a simulace.....	27
3.1.6	Kapacita pojezdového systému	28
3.1.7	Kapacita stojánek na odbavovací ploše	29
3.2	Kapacita letištního terminálu	29
3.2.1	Subsystemy terminálu a jejich kapacita	31
3.2.2	Úroveň služeb letištních subsystémů.....	33
3.2.3	Výpočtové metody.....	38
3.2.4	Příklady stanovení kapacity subsystémů letiště	40
3.3	Letištní sloty a slotová koordinace	43
3.3.1	Kategorie letišť	44
3.3.2	Proces přidělování slotů	44
3.3.3	Pravidla pro přidělování slotů	45
4	Hodnocení kapacity dráhového systému v simulačním prostředí	47
4.1	Simulační prostředí Visual SIMMOD	47
4.2	Tvorba modelu.....	49
4.3	Simulační experiment	52
4.3.1	Plánování experimentu – metoda DOE	52

4.3.2	Hodnocení vlivu faktorů na kapacitu RWY	54
4.3.3	Hodnocení kapacity RWY a zpoždění letadel	56
4.4	Analýza výsledků.....	58
4.4.1	Analýza vlivu faktorů na kapacitu RWY	58
4.4.2	Analýza kapacity RWY a zpoždění letadel	61
5	Závěr.....	66
	Seznam použité literatury	69
	Seznam použitých zkratk	71
	Seznam příloh	72

1 Úvod

Letecká doprava představuje v dnešní době stále více využívaný druh přepravy osob a věcí a to hlavně díky její rychlosti, komfortu a bezpečnosti. Není to tak dávno, co si mohli letenku zakoupit pouze lidé z vyšší společnosti. Ovšem právě díky rychlému vzestupu, kdy se objevovaly stále nové letecké společnosti, narůstala konkurence a tak se cena stala přijatelnější pro větší okruh lidí a na množství přepravených cestujících se to razantně projevilo. Společně se tedy se zvyšujícím počtem zájemců o leteckou dopravu zvyšoval také počet linek, letů a destinací, až došlo k problému, kterému se dnes čelí. Tím problémem je omezená kapacita vzdušného prostoru a s tím spojená kapacita letišť.

Omezená kapacita vzdušného prostoru je převážně problémem evropského kontinentu. Dochází k přesycení a možnost zavádění nových leteckých tras bývá komplikovaná. Kapacitu letišť naproti tomu řeší převážně v USA a na některých velkých evropských letištích.[8] Jelikož je letiště rozděleno na několik subsystémů, nehodnotí se pouze kapacita letiště jako celku, ale každý z těchto subsystémů má svoji hranici maximální kapacity. Proto se např. u kapacity provozních ploch počítá s množstvím pohybů letadel, kdežto u kapacity terminálu s množstvím odbavených cestujících, popř. nákladu a zavazadel. Obecně se tyto pohyby vztahují na jednotku času. Hlavním ukazatelem tak je množství pohybů (letadel, cestujících) uskutečněných za jednu hodinu, den či rok. Každá část letiště má stanovenou svou kapacitu a nejslabší z těchto částí (z kapacitního hlediska) pak určuje celkovou kapacitu letiště.

Hlavním úkolem letiště je kompletní odbavení při příletech i odletech a to ve všech možných časových obdobích. Každé dopravní letiště má své provozní špičky, které jsou proměnlivé s roční dobou, dnem v týdnu nebo i určitou hodinou. Například letiště v přímořských letoviscích mají své provozní špičky obvykle v letních měsících díky velkému zájmu cestujících o tyto destinace. Vyšší přepravní výkony mohou být taktéž zaznamenány při různých význačných událostech. V kratším období jsou pak rozlišovány špičkové a sedlové hodiny. Veškerá letištní zařízení musí být tedy schopna odbavení v těchto špičkových časech, aniž by docházelo k výraznějšímu překročení kapacity. Následkem tohoto překročení pak bývají zpoždění, které má vliv nejen na časech odletů a příletů, ale také na kvalitě služeb, které jsou na letišti poskytovány.

Tato práce se tedy zabývá metodami hodnocení kapacit letištních subsystémů, díky čemuž nahlédneme do problematiky udržování dopravních toků, bezpečnosti a zvyšování kvalit služeb v závislosti na různých faktorech, které přímo či nepřímo ovlivňují kapacitu letiště a jeho správný chod.

Nakonec si klade za cíl vypracování příkladu v simulačním prostředí a návrhu možných metod využití simulačních experimentů.

2 Struktura dopravního letiště

Základní definici letiště udává předpis L14, jenž je českým výkladem Annexu 14 organizace ICAO. Je definováno jako: „Vymezená plocha na zemi nebo na vodě (včetně budov, zařízení a vybavení), určená buď zcela, nebo zčásti pro přílety, odlety a pozemní pohyby letadel.“[1]

Předpis L14 dále definuje veškeré fyzické vlastnosti, plochy, překážky, vybavení a různé služby, které jsou na letišti vyžadovány. Cílem veškerých pravidel a požadavků však není řídit a nějakým způsobem omezovat provoz.

Letiště představuje neodmyslitelnou součást veškerých procesů v civilním i vojenském letectví. Pro cestující využívající leteckou dopravu je to místo posledního kontaktu se zemí při odletu a první místo kam zavítá v cílové destinaci. Proto se neustále usiluje o to, aby kvalita služeb a provozu na letišti neustále stoupala. Pro provozovatele a firmy pak letiště nabízí možnost podnikání v atraktivním prostředí, stejně tak i pro lidi hledající zaměstnání v tomto oboru. Na letiště a jeho provoz jsou však kladeny vysoké požadavky, zejména v rámci bezpečnosti a spolehlivosti, technického zázemí a vybavení, životního prostředí, finančního zajištění a schopnosti provozovatelů poskytovat požadované služby s určitou efektivností a s ekonomickým uvážením.

Budoucí rozvoj ovšem není až tak snadné předvídat. Je sice téměř jisté, že technologie projdou řadou modernizací, vlády a jiné organizace se budou nadále snažit o prosazení svých vlastních pravidel a nařízení pro zvýšení efektivnosti provozu, ale nakonec bude v rozvoji bránit například samotná kapacita letištních systémů i samotného vzdušného prostoru.

V Evropě je v dnešní době vzdušný prostor z velké části nasycen. Dokud tedy nedojde k zavedení nových systémů a letových postupů, může mít tento problém vliv i na kapacitu letištních subsystémů. Velké ambice pro navyšování kapacity mají oblasti Asie a Dálného a Středního Východu, a to z důvodu velkého rozvoje letecké dopravy.

2.1 Rozdělení letišť

Letiště je možné rozdělit na základě nejrůznějších charakteristik a parametrů. V České republice je rozdělení následující:

- **Dle druhu vybavení a podmínek** – vnitrostátní
 - mezinárodní (s vnitřní nebo s vnější hranicí)
- **Podle charakteru letiště a druhu uživatele** – civilní (veřejné, neveřejné)
 - vojenské
 - smíšené

Další možností je rozdělení na základě výkonnosti a to převážně podle počtu cestujících odbavených za jeden rok. Následují za sebou v tomto pořadí[5]:

- **Hlavní letiště** – více než 25 milionů cestujících ročně
- **Národní letiště** – 10 až 25 milionů cestujících ročně
- **Velká regionální letiště** – 5 až 10 milionů cestujících ročně
- **Malá letiště** – 1 až 5 milionů cestujících ročně
- **Letiště** – 200 000 až 1 milion cestujících ročně

Při současném rozvoji letišť a letecké dopravy se z hlediska rozsahu provozu a počtu operátorů, převážně leteckých společností, dělí na[5]:

- **Primární mezinárodní huby (Internationals Hubs)** – Pro tato letiště je charakteristický vysoký rozsah dopravy s přestupem, představuje velkou záchytnou oblast a PAX překračuje 40 mil./rok. Pro tato letiště může být příkladem třeba letiště v Atlantě, kde odbaví na 79 milionů cestujících ročně. Pro mezinárodní letecké společnosti jsou to hlavní uzlové a střediskové letiště a mají vedoucí roli v aliancích.
- **Mezinárodní základní letiště a destinace O & Ds (International O & Ds)** – Tato letiště charakterizuje menší rozsah tranzitní dopravy a velká záchytná oblast, kdy PAX překračuje 20 mil./rok. Příkladem může být letiště v Sydney, jenž odbaví 22 milionů cestujících ročně. Taktéž pro letecké společnosti poskytující dálkovou dopravu jsou to hlavní uzlové a střediskové letiště, případně sekundární huby s menší podřízenou rolí v aliancích.
- **Sekundární huby a základní letiště a destinace (Secondary hubs and O & Ds)** - Malý rozsah tranzitní dopravy, rozměrově odpovídající, avšak často převyšující potřeby a PAX okolo 10 mil./rok. Příkladem např. letiště Vídeň s 12 mil. odbavených cestujících ročně. Pro letecké společnosti představují hlavní nebo sekundární uzlové letiště s podřízenou rolí v aliancích.
- **Regionální letiště (Regionals)** – Bez tranzitní dopravy a malou nebo mírně převyšující oblastí. Počet PAX je pod 10 mil./ročně. Typickým letišťem je např. Albany s 1,5 miliónem odbavených cestujících. Tato letiště využívají hlavně regionální společnosti a nízkonákladoví dopravci.

2.2 Subsystémy letiště

Subsystémy neboli části letiště, se rozdělují na základě jejich umístění a funkce. Každá část zajišťuje požadovanou službu, ať už jde o přistání, odlety a jiné pohyby letadel, odbavení cestujících, manipulace s nákladem nebo údržbu letadel a jejich celků. Všechny tyto části jsou ve své podstatě samostatné, ale zároveň závislé na všech ostatních a nesprávná koordinace mezi těmito subsystémy může mít za následek porušení bezpečnosti a nevyžádané omezení provozu.

Součástí letiště jsou dvě základní oblasti, které se podle účelu a rozmístění dělí na:

- Neveřejnou zónu letiště (airside)
- Veřejnou zónu letiště (landside)

2.2.1 Neveřejná zóna letiště

Jiným názvem „airside“ nebo také „strana k letadlům“. Je to chráněná část letiště určená provozovatelem skládající se z ploch pro pohyb letadel a činnosti spojené s provozem, manipulací a odbavením letadel. Patří tam vzletové a přistávací dráhy, pojezdové dráhy, vyčkávací prostory, vstupní a výstupní prostory pro cestující a technické budovy.

Na některých letištích se z bezpečnostních důvodů můžeme setkat s barevným označením těchto částí. Červená barva signalizuje tranzitní, celní a odbavovací prostory. Žlutou barvou se označují manipulační plochy a hangáry pro údržbu letadel. Modrá pak zobrazuje hospodářské, technické a provozní části letiště včetně vnitřních komunikací.

2.2.2 Veřejná zóna letiště

Jiným názvem „landside“ neboli „strana k městu“. Tento prostor také vymezuje provozovatel letiště a slouží pro veškerý pohyb cestujících tj. odbavovací budovy, ubytovací a stravovací zařízení a jiné. Kromě pohybu cestujících je tato zóna také určena pro provoz pozemních vozidel, kam se zařazují příjezdové komunikace pro přepravu z centra města a zpět, dále komunikace pro pohyb vozidel mezi budovami a částmi letiště a nakonec také parkoviště, ať už pro cestující, nebo zaměstnance.

Jak je již z názvu patrné, do tohoto prostoru je umožněn pohyb veřejnosti bez nějakých zvláštních omezení. Pro případ možného narušení bezpečnosti jsou pro tyto účely instalovány bezpečnostní kamery.

Zvláštním případem je terminál, který je součástí veřejného prostoru a tvoří jakýsi přechod mezi neveřejným a veřejným prostorem. Zahrnuje veškeré přepážky pro odbavení cestujících, pasové a bezpečnostní kontroly, čekárny a jiná zařízení.

V tabulce 2.2 je znázorněno hlavní dělení subsystémů letišť. Ke každé z jednotlivých zón jsou přiřazeny další části nebo služby, se kterými se lze na letištích setkat.

Tab. 2. 1 Rozdělení subsystémů letišť [3]

Strana k letadlům	Terminál		Strana k městu
	Provozní zařízení	Komerční zařízení	
Vzletové a přistávací dráhy	Přepážky pro odbavení cestujících	Gastronomická zařízení	Příjezdové komunikace
Pojezdové dráhy	Pasová/celní kontrola	Bezcelní obchody	Doprava v areálu letiště
Odbavovací plochy	Bezpečnostní kontrola	Ubytovací zařízení	Hotely
Odstavné plochy	Nástupní čekárny	Směnárný	Terminály MHD
Navigační a zabezpečovací zařízení	Třídírna zavazadel		Parkoviště
Obslužné komunikace			Ubytovací zařízení
			Stanoviště taxislužby

2.3 Organizační struktura letiště

V otázce organizace hraje důležitou roli vlastnictví a řízení letišť. V každém státě je řešeno individuálně, avšak ve většině případů se projevuje vliv politiky daného státu a často také vliv zkušeností, které byly získány ze sledování provozování letišť jiných států. Typy vlastnictví můžeme dělit na tři základní druhy.[5]

- **Letiště vlastněná a regulovaná státem** – v tomto případě je charakteristická organizace a činnost řízena pověřeným státním orgánem, ministerstvem nebo daným regionálním orgánem. Ve zvláštním případě je možné přenést činnost letiště na samostatný subjekt, který byl zřízen dle patřičného zákonného usnesení.
- **Letiště spravovaná soukromým vlastníkem** – zde, jak se může zprvu jevit, neplatí úplný přesun do soukromého vlastnictví, jelikož Chicagská úmluva nepovoluje státům na svém území poskytovat provozovatelům úplnou nezávislost. Znamená to tedy, že soukromý podnik se může zčásti nebo plně podílet na činnosti letiště. Podniky jsou však vázány určitými smlouvami.
- **Systémy letišť, sítě letišť, letištní aliance** – provozování dvou nebo více letišť v podobné oblasti působení jedním vlastníkem, popř. obsluha skupiny letišť na území daného státu provozované státem nebo vlastníky. V jiných případech dochází ke kombinaci těchto forem.

3 Kapacitní problematika letišť

Kapacitu letiště lze popsat jako schopnost pojmout stanovený počet letadel, cestujících a nákladu za určitý časový okamžik. K tomu je vztažena taky kvalita služeb veškerých operací, která je nejvíce ovlivňována v provozních špičkách. Pokud je tedy povolená kapacita překročena, bude docházet ke snižování kvality a následným skluzům při odbavování. Nedostatek kapacity téměř vždy směřuje ke zpožděním a bývá hlavním problémem při plánování letiště.

Při plánování se počítá s vytížením během špičkových okamžiků, což znamená, že kapacita je mimo tyto špičky mnohdy značně nevyužita. Důležité je však udržet kvalitu služeb a jejich snížení akceptovat pouze v rámci přijatelných hodnot, a aniž by byla jakýmkoliv způsobem ohrožena bezpečnost cestujících nebo provozu letadel při vzletu, přistání a pojíždění po pohybových plochách. Při hodnocení kapacitní problematiky letišť se můžeme setkat s několika veličinami, jež ji popisují. Patří mezi ně[5]:

- **Dynamická kapacita** – hodnotí maximální počet činností za určitý časový interval, příkladem může být počet lidí, kteří projdou terminálem.
- **Statická kapacita** – množstevní potenciál určité oblasti, např. možné množství zaparkovaných aut.
- **Schválená kapacita** – vyjádření celkové kapacity se splněním požadavků letecké dopravy a v daném časovém intervalu.
- **Maximální kapacita** – maximální přepravní tok, který může být připuštěn pouze ve stanovených okamžicích, aniž by docházelo ke zpoždění, snížení úrovně služeb nebo ohrožení bezpečnosti.

Důležité je taktéž rozlišit dvě obecně používané veličiny, jež vysvětlují rozdíl mezi teoretickým a praktickým hodnocením.

- **Teoretická kapacita** – je základem pro plánování kapacity letiště. Jde o úplné využití dané kapacity, za předpokladu, že existuje poptávka a nebude docházet k žádnému zpoždění.
- **Praktická kapacita** – vyjadřuje počet operací, které mohou být provedeny v určitém čase a s přípustnou dobou zpoždění. Toto zpoždění může být způsobeno příletem dvou letadel ve stejném čase a k dispozici je pouze jedna RWY, nebo když je letadlo nuceno vyčkávat kvůli pohybu na provozních plochách.

Hlavním ukazatelem při hodnocení kvality poskytovaných služeb je zpoždění. Je popisováno jako časový rozdíl mezi předpokládaným a skutečným časem provedení dané operace. Příčinami zpoždění mohou být špatné počasí, které neumožňuje vzlet nebo přistání letadla, problémy při nakládání zavazadel či nástupu cestujících, nutnost neplánovaných oprav nebo vyčkávání letadel z důvodu přeplněné kapacity na některých částech letiště.

Podle literatury [5] je celosvětově akceptovanou normou zpoždění 4 minuty na jedno letadlo ve dvou po sobě jdoucích hodinách. Jelikož jde o průměrnou hodnotu, spoustu letadel bude mít zpoždění větší. Proto se používají další měřítka a omezení. Zpravidla se povoluje, že maximálně 2% letadel budou mít na svém odletu nebo příletu zpoždění větší než 20 minut.

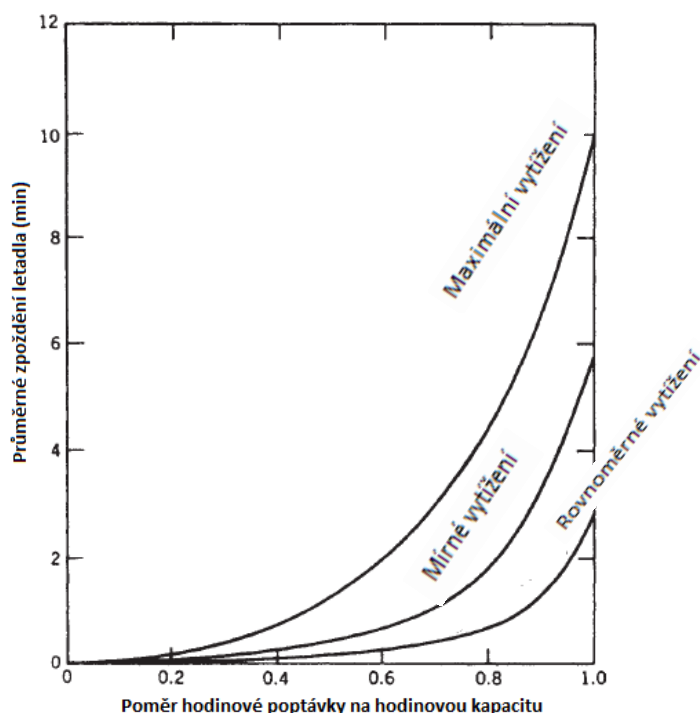
Obecně lze kapacitu letiště stanovit z kapacity jednotlivých částí, které mají danou svou specifickou kapacitu a všeobecně platí, že celková letištní kapacita odpovídá kapacitě nejslabší části.[2]

Rozlišujeme následující části:

- Kapacita provozních ploch
- Kapacita terminálu
- Kapacita služeb ATC
- Kapacita letištních parkovišť
- Kapacita příjezdových komunikací
- Kapacita přepravního systému letiště – město

Každá z těchto položek představuje při plánování a hodnocení výkonnosti letiště důležitý parametr a je třeba ke každé části přistupovat s jistým zřetelem. Otázka letištní kapacity a zpoždění vyvolává v dnešní době velkou pozornost, zejména u velkých dopravních letišť. Z hlediska letištní infrastruktury se podíváme na problémy související s kapacitou provozních ploch a terminálu.

Obrázek 3.1 znázorňuje typický průběh průměrného zpoždění letadel a hodinovou kapacitou. Právě zpoždění je hlavním ukazatelem a odezvou kapacity letiště.



Obr. 3. 1 Vztah poptávky a kapacity na průměrné zpoždění [6]

3.1 Kapacita provozních ploch

Kapacita provozních ploch je rozdělena na:

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

3.1.1 Kapacita dráhového systému

Dráhový systém bývá často kritickým místem pro určování kapacity letiště a hlavním cílem je získání přehledu o další vyžadované kapacitě. Kapacitu dráhového systému můžeme chápat několika způsoby. Jedním z nich je maximální počet pohybů letadel uskutečněným na daném dráhovém systému za jeden rok. V případě výpočtu roční kapacity se pro nejpřesnější výsledky dále zohledňuje např. skladba letadel v provozu, provozní využití RWY, nerovnoměrnosti provozu nebo jiné provozní či meteorologické podmínky.

Další metodou posouzení dráhové kapacity je vyjádření maximálního počtu pohybů za jednu hodinu.

Jelikož se při těchto výpočtech projevují vlivy meteorologických a provozních podmínek používá se pro výpočet tzv. hodinová zátěžová kapacita.

Z výsledků dosažených výpočtem těchto kapacit se stanoví mezní hodnoty a v případě, že jsou tyto hodnoty menší než kapacita požadovaná, znamená to, že bude docházet ke zpoždění.

Nevýhodou zvyšování kapacity dráhového systému je, že nemůže být provedeno plynule. Řešením obvykle tedy bývá výstavba nových paralelních drah nebo jejich rekonstrukce, což vyžaduje vysoké investiční náklady, povolení a hlavně velká omezení provozu.

Mnohem důležitějším ukazatelem je počet pohybů ve špičkové hodině než počet pohybů za jeden rok. Veškerá kvalita služeb se pak vztahuje právě na provoz ve špičkových obdobích a nemělo by dojít k jejímu snížení pod stanovenou mez. Tato období nastávají zpravidla v sezónních obdobích daného území, či při významných událostech.

Uvažujeme-li o ideálním případě, veškeré procesy přepravního toku budou bez překážek a letadla směřující na letiště budou moct pokračovat na přímé přiblížení, pokud však bude přepravní tok vyšší než kapacita dráhového systému, letadlo se bude muset nějakou dobu zdržet ve vyčkávacím prostoru.

3.1.2 Faktory ovlivňující kapacitu dráhového systému

Maximální kapacita může být určena jednoduchými výpočty pro počet pohybů za určité období. Problémem je, že na provoz letadel působí mnoho faktorů, které výslednou kapacitu ovlivňují. Patří mezi ně[4]:

- Počet a uspořádání RWY
- Rozstupy mezi letadly stanovené ATM
- Viditelnost, oblačnost, srážky
- Síla a směr větru
- Složení letadel
- Provozní využívání jednotlivých RWY
- Typy a umístění výjezdů z RWY
- Stav a výkonnost ATM
- Hluková a jiná omezení týkající se životního prostředí

Kromě těchto faktorů můžeme uvést také přibližovací a odletové rychlosti, vzdálenosti os jednotlivých RWY a jiné provozní podmínky. Dále se budeme zabývat jednotlivými detaily související s těmito faktory.

a) Počet a uspořádání RWY

Pravděpodobně nejdůležitějším a základním parametrem ovlivňující dráhovou kapacitu je počet RWY a jejich uspořádání. Pro dosažení vysoké kapacity se snažíme o co nejlepší návrh a umístění dráhových systémů, avšak jak již bylo zmíněno, výstavba nových nebo rekonstrukce starších drah bývá často náročnou operací.

Menší letiště využívají převážně jednoduché řešení s jednou RWY, velká významná letiště by si však s tímto řešením nevystačila a tak provozují systém několika RWY uspořádané buď do systému paralelních drah, křížujícího se dráhového systému nebo tzv. otevřený V systém drah.

b) Rozstupy mezi letadly stanovené ATM

Každý ATM systém, ať už jednoduchý nebo moderní, udává požadavky na minimální rozstupy mezi letadly pro IFR lety. Hlavním cílem je zajištění bezpečnosti a plynulosti provozu. Požadavky rozstupů určují maximální počet letadel, které mohou proletět daným vzdušným prostorem nebo dráhovým systémem za určitou jednotku času.

V současnosti je minimální podélný rozstup mezi letadly při přiblížení nebo odletu 5,6 km (3 NM). Tento rozstup je dle ICAO a pro lety podle IFR.[2]

Minimální rozstupy se liší typem a rozmístěním RWY. Rozlišují se rozstupy pro letadla provádějící odlet nebo přiblížení na jednu RWY, rozstupy pro letadla provádějící odlet nebo přiblížení na paralelní dráhový systém a rozstupy pro letadla operující na sbíhajícím se dráhovém systému.

i. Rozstupy na jedné RWY

Rozstupy mezi letadly při odletu nebo přiblížení na jednu RWY mají při určování dráhové kapacity zvláštní význam. Letadla jsou obvykle rozdělena do tří váhových kategorií a rozstupy jsou definovány buď časem, nebo vzdáleností. Důvodem tohoto rozdělení je vznik turbulencí v úplavu za každým letounem. Tato turbulence je nebezpečná obzvláště pro malá letadla, která následují po velkém letounu.

Podle ICAO jsou letadla rozdělena do těchto kategorií:

- L (lehká) – s MTOW = 7000 kg
- M (střední) – s MTOW = 7000kg až 136 000 kg
- H (těžká) – s MTW = 136 000 kg a větší

Tab. 3. 1 Minimální rozstupy mezi letadly [2]

Následující letadlo	Předcházející letadlo		
	H	M	L
H (MTOW > 136 000 kg)	4 NM	3 NM	3 NM
M (136 000 kg > MTOW > 7000 kg)	5 NM	3 NM	3 NM
L (7000 kg > MTOW)	6 NM	5 NM	3 NM

V tabulce 3.2 jsou znázorněny minimální rozstupy mezi letadly používané při přiblížení na přistání. Mimo jiné se zahrnují taktéž varianty, kde přistání následuje po odletu, odlet po přiletu a odlet po odletu.

V případě přiletu následovaným odletem musí být zaručeno, že přistávající letadlo opustí dráhu v požadovaném intervalu, aby mohlo další letadlo vzlétnout bez rizika nežádoucího přiblížení. V opačném případě, kdy je odlétávající letadlo následováno přibližujícím se letadlem, musí být rozstup v momentě rozjezdu letounu na dráze minimálně 2 NM. Po dvou po sobě odlétávajících letadlech jsou rozstupy dány časovým intervalem. Ty jsou zobrazeny v následující tabulce.

Tab. 3. 2 Časové rozstupy mezi dvěma odlétajícími letadly (v sekundách) [4]

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

ii. Rozstupy na paralelních drahách

Hlavním ukazatelem při určování rozstupů na paralelních drahách je vzdálenost mezi jednotlivými drahami. Dráhy mohou být využívány pouze pro odlety, nebo pro přilety, popř. pro kombinace obou operací. Tabulka 3.4 ukazuje, jaké rozstupy by měly být pro provoz IFR podle FAA.

Tab. 3. 3 Rozstupy na paralelních drahách [4]

Vzdálenost mezi drahami	Přilety/Přilety	Odlety/Odlety	Přilety/Odlety	Odlety/Přilety
Do 762 m	Stejně jako u jedné RWY	Stejně jako u jedné RWY	Provede se přistání	Provede se vzlet
762 až 1310 m	1,5 NM	Nezávislé	Nezávislé	Nezávislé
Více než 1310 m	Nezávislé	Nezávislé	Nezávislé	Nezávislé

iii. Rozstupy na sbíhajících se drahách

Aplikace požadavků na minimální rozstupy se u sbíhajících nebo křížujících se drahách liší od letiště k letišti a od státu po stát. Jsou ovlivněny zejména místem křížení drah, velikost úhlu drah, počtem pohybů a typem letounů a dalšími faktory. Nejvyšší kapacity je většinou dosaženo tam, kde se dráhy křížují na začátku ve směru provozu. V tomto případě může být kapacita takového dráhového systému stejná jako u paralelních drah s krátkou nebo střední osovou vzdáleností. V okamžiku, kdy boční vítr omezuje provoz na jedné z drah, kapacita celého systému bude stejná jako u systému s jednou dráhou.[4]

c) Viditelnost, oblačnost, srážky

Letištní kapacita je výrazně ovlivňována povětrnostními podmínkami. Za podmínek VMC je kapacita vyšší než za podmínek IMC. Minimem pro VFR lety je pak dohlednost alespoň 5 NM a výška základny oblaků vyšší než 762 m.[2]

Srážky a námraza vážně působí na kapacitu dráhového systému. Důsledkem bývá snížená viditelnost, špatné brzdné účinky kol letadel nebo potřeba zařízení pro odmrazování. V případě snížených brzdných účinků se kvůli bezpečnosti redukuje povolené meze pro boční vítr. Nejhorší pak zasahují do provozu letiště sněhové či tropické bouře, což často vede k úplnému uzavření letiště.

d) Síla a směr větru

Nejsledovanější složkou je boční vítr, pro který jsou stanovené určité limity. Silný vítr vanoucí z několika směrů má na určitém místě značný vliv na kapacitu, jejíž velikost se časem mění. Z toho důvodu můžeme hovořit o proměnlivosti kapacity dráhového systému způsobené nepříznivými povětrnostními podmínkami.

e) Složení letadel

Obecně je definováno, že z pohledu kapacity je relativně výhodnější, když je složení letadel homogenní (skládá se z jednoho nebo dvou váhových kategorií), než když je složení nehomogenní. Toto tvrzení vychází z řešení rozstupů, které jsou již rozebrány v předešlé kapitole. Pokud se bude tedy provoz skládat výhradně z jedné kategorie letadel, rozstupy budou vesměs konstantní a na pracovníky ATC nebudou kladeny příliš velké nároky. Výsledkem bude vyšší využití letištní kapacity.

f) Provozní využívání jednotlivých RWY

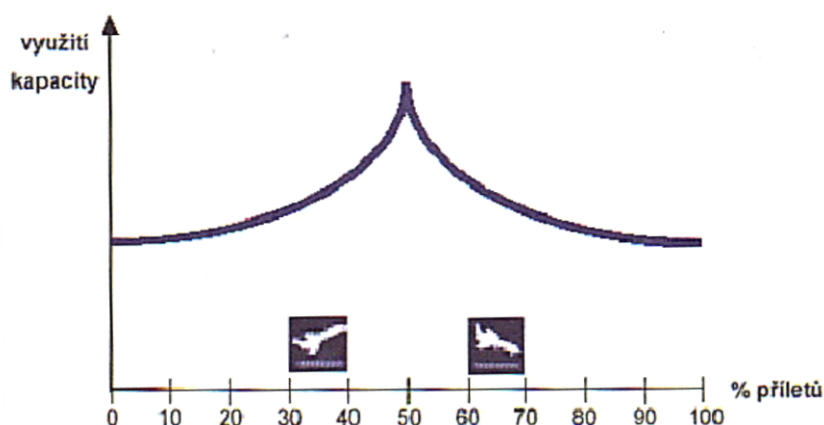
Segregovaný provoz – užívání paralelních drah zvlášť pro odlety a zvlášť pro přílety

Smíšený provoz – obě dráhy jsou využívány jak pro přílety, tak pro odlety

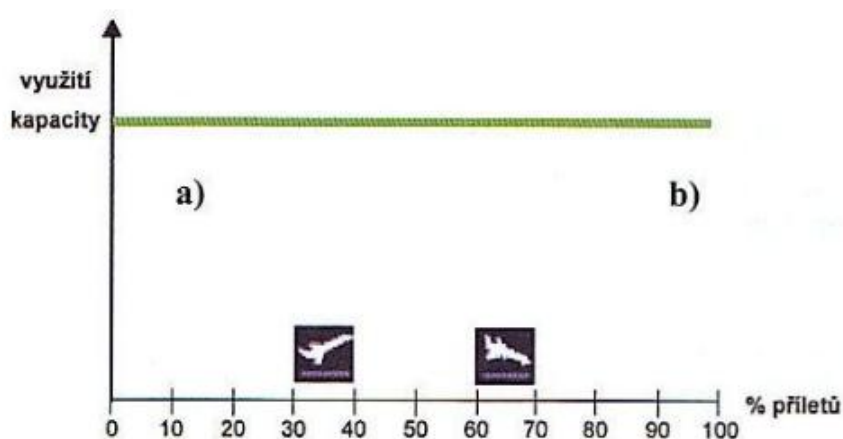
Polosmíšený příletový provoz – jedna dráha je využívána převážně pro přílety a druhá pro smíšený provoz

Polosmíšený odletový provoz – jedna dráha je využívána převážně pro odlety a druhá pro smíšený provoz

Kapacita segregovaného provozu bude jiná než u smíšeného provozu. Pro pracovníky ATC je možnost segregovaného provozu přívětivější díky jeho jednoduchosti. Z hlediska kapacity je však výhodnější smíšený provoz, jelikož v určitém okamžiku je dráha pro přílety přetížená a dráha pro odlety naopak nevyužitá a tak není kapacita využita rovnoměrně a vznikají ztráty. Segregovaný provoz by byl výhodnější pouze v případě, že by se počet příletů rovnal počtu odletů.[5]



Obr. 3. 2 Využití kapacity při segregovaném provozu [5]



Obr. 3. 3 Využití kapacity při smíšeném provozu [5]

g) Typ a umístění výjezdů z RWY

Čas obsazenosti RWY přilétávajících letadel je definován jako čas mezi okamžikem dosednutí letadla na zem a okamžikem kdy se nachází na výjezdu z RWY. Pro zvýšení kapacity se konstruuje pojezdové dráhy pro rychlé odbočení a jsou základem pro redukci času strávenému na RWY. Náklady pro výstavbu těchto „rychlodboček“ jsou ovšem mnohdy vyšší než náklady na klasické 90° výjezdy.

h) Stav a výkonnost ATM

Výkonný ATM systém s dobře vycvičeným a motivovaným personálem je základem k dosažení vysoké dráhové kapacity. Příkladem může být aplikace minimálního možného rozstupu dvou po sobě se přibližujících letadel na přistání. Toto by nebylo možné v případě, že by řídicím letového provozu nebyly poskytovány skrz ATM přesné a správně zobrazené informace nebo by řídící nebyli dostatečně zkušenými pro řešení takové situace.

i) Hluková omezení

Během každodenní práce je hluk způsobený provozem letadel jedním z hlavních kritérií pro posouzení a výběru vhodné RWY (v případě provozu s vícedráhovým systémem). U systému s jednou RWY není možnost odklonění provozu na jinou dráhu a hluk působí ve směru přistání i odletu. Dráhový systém s více RWY má možnost přesunout provoz na jinou RWY, nesmí však nepříznivě působit složka bočního větru nebo jiné podmínky.

3.1.3 Předpoklady pro maximální kapacitu

Pro zamezení vzniku ztráty dráhové kapacity se předpokládá žádný nebo minimální počet přejezdů přes aktivní dráhu, a že zařízení pro odbavení je umístěno za dráhovým systémem.

Dalším zvýšením kapacity lze dosáhnout zavedením moderního zařízení pro přesná přiblížení a zajištěním radarového sledování daných RWY.

Omezujícím faktorem pro kapacitu letiště by neměla být kapacita vzdušného prostoru, v TMA by se mělo nacházet pouze jedno mezinárodní letiště schopné odbavovat letadla všech kategorií.

V budoucnu se předpokládá snižování intervalů pro přistávání a to hlavně díky vyspělejšími technologiím. Očekává se taky omezení vlivu turbulence v úplavu, kterého se dosáhne různými konstrukčními úpravami letadel.[2]

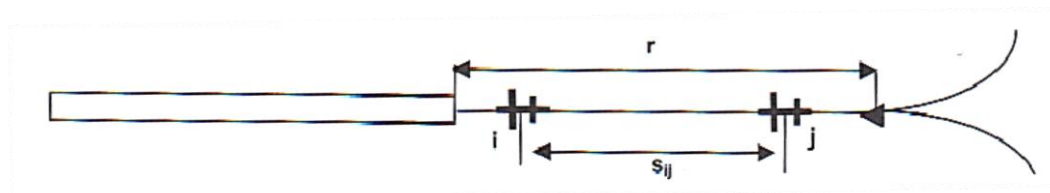
3.1.4 Metody pro výpočet kapacity dráhového systému

Pro stanovení kapacity dráhového systému bylo vytvořeno několik matematických a simulačních metod. Podle literatury [4] jeden ze základních modelů stanovil Alfred Blumstein a to v roce 1959. Tento model odhaduje kapacitu dráhového systému výhradně pro

přiletý. Stejný postup lze však aplikovat i na dráhy používané pro odlety nebo pro smíšený provoz.

Na obrázku 3.4 je zobrazeno schéma jedné RWY využívané pouze pro přistávání. Letadlo klesá v pomyslném směru na konečné přiblížení, následně dosedá na RWY a míří k výjezdu na pojezdovou dráhu.

Během konečného přiblížení je nutné dodržovat předepsané rozstupy, při pohybu po dráze je letadlo povinno a musí mu být umožněno co nejrychlejší opuštění dráhy, aby čas strávený na dráze byl co nejkratší.



Obr. 3. 4 Znáznění situace konečného přiblížení na přistání [5]

Literatura [5] definuje parametry pro výpočet kapacity takto:

r – délka fáze konečného přiblížení na přistání

v_i – rychlost letadla ve fázi konečného přiblížení (předpokládá se konstantní rychlost)

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

Uvažujeme případ kdy přistávající letadlo i je následováno letadlem j . Dále se vychází z minimálního podélného rozstupu mezi těmito letadly, který je označen s_{ij} . Z uvedených parametrů lze stanovit minimální časový interval mezi přiletem obou letadel. Rovnice pro výpočet uvedené v literatuře [4] vypadají následovně:

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

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

Kde: T_{ij} – minimální časový interval mezi přiletem obou letadel

s_{ij} – minimální podélný rozstup mezi letadly

r – délka fáze konečného přiblížení na přistání

o_i – doba obsazení dráhy letadlem

v_i – rychlost prvního letadla

v_j – rychlost druhého letadla

V prvním případě, kdy $v_i > v_j$, se vzdálenost mezi oběma letadly zvyšuje, jelikož rychlost prvního letadla je vyšší než následujícího. Časový interval musí být taktéž dlouhý minimálně po dobu o_i , aby byl zajištěn dostatek času letadla i pro opuštění dráhy a uvolnění tak místa pro další letadlo.

Za předpokladu, že pravděpodobnost situace, kdy je přistávající letadlo i následováno letadlem j , je dána hodnotou p_{ij} , pak je doba přistání mezi dvojicemi letadel dána rovnicí[5]:

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

V praxi se většinou předpokládá, že skutečné vzdálenosti mezi letadly a s tím i spojené časové intervaly budou vyšší, jelikož se dále započítává vliv reakcí pilotů, povětrnostní podmínky nebo schopnosti řídicích letového provozu. Všechny tyto vlivy pak při výpočtech vyjadřuje konstanta b . Skutečný čas tedy potom bude[5]:

$$t_{ij} = T_{ij} + b \quad (3.4)$$

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

$$E[T_{ij}] = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K p_{ij} \cdot t_{ij} \quad (3.5)$$

Nakonec se dostaneme k výpočtu maximální provozní kapacity[4]:

$$\mu = \frac{1}{E[t_{ij}]} \quad (3.6)$$

Podle literatury [6] je další z variant určení kapacity obsáhlá příručka vydaná pro FAA, která obsahuje 62 diagramů a tabulek pro odhad letištní kapacity a zpoždění. Vychází ze znalosti těchto parametrů:

- Složení letadel
- Využití RWY pro odlety a přiletý
- Operace „touch and go“
- Konfigurace výjezdů z RWY
- Podmínky prostředí (IFR, VFR)
- Způsob konfigurace RWY a její využití

V této příručce je složení letadel rozděleno do čtyř tříd:

- Třída A – malá jednomotorová letadla, 6 250 kg a méně
- Třída B – malá dvoumotorová 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

Diagramy využívají tzv. mix index MI , který je určen z procentuálního zastoupení letadel třídy C a D.[6]

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

Pro ukázkou je dán příklad pro určení hodinové kapacity dráhy o délce 10 000 ft.

Složení letadel = 30% A, 40% B, 20% C, 10% D

Procento přiletů = 50%

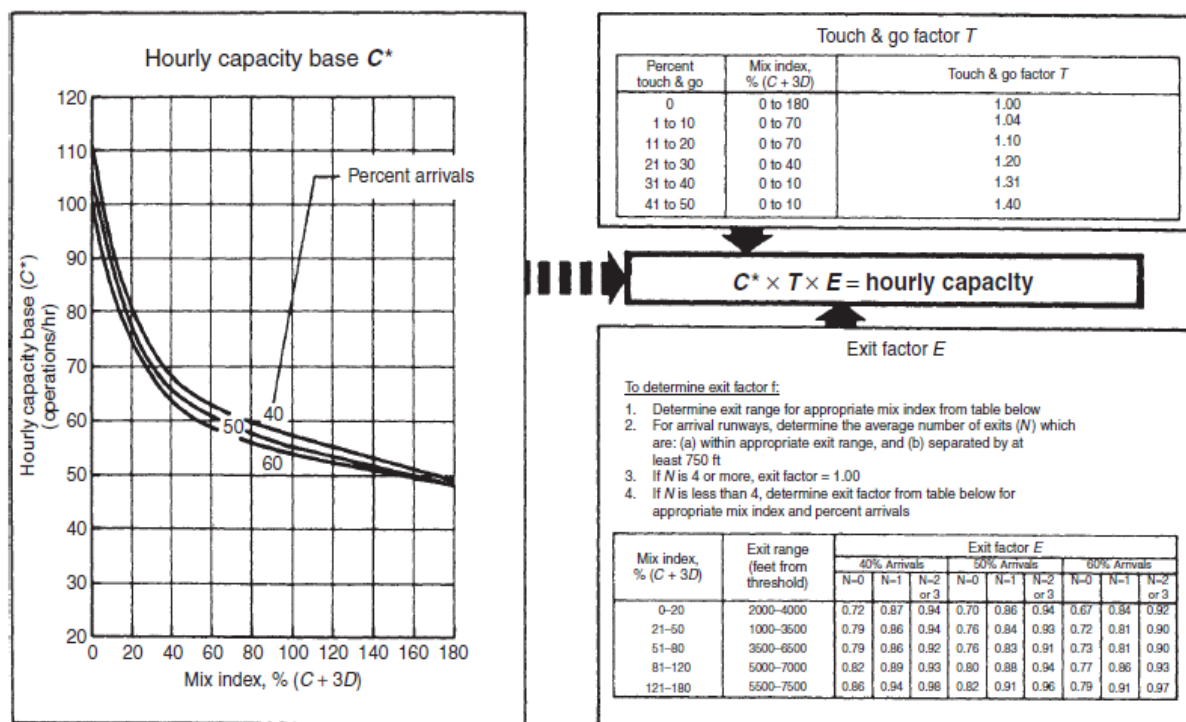
Procento touch and go = 20%

Umístění výjezdů: 4 500 ft a 10 000 ft od prahu dráhy

$$\text{Mix index} = 20 + (3 \times 10) = 50$$

Z diagramu na obrázku 3.5 nalezneme ze znalosti mix indexu a procenta přiletů předpokládanou hodinovou kapacitu. Základní hodnota hodinové kapacity C^* je pro daný příklad přibližně 65 operací/hod. Do této hodnoty je potřeba zahrnout touch and go faktor T , jenž je v tomto případě 1,10 a nakonec se započítá vliv umístění výjezdů z dráhy, jenž je vyjádřen faktorem E , který činí 0,84.

Výsledná hodinová kapacita tedy je: $C^* \times T \times E = 65 \times 1,10 \times 0,84 = 60$ operací/hod.

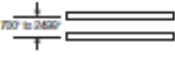
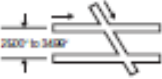
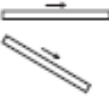
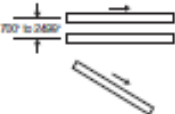


Obr. 3. 5 Diagramy pro určení hodinové kapacity jedné RWY za VFR podmínek [6]

FAA taktéž publikovala různé metody pro analýzu hodinové a roční kapacity letiště. V těchto analýzách se vychází z různého uspořádání dráhového systému a závislosti na podmínkách IFR nebo VFR. Opět se vychází ze znalosti mix indexu MI, který je jedním ze základních parametrů určení odhadované kapacity.

Pro názorný příklad je dáno letiště s jednou RWY, kde procentuální zastoupení malých letadel činí 65%, středních 27% a velkých 8%.

Mix index bude vypočten jako $MI = 27 + (3 \cdot 8) = 51$. Podle obrázku 3.6, znázorňujícího hodnoty pro dané dráhové konfigurace, je schopno letiště dosáhnout kapacity 63 operací/hod při VFR provozu a 56 operací/hod při IFR provozu. Roční odhad pak bude 205 000 operací.

Configuration	Runway configuration diagram	Mix index — percent (C + 3D)	Hourly capacity (operations per hour)		Annual service volume (operation per year)
			VFR	IFR	
<i>A</i> 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
<i>B</i> 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
<i>C</i> 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
<i>D</i> 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
<i>E</i> 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
<i>F</i> 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
<i>G</i> 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

Obr. 3. 6 Předběžná analýza kapacit dle konfigurace RWY [6]

3.1.5 Počítačové modely a simulace

Uvedené početní metody a diagramy s nimi spojené bývají bohužel často nepřesné, jelikož nepočítají s časovou závislostí, a proto jsou používány převážně pro přibližný odhad kapacity letiště. Pro přesnější určení kapacity se používají nejrůznější počítačové modely umožňující simulace konkrétních případů.

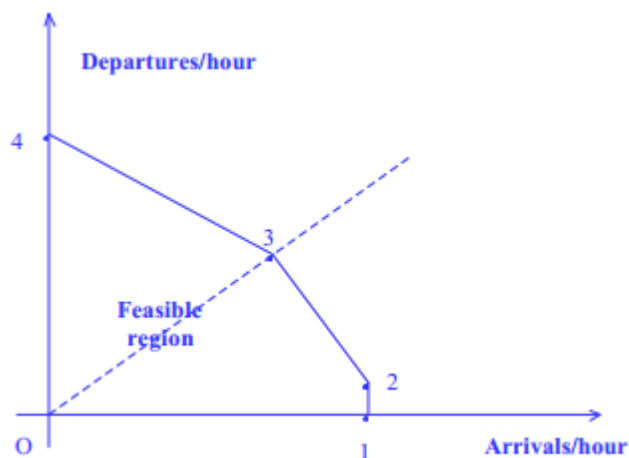
V dnešní době je možné se setkat s mnoha takovými modely. Každý z nich se specializuje na jiné části a používá jiné metody výpočtů, avšak většina je schopna s určitou přesností určit kapacitu letiště nebo její části. Proto je těžké říci, který počítačový model je nejlepší a nejpřesnější.

Literatura [5] rozlišuje modely na makroskopické a mikroskopické. Makroskopické modely se zaměřují na problematiku nasycení dráhového systému, kde je nutné řešit novou kapacitu. Dále se pak používají při výpočtu nákladů způsobené zpožděním. Mezi základní makroskopické modely patří například FAA Airfield Capacity Model, analytický model DELAYS, určený pro výpočet zpoždění, nebo modely LMI a MACAD.[5]

Mikroskopické modely provádějí důkladnou analýzu přepravního toku, případně předběžná a koncová řešení. Jedním ze základních modelů je model SIMMOD, kterému bude věnována větší pozornost v dalších kapitolách.

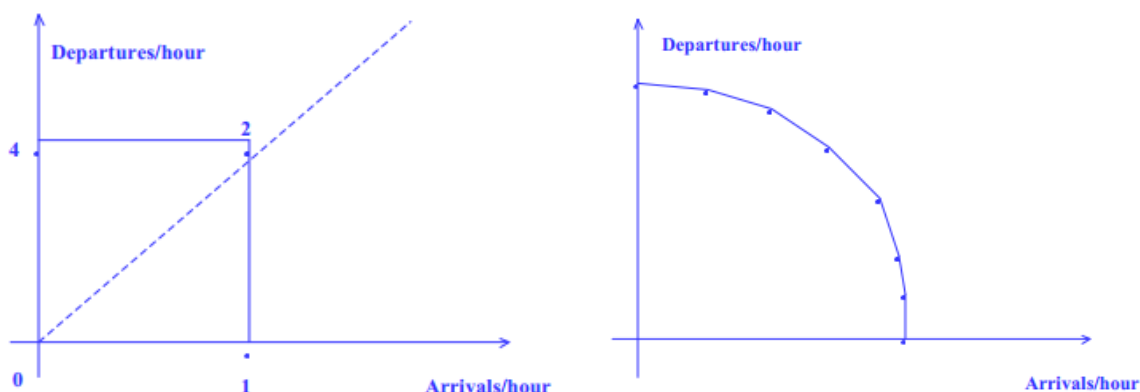
Dalšími modely, se kterými je možné se při simulaci letištních podmínek a stanovení kapacity lze setkat, jsou TAAM (Total Airspace and Airport Modeler), RAMS a HERMES.[5]

Eugene P. Gilbo v roce 1993 vytvořil počítačový model, jehož základním výstupem byla tzv. obálka dráhové kapacity. Jde o obálku, která ohraničuje maximální kapacitu, které je možné dosáhnout při plném počtu přistání, odletů nebo smíšeném provozu. Jakýkoliv bod uvnitř této obálky je přípustný pro danou kapacitu, pokud se však nějaký bod nachází mimo tuto obálku, znamená to, že není možné takové množství pohybů uskutečnit. Tyto obálky se dají realizovat jak pro jednoduché dráhové systémy, tak pro paralelní dráhy i pro systémy několika RWY.[4]



Obr. 3. 7 Typická kapacitní obálka pro jednoduchou RWY [4]

Kapacitní obálka je v obrázku 3.7 definována určitými body. Bod 1 zobrazuje kapacitu dráhy v případě, že je používána pouze pro přílety. Bod 2 je taktéž pouze pro přílety, ale zahrnuje jistou možnost volných odletů. Bod 3 je bodem, kdy se počet příletů rovná počtu odletů a bod 4 znázorňuje kapacitní hranici, kdy je dráha používána pouze pro odlety.



Obr. 3. 8 Kapacitní obálka pro 2 paralelní RWY (vlevo) a pro systém více RWY (vpravo) [4]

3.1.6 Kapacita pojezdového systému

Pojezdové dráhy TWY, které je nutné konstruovat a umisťovat k prahu každé dráhy, slouží ke spojení částí letiště, jako jsou přistávací plochy, parkovací plochy nebo terminály. Jejich počet a rozmístění jsou důležitým faktorem pro zajištění dostatečné kapacity. Ta by neměla být nižší než kapacita dráhového systému. Celková kapacita je obecně určována počtem letadel, která projedou od odbavovací plochy k RWY a zpět za určitý časový okamžik, většinou za jednu hodinu.

V ideálním případě by měly TWY vést z dráhového systému přímo na odbavovací plochy, bez přebytečných oblouků nebo křížení. Dobře navržený systém TWY by neměl způsobit, že letadla na pojezdových drahách budou zpožděna do takové míry, aby to mělo za následek dosažení maximální kapacity.

Velice účinným systémem je konstrukce drah pro rychlé odbočení neboli tzv. rychloodboček. Ty jsou napojeny na dráhu v ostrém úhlu tak, aby letadlu umožňovaly rychlé opuštění dráhy. Snižuje se tak doba obsazenosti dráhy, což může mít velký vliv na výslednou kapacitu.

Další možností je výstavba dvojitého prstence TWY okolo odbavovacího prostoru, který umožňuje pohyb ve dvou opačných směrech.[4]

3.1.7 Kapacita stojánek na odbavovací ploše

Hlavním indikátorem kapacity stojánek je počet stání pro odbavení za určitou dobu. Tento parametr bývá někdy přiřazován k pojmu statická kapacita, která řeší maximální počet letadel, která mohou být současně odbavena. V reálném provozu se však více používá pojem dynamická kapacita, jenž je popisována jako množství letadel, která mohou být na stanovišti za jednu hodinu umístěna. Dynamická kapacita vychází z časového intervalu mezi dobou využití stojánky dvěma letadly. Tento časový interval se skládá z těchto hodnot[5]:

- Čas, který je předpokládán pro využití stojánky SOT (Schedule Occupancy Time)
- Čas, který je potřebný pro odjezd a připravení letadla PT (Positioning Time)

Zdroj [3] uvádí rovnici pro výpočet počtu stání jako:

$$N = \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_{imin} \cdot n_i}{60} \right) + \alpha \quad (3.7)$$

Kde: N – počet stání

t_{imin} – doba stání připadající na jeden pohyb [min]

n_i – počet pohybů letadel ve špičkové hodině

α – počet záložních stání

V průměru se uvažuje doba obsazenosti stojánky nejčastěji 75 minut. [2]

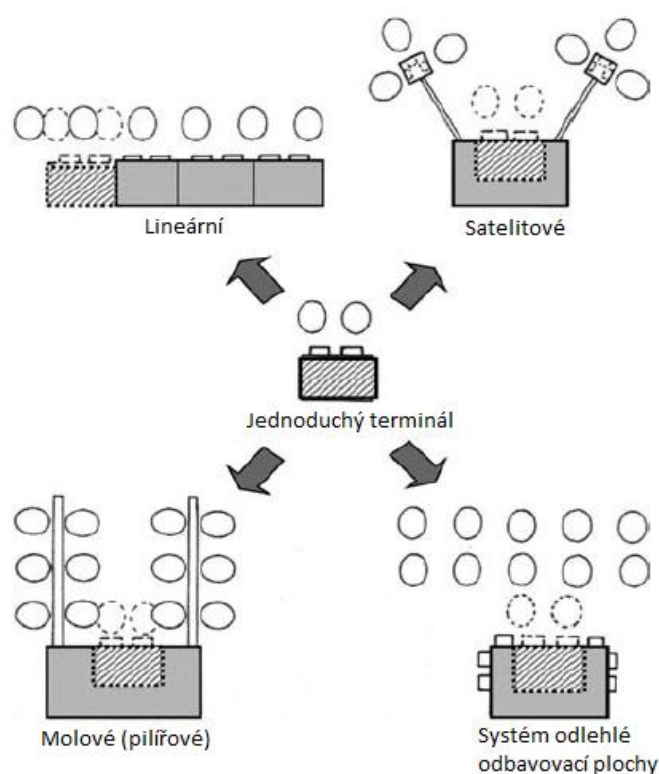
3.2 Kapacita letištního terminálu

Terminál představuje část letiště, která patří k těm nejvytíženějším místům, jelikož slouží jako takový přechodný bod mezi městem a letištěm a jsou zde vykonávány veškeré procesy zahrnující odbavení cestujících, pasové a bezpečnostní kontroly a jiné služby. Proto se budova terminálu musí potýkat s velkým množstvím pohybu nejen cestujících, ale taky rodinných či jiných příslušníků doprovázející samotné cestující (pouze ve veřejné části budovy). Každý cestující má s sebou navíc zavazadla zabírající taktéž určitou plochu, dokud nedojde k jejich odbavení na příslušné přepážce.

Z kapacitního hlediska musí odbavovací budova pojmout všechny odlétávající i přilétávající cestující a to s dostatečnou rychlostí odbavení a se zajištěním dostatečného komfortu. Velikost terminálu a veškeré jeho prostory jsou řešeny již v počátcích plánování celého letiště a další zvětšení a rozšíření, ať už celého terminálu nebo jen jeho částí, bývá značně problematické, nejen kvůli dočasnému omezení provozu, ale taky z finančních důvodů.

Kapacita letištního terminálu je hodnota určující propustnost systému, jenž terminál představuje při provádění analýze. Terminál je schopen plnit svou funkci i za kritických podmínek, kdy dochází ke zpoždění letadel a tvoření front na přepážkách, avšak samotná kapacita by měla být vždycky vztahována i k úrovni služeb (level of service), které terminál poskytuje v daných situacích.[5]

Nároky na kapacitu se rok od roku zvyšují a tak se podoba dnešních terminálů značně liší od těch původních. Má na to vliv nejen zvyšující počet cestujících, ale taky modernizace technologií a úsilí provozovatelů letišť a leteckých společností neustále zvyšovat kvalitu služeb. Na obrázku 3.9 lze vidět, jak se základní terminály rozšířily do podob, se kterými se setkáváme dnes.



Obr. 3. 9 Rozvoj jednoduchého terminálu do čtyř koncepcí [6]

Kromě technického vývoje a snahu zvyšovat kvalitu služeb ovlivňují kapacitu terminálu i jiné faktory, které jsou spíše provozního charakteru. Patří mezi ně[2]:

- Sezónnost
- Špičkové hodiny a dny
- Charakter letiště
- Provoz na letišti

V období sezóny (nejčastěji letní období) dochází k výraznému zvýšení poptávky po letecké dopravě, zejména u společností orientující své lety hlavně do přímořských destinací nebo do jiných oblastí, kam cestující rádi létají. Frekvence letů se tak v letních měsících zvyšuje, přibývá charterových letů a v důsledku toho dochází k hromadění cestujících na letištích. Terminály jsou tak vystaveny velké kapacitní zátěži.

Špičkovými hodinami se rozumí období během dne, kdy dochází ke zvýšení frekvencí letů. U letišť s převažující pravidelnou dopravou jsou špičkové hodiny ve většině případů rozloženy do ranních a odpoledních cyklů. Pokud jde o letiště, kde převládá charterová doprava, pak jsou tyto špičky orientovány do brzkých ranních nebo pozdních večerních (nočních) cyklů. Z důvodu možného vyčerpání slotů v těchto špičkových hodinách se většina letišť snaží rozložit lety do více časů během dne, aby nedocházelo k překročení kapacity. Různým leteckým dopravcům jsou nabízeny jiné, méně výhodné časy pro odlety a přílety, dopravci jsou však snižovány různé poplatky na daném letišti.[5]

Se špičkovými dny je to podobné jako s hodinami, jde pouze o dny během týdne. Opět rozlišujeme, zdali je provoz letiště převážně pravidelného charakteru nebo spíše charterového. U pravidelného provozu jsou špičkovými dny obvykle pondělí, středa a pátek.

3.2.1 Subsystemy terminálu a jejich kapacita

Abychom mohli řešit kapacitní problémy každého subsystému, musíme je nejdříve rozdělit. To se provádí následujícím způsobem:

- Rezervoáry – patří tam čekárny a místa, kde dochází k hromadění cestujících
- Procesory – místa, kde jsou cestující povinni podstupovat různé kontroly
- Pojítka – zařízení zajišťující plynulý pohyb cestujících

Tab. 3. 4 Subsystemy pro výstup a nástup cestujících [2]

	Rezervoáry	Procesory	Pojítka
Výstup cestujících	Příletová hala Bezpečnostní a imigrační kontrola Další haly a místnosti, kde dochází k hromadění cestujících	Zavazadlové karusely Bezpečnostní a imigrační kontrola Doplňkové haly a místnosti	Výtahy Eskalátory Systém přepravy zavazadel Chodby Pojízdné chodníky atd.
Nástup cestujících	Prodej letenek v odletové hale Odbavovací přepážky v odletové hale Pasová a celní kontrola Odletové čekárny Bezpečnostní kontrola	Bezpečnostní kontrola Pasová a celní kontrola Odbavení cestujících a zavazadel Prodej letenek Kontrola palubní letenky	Doprava mezi terminálem a letadlem Pojízdné chodníky a eskalátory Chodby Výtahy Přeprava zavazadel

Pro výpočet kapacity jednotlivých subsystémů se stanovují tři základní ukazatele. S podobnými mírami jsme se setkali již při určování kapacity provozních ploch a patří mezi ně statická kapacita, dynamická kapacita a trvalá (schválená) kapacita.

Statická kapacita vyjadřuje počet cestujících a jeho doprovodu nacházejících se v určité části budovy (nebo celku) v daném okamžiku. Stanovení hodnoty statické kapacity vychází ze znalosti celkového užitného prostoru a kvality poskytovaných služeb, obvykle prostor pro jednoho cestujícího. Vztah má tedy následující podobu[2]:

$$\text{Statická kapacita} = \frac{\text{užitný prostor (m}^2\text{)}}{\text{standardní prostor (m}^2\text{/poč. cest.)}} \quad (3.8)$$

Jelikož je užitný prostor většinou neměnný, statická kapacita se tudíž dá upravovat změnou standardního prostoru. V tabulce 3.7 jsou znázorněny jednotlivé úrovně služeb a k němu přiřazeny hodnoty standardního prostoru, podle nichž lze zvyšovat či snižovat kapacitu jednotlivých hal a ploch. Opačným způsobem lze upravovat hodinovou kapacitu subsystémů a z ní určit jaká je úroveň služeb.

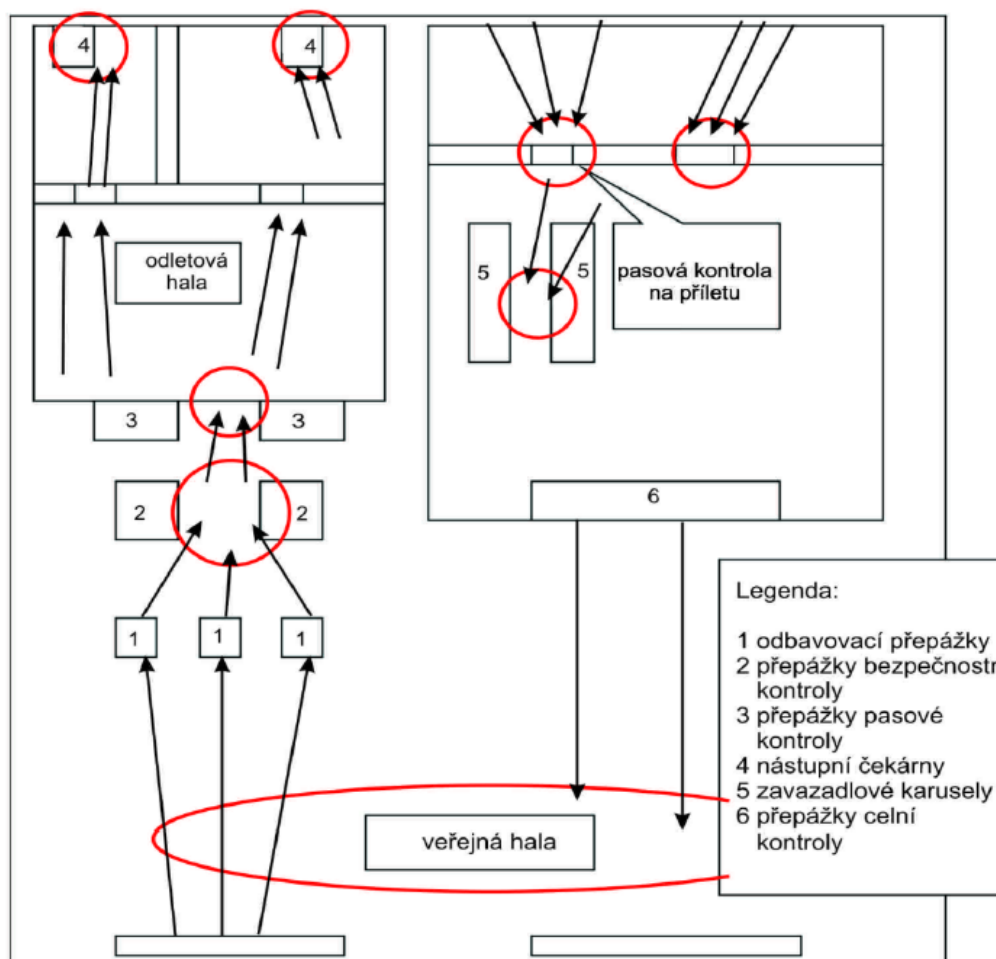
Dynamická kapacita udává, jaké množství cestujících může procházet terminálem nebo jinou částí letiště v daném časovém úseku. Tato kapacita je důležitá u zařízení, která udávají rychlost obsluhy a patří mezi ně zavazadlové karusely, pojízdné schody, pásy a také celní a odbavovací přepážky, pasové a bezpečnostní kontroly atd. Často může dojít k tomu, že jsou tyto zařízení přeplňována a tak dochází ke zpomalení procesů a ke snížením úrovně služeb. V takovém případě má provozovatel letiště možnost zvýšení kapacity daného zařízení např. instalací nových zařízení, zvýšením počtu přepážek nebo rozšířením prostoru. Druhou možností pak může být zrychlení procesu odbavování pomocí automatizace operací, zlepšení práce personálu nebo vykonání určitých záležitostí s časovým předstihem.

Dynamická kapacita je tedy závislá na rychlosti obsluhy a množství obsluhovaných zařízení. Vztah pro dynamickou kapacitu vypadá následovně[2]:

$$\text{Dyn. kapacita} = \text{obslužná rychlost} \cdot \text{množství obsluhovaných zařízení} \quad (3.9)$$

Trvalá nebo taky ustálená kapacita je používána pro vyjádření celkové kapacity subsystémů. Kombinuje statické a dynamické kapacity rezervoárů, procesorů a pojítek. Principem je dostatečně navrhovat jednotlivé subsystémy společně s předem danou úrovní služeb.

Výpočet statické a dynamické kapacity se často aplikuje na kritická místa, která jsou na obrázku 3.10 vyznačena červenou barvou. Tato místa jsou typická pro častou kumulaci osob na malém prostoru a s pomocí výpočtů statické a dynamické kapacity je možné navrhnout optimální řazení procesorů, pojítek či bezpečnostních zařízení tak, aby byl provoz co nejplynulejší.



Obr. 3. 10 Kritická místa při toku cestujících a zavazadel [18]

3.2.2 Úroveň služeb letištních subsystémů

Úroveň služeb, z angličtiny Level of Service (LOS), je důležitým prvkem při zjišťování kapacity letištních subsystémů. Každé úrovni odpovídá vymezený standardní prostor, jehož hodnota je základem pro výpočet statické kapacity. Organizace IATA definuje úroveň služeb jako „rozsah hodnot představující hodnocení schopnosti nabídky uspokojit poptávku“. V tabulce 3.6 jsou definovány úrovně služeb, v tabulce 3.7 jsou poté k jednotlivým úrovním přiřazeny různé subsystémy a k nim odpovídající hodnoty standardního prostoru pro jednoho cestujícího.[10]

Tab. 3. 5 Kategorie úrovně služeb [10]

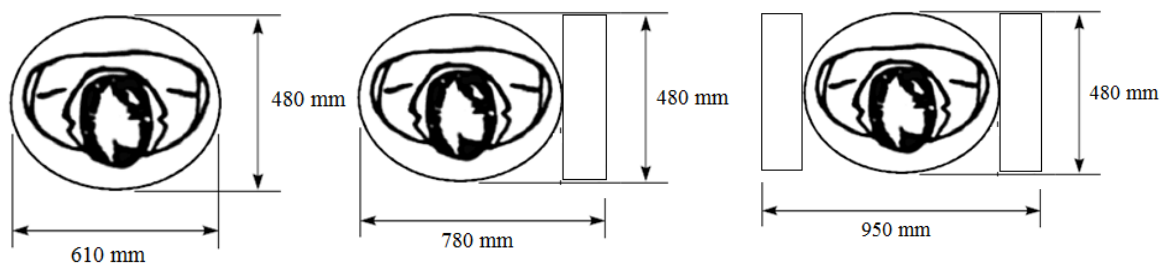
Stupeň	Popis
A	Vysoká úroveň služeb, nevyskytují se problémy, volný tok cestujících i zavazadel, žádné zpoždění, vysoká úroveň komfortu
B	Velmi dobrá úroveň služeb, stabilní tok cestujících, velmi malá zpoždění, velmi dobrá úroveň komfortu
C	Dobrá úroveň služeb, stabilní tok cestujících i zavazadel, mírné zpoždění, akceptovatelná úroveň komfortu
D	Nízká úroveň služeb, tok cestujících i zavazadel je nestabilní, dochází ke zpožděním, která jsou akceptovatelná pouze v krátkých okamžicích, nízká úroveň komfortu
E	Velmi nízká úroveň služeb, tok cestujících je velmi nestabilní, neakceptovatelná zpoždění, velmi nízká úroveň komfortu
F	Velmi špatná úroveň služeb, dochází k přerušovanému toku cestujících i zavazadel a zkolabování systému, neakceptovatelná úroveň komfortu

Tab. 3. 6 Úroveň služeb (m² na 1 cestujícího) [10]

	Úroveň služeb					
Subsystém	A	B	C	D	E	F
Odbavovací přepážky	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	Nevyhovující
Tranzitní hala	2,7	2,3	1,9	1,5	1,0	
Čekárna	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6	
Výdej zavazadel	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	
Celní a pasová kontrola	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6	

Podle doporučení IATA by měla být úroveň C považována za minimální hodnotu, kdy je zajištěna alespoň dobrá úroveň služby. Naopak úroveň A sice značí excelentní komfort, avšak většinou bývá příliš nákladná a nevhodná k realizaci.

Různé studie o lidských faktorech navrhuji rozměry typického cestujícího a plochu, kterou zaujímá. Tyto rozměry jsou aplikovány na variantách, kdy s sebou cestující nebere žádné zavazadlo, nebo když nese jedno či dvě zavazadla, případně vozík se zavazadly. Plochou je pomyslná elipsa, jejíž rozměry udává šířka ramen, nebo šířka cestujícího včetně jeho zavazadel nebo vozíku. Při běžné chůzi by měly být rozstupy 2,5 – 3 metry, aby bylo zabráněno jakékoliv kolizi, výsledná plocha pro volný pohyb cestujícího je tedy přibližně 2 – 3 m². Jiných standardů se používá i u jiných případů, jako je stání v řadě, nebo chůze po schodech. Významnou roli hraje také rychlost pohybu. Na obrázku 3.11 jsou znázorněny rozměry standardního cestujícího.



Obr. 3. 11 Prostorové nároky a rozměry standardního cestujícího [5]

Úroveň služeb se také vztahuje k tvorbě front, a proto jsou předepsány standardy pro plochy vyčleněné pro cestující, časy strávené ve frontách či jejich délky. Fronty se nejčastěji tvoří v kritických místech, jako jsou odbavovací přepážky, přepážky pro bezpečnostní kontroly nebo pasové kontroly.

1) Úroveň služeb při odletu

IATA se zaměřuje především na prostor před odbavovací přepážkou jakožto první zastávkou při odletu cestujícího (případně jeho doprovodu). Proto by měla být udržována poměrně dobrá úroveň služeb, která se promítne na návrhu prostoru určenému pro čekání. Jsou doporučovány čtyři různé druhy prostorových standardů při odbavovacím procesu, zahrnující možnost využívání vozíků a zavazadel cestujících. Tyto standardy jsou zobrazeny v tabulce 3.8.

Tab. 3. 7 Úroveň služeb a velikost prostoru u odbavovacích přepážek s jednou frontou [5]

		A	B	C	D	E
1.	Málo vozíků a cestujících s příručním zavazadlem (šířka řady 1,2 m)	1,7	1,4	1,2	1,1	0,9
2.	Málo vozíků a jedno až dvě zavazadla na cestujícího (šířka řady 1,2 m)	1,8	1,5	1,3	1,2	1,1
3.	Vysoké procento cestujících používá vozík (šířka řady 1,4 m)	2,3	1,9	1,7	1,6	1,5
4.	Velkokapacitní lety se dvěma a více zavazadly na cestujícího a vysokým procentem cestujících s vozíky (šířka řady 1,4 m)	2,6	2,3	2,0	1,9	1,8

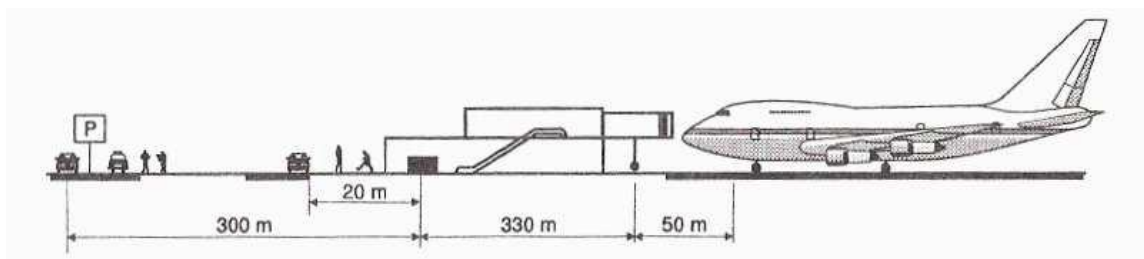
Existuje i spousta jiných faktorů mající vliv na úroveň služeb a tvorbu front, které musí provozovatelé letišť při plánování provozu zohlednit. Patří tam různé modely chování cestujících, kulturní zázemí letiště a leteckých společností, psychologické úvahy týkající se pohodlí a času strávenému čekáním nebo osobní znalost letiště a zkušenosti z minulosti. Pohodlí spojené s dobou čekání ve frontě je často základním ukazatelem, podle kterého lze korigovat kapacitu a na základě toho například zvyšovat počet přepážek, počet pracovníků nebo pomocných manipulačních prostředků. Tím se zvýší i produktivita, avšak nemělo by docházet k nadměrnému přetěžování personálu.

Kromě samotného počtu mohou být přepážky rozděleny podle typu cestujících (cestující v business třídě jsou odbavováni na jiných přepážkách než cestující ekonomické třídy, nebo jsou odbavováni přednostně), další možností je rozdělení cestujících podle toho, kam jejich let směřuje, jestli jde o tranzitní či transferové lety, případně o lety v Schengenském prostoru (zde však odpadá spíše pasová kontrola). Na základě takového rozdělení se pak liší i celková doba strávená ve frontách. Příklady časů jsou znázorněny v tabulce 3.9.

Tab. 3. 8 Maximální doba strávená ve frontě [6]

Typ procesu na letišti	Kratší řady (min)	Delší řady (min)
Odbavení (ekonomická třída)	0 – 12	12 – 30
Odbavení (business třída)	0 – 3	3 – 5
Pasová kontrola (přílet)	0 – 7	7 – 15
Pasová kontrola (odlet)	0 – 5	5 – 10
Výdej zavazadel	0 – 12	12 – 18
Bezpečnostní kontrola	0 – 3	3 – 7

Z těchto údajů se vychází při projektování terminálů a jsou základem pro zajištění dobré úrovně služeb a bezpečnosti. Kromě samotných parametrů fronty je potřeba zajistit i bezpečný prostor mezi nimi. IATA doporučuje, aby vzdálenost mezi ostrovy odbavovacích přepážek byla 24 až 26 metrů, dále aby byla zajištěna určitá diskrétní vzdálenost mezi frontou a cestujícím, který je v dané chvíli odbavován. Tato vzdálenost by měla být alespoň 2,5 m, aby z nich mohl cestující bez problémů odejít. Vzdálenosti, které musí cestující překonat, aby mohl vykonat veškeré náležitosti spojené s odbavením a kontrolami by měly být co nejkratší. Mezi vstupní halou a nástupem do letadla by se neměly vyskytovat žádné překážky, které by nutily cestujícího volit delší trasu nebo přecházet do jiných pater. Maximální vzdálenosti by neměly v ideálním případě přesahovat 350 metrů. Výjimky mohou nastat v případě, že jsou k dispozici pomocné manipulační prostředky, jako jsou eskalátory, pohyblivé chodníky, personál zajišťující pomoc cestujícím s omezeným pohybem atd. [5]



Obr. 3. 12 Doporučené maximální pěší vzdálenosti [3]

Rychlost pohybu cestujících v terminálu je závislá na aktuální situaci a provozu. Všeobecně platí, že čím více cestujících, tím omezenější se pohyb stává a tak se snižuje i možnost rychlejší chůze cestujících s častým obcházením a zastávkami. Širší a prostornější haly a chodby sice umožňují větší volnost, ovšem při plném zatížení tato výhoda mizí. Dalším omezením může být velký počet cestujících s objemnými zavazadly, vozíky a jinými věcmi.

V místech, jako jsou čekárny a různá mezilehlá místa by měl být dostatek místa k sezení, obvykle alespoň pro 50% cestujících, s dostatečným prostorem pro každého cestujícího. Specifické hodnoty, které IATA stanovila pro jednotlivé úrovně služeb, jsou zapsány v Tab. 3.10. Odletové čekárny mají poměrně přesně danou statickou a dynamickou kapacitu. Statická je stanovena pro nepohyblivé cestující, čili pro sedící nebo stojící, dynamická závisí na počtu odbavených cestujících na odletu, případně tranzitních cestujících.

Tab. 3. 9 Parametry pro čekárny [6]

Úroveň služeb	A	B	C	D	E
Maximální obsazenost čekárny	40%	50%	65%	80%	95%
Prostor pro cestujícího v čekárně (m²)	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6

System odbavování zavazadel je podřízen řadou bezpečnostních opatření, sloužící ke zjištění nepovoleného předmětu uvnitř kteréhokoliv zavazadla. Tento proces následuje po odbavení cestujícího u přepážky, odkud poté zavazadlo projíždí rentgenovým zařízením. Na velkých letištích se lze setkat s tříúrovňovou kontrolou, kdy postupně každé zařízení blíže odhaluje nebezpečné předměty. V případě, že zavazadlo žádný takový předmět neobsahuje, je naloženo rovnou do letadla, v okamžiku kdy je identifikován i nepatrný předmět ohrožující bezpečnost, je podroben druhé, dle potřeby i třetí kontrole. Jestliže se prokáže, že předmět je opravdu nebezpečný, zavazadlo se odstaví a za přítomnosti vlastníka se provede bližší kontrola. Stejně jako zavazadla podléhající vážení, procházejí kontrolou taktéž příruční zavazadla a to v příslušných rentgenových skříních. Příklad zařízení pro kontrolu zavazadel je na obrázku 3.13.



Obr. 3. 13 Zařízení pro kontrolu zavazadel [9]

Zařízení pro bezpečnostní a pasovou kontrolu může být umístěno před nebo za odbavovacími přepážkami nebo jinde pokud to interiér letištní haly dovoluje. Pasová kontrola je prováděna většinou před bezpečnostní kontrolou. Dynamickou kapacitu tohoto zařízení ovlivňuje počet daných zařízení a počet pracovníků bezpečnostní či pasové kontroly. Kromě toho se musí potýkat s různými typy cestujících, jejich příručními zavazadly, oblečením, osobními věcmi a hlavně jejich přístupem k ochotné spolupráci. Statická kapacita zde určuje velikost míst pro vyčkávání.[2]

Obecně se bezpečnostní kontroly zpřísnily, převážně po 11. září 2001, a tak se na mnoha místech cestující potýkají s pomalejším procesem. Mezi zařízení využívané pro kontrolu a detekci kovových předmětů patří různá rentgenová zařízení, rámy, ruční detektory a jiné.

2) Úroveň služeb při příletu

Nejdůležitější částí letiště v příletové hale je obvykle zařízení pro výdej zavazadel. V příletové hale se však setkáme i s pasovou, celní nebo imigrační kontrolou. Statickou kapacitu lze vyjádřit jako poměr plochy příletové haly a ideálního standardního prostoru pro jednoho cestujícího. Dynamická kapacita je závislá na množství cestujících a počtu jejich zavazadel, odráží se zde však i vliv rychlosti procesu pasové či celní kontroly, druhu a velikosti zavazadlového pásu či kapacity karuselu. Příletová hala by měla být konstruována tak, aby zde bylo místo pro dostatečně velký zavazadlový pás, jenž je umístěn tak, že cestující budou moci bez problémů identifikovat své zavazadlo a odebrat si jej. Standardní rozměry pásů se pohybují kolem 70 m pro větší letadla a asi 40 m pro střední letadla. Kritickým okamžikem jsou denní špičky, kdy hrozí hromadění zavazadel, velká nepřehlednost a zdržení na dlouhou dobu.[5]

3.2.3 Výpočtové metody

Již v předchozích kapitolách bylo zmíněno řešení statické a dynamické kapacity jako prostředek pro zjištění počtu cestujících pokrývajících danou plochu v určitém okamžiku, nebo cestujících pohybujících se v hale či ve frontách. Základními metodami pro výpočet kapacity jsou[2]:

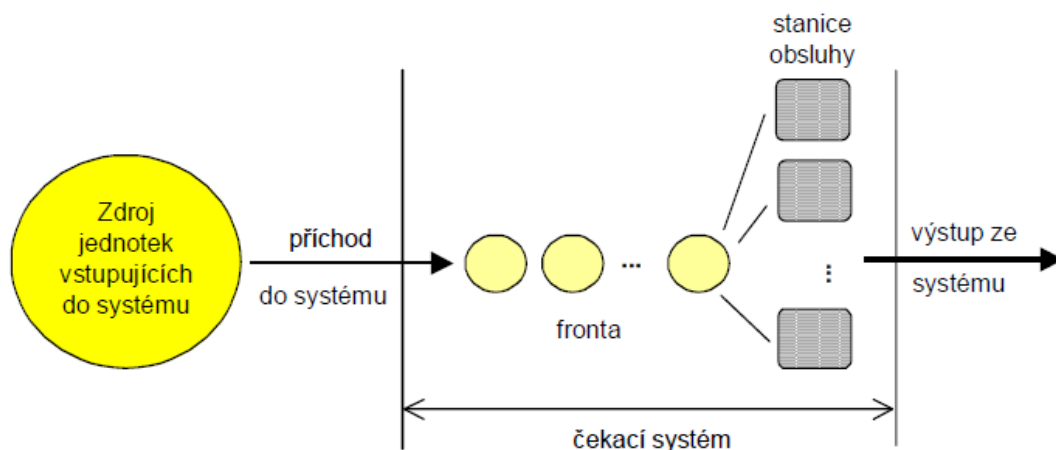
- Metoda pozorování
- Metoda simulace

Metoda pozorování stanovuje kapacitní požadavky na letiště ve špičkových hodinách a dnech využitím různých údajů a statistik. Metoda simulace sleduje více situací, z nichž je možné předvídat budoucí vývoje.

Činnosti a procesy uvnitř i vně odbavovací budovy jsou spojeny s nutností hromadné obsluhy a tak se často pro správné posouzení požadovaného stavu systému využívá principu teorie hromadné obsluhy, jinak také teorie front. Ta se snaží analyzovat a řešit procesy, kde dochází k proudu cestujících, zavazadel nebo letadel a od příslušných zařízení je požadováno obsloužit tyto objekty. Jejich pohyb může být popisován počtem pohybů (intenzita) za určitý časový okamžik nebo časovým intervalem mezi dvěma po sobě jdoucími pohyby daných objektů.

Systém hromadné obsluhy je možné rozdělit podle několika kritérií. Lze rozlišovat systémy bez fronty, nebo systémy tvořící frontu, které lze dále dělit na systémy s omezenou nebo neomezenou délkou fronty. Dalším kritériem dělení systému může být řád fronty. Zde se setkáváme s pěti typy způsobu přechodu objektů z fronty do obsluhy. Patří zde[11]:

- FIFO (first in, first out) – kdo přijde první, je také jako první obsloužen
- LIFO (last in, first out) – jako první je obsloužen ten, kdo přijde poslední
- PRI – podle priorit
- SIRO (selection in random order) – náhodné pořadí
- GD (general discipline) – obecný řád



Obr. 3. 14 Systém hromadné obsluhy [11]

Obslužné linky lze řadit sériově, paralelně nebo kombinovaně a dělí se na spolehlivé a nespolehlivé linky. Nakonec se rozlišuje také systém uzavřený a otevřený. V případě uzavřeného systému se objekty po obsloužení vrací zpátky na vstup do zdroje, otevřený systém funguje tak, že se objekty již nevracejí zpět do zdroje.

Jednotlivé modely systému hromadné obsluhy jsou definovány svým specifickým pravděpodobnostním rozdělením. Pro systémy hromadné obsluhy spojené s operacemi na letišti je možné využít např. Poissonova rozdělení pravděpodobnosti pro příchody, nebo exponenciální rozdělení pravděpodobnosti pro časové rozdíly mezi pohyby dvou objektů, nebo pro samotnou dobu obsluhy. Je však možné použít i jiných rozdělení pravděpodobnosti.[5]

Při modelování matematických modelů je potřeba situaci co nejvíce zjednodušit a tak se pro názornost systémy hromadné obsluhy označují dle Kendallovy klasifikace, jenž má následující tvar[11]:

$$A / B / x / y / z$$

Kde: A – typ pravděpodobnostního rozdělení, které popisuje intervaly mezi příchody požadavků do systému

B – typ pravděpodobnostního rozdělení, jenž popisuje dobu trvání obsluhy

x – počet obslužných linek v systému

y – kapacita systému hromadné obsluhy

z – řád fronty (FIFO, LIFO...)

U pozice „A“ a „B“ se používají jednotlivé symboly pro rozlišení určitého rozdělení pravděpodobnosti. Tyto symboly jsou pro obě pozice stejné.

Tab. 3. 10 Symboly používané pro klasifikaci SHO [12]

Symbol	Pozice A	Pozice B
M	exponenciální doby mezi příchody	Exponenciální doba obsluhy
D	Konstantní doby mezi příchody	konstantní doba obsluhy
E_K	Erlangovo rozdělení dob mezi příchody	Erlangovo rozdělení doby obsluhy
N	Normální rozdělení dob mezi příchody	Normální rozdělení doby obsluhy
G	Obecné rozdělení dob mezi příchody	Obecné rozdělení doby obsluhy

V případech, kdy je kapacita nějakého subsystému sledována po delší dobu, je výhodnější pro její správné vyhodnocení využívat jiných metod, jež pracují s náhodnou proměnnou. U takového dlouhodobého posuzování kapacity není snadné získat přesná data pomocí běžných matematických vzorců, a proto je lepší využít některou ze simulačních metod. Stejně jako u modelů pro stanovení kapacity provozních ploch se můžeme setkat s podobnými modely pro řešení kapacity terminálu. Existuje mnoho podpůrných softwarových prostředků využívající analytické a simulační zpracování problémů a informací.

Mezi běžně používané simulační modely určující kapacitu letiště lze zařadit např. SIMMOD, RAMS, The Airport Machina nebo TAAM, avšak tyto modely jsou zaměřeny převážně pro subsystémy patřící do neveřejné zóny letiště. Problém při simulaci terminálové kapacity je takový, že je potřeba znát mnoho vstupních parametrů, z nichž je většina těžké získat. Někdy nezbyvá, než si tyto informace koupit od jiných letišť, proto se to pro firmy provádějící simulační analýzy stává nákladným.[5]

Již několikrát došlo k pokusům aplikovat některé simulační programy na kapacitu odbavovacích ploch, avšak výsledky se neseťkaly s velkým úspěchem. Nakonec se dospělo k tomu, že se simulace letištních terminálů vytvářely pomocí modelů využívané v jiném odvětví průmyslu. Mezi tyto programy patří např. EXTENDED, ARENA nebo VITNESS. [5]

3.2.4 Příklady stanovení kapacity subsystémů letiště

Kromě nejčastěji využívaných simulačních a analytických metod, je možné určit kapacitu i jednoduchými vztahy pro rychlý odhad aktuální situace. Většina těchto praktických vztahů vychází z jednotlivých hodnot úrovně služeb, které byly popsány dříve. Pro případ bezpečnostních přepážek IATA doporučuje k zajištění rovnovážné kapacity navrhovat přepážky tak, aby byly schopny propustit maximum cestujících, kteří projdou odbavovacími přepážkami. Návrh tohoto zařízení zahrnuje následující kroky:

- a) Výpočet propustnosti odbavovacích přepážek v intervalu 10 minut, založené na pozorování rychlosti procesu u těchto přepážek. Platí vztah[6]:

$$A = B \cdot (600/C) + D \quad (3.10)$$

Kde: A = požadovaná špička v intervalu 10 minut

B = počet odbavovacích přepážek pro ekonomickou třídu

C = průměrný čas procesu na odbavovací přepážce [s]

D = procento cestujících v business třídě

- b) Výpočet počtu bezpečnostních přepážek. Platí vztah[6]:

$$E = A \cdot (F/600) \quad (3.11)$$

Kde: E = počet bezpečnostních přepážek

F = průměrný čas jedné operace u bezpečnostní přepážky [s]

- c) Výpočet maximálního počtu cestujících v řadě. Platí vztah[6]:

$$Q_{max} = (G \cdot H \cdot 60)/F \quad (3.12)$$

Kde: G = maximální doba ve frontě [min]

H = počet bezpečnostních přepážek

Vypočtené hodnoty se poté porovnají s tabulkou zobrazující hodnoty, které odpovídají jednotlivých úrovním služeb a zjistí se, zdali odpovídají potřebným požadavkům letiště.

S dalšími vztahy, se kterými se můžeme setkat, jsou vztahy pro stanovení počtu zařízení pro výdej zavazadel, případně jiných parametrů spojených s tímto procesem. IATA ve svém devátém vydání „Airport Development Reference Manual“ předpokládá, že 40 % cestujících používá pro přenos zavazadel vozíky, proto upravila původní kritéria úrovně služeb. Aktuální hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 3.12.

Tab. 3. 11 Požadovaný prostor při výdeji zavazadel [6]

Úroveň služeb	A	B	C	D	E
Prostor pro výdej zavazadel (na 1 cestujícího)	2,6	2,0	1,7	1,3	1,0

Počet jednotlivých zařízení se stanovuje zvlášť pro různé typy letadel. V následujícím případě jsou rozlišeny úzkotrupá letadla a širokotrupá letadla. Vztah pro počet zařízení na výdej zavazadel má tuto podobu[6]:

a) Širokotrupá letadla

$$BC = (PHP \cdot PWB \cdot CDW)/(60 \cdot NWB) \quad (3.13)$$

b) Úzkotrupá letadla

$$BC = (PHP \cdot PNB \cdot CDN)/(60 \cdot NNB) \quad (3.14)$$

Kde: PHP – počet koncových nebo transferových cestujících v hodinové špičce

PWB – podíl cestujících, kteří přiletěli širokotrupým letadlem

PNB – podíl cestujících, kteří přiletěli úzkotrupým letadlem

CDW – průměrný čas na převzetí zavazadla na jedno širokotrupé letadlo, nebo předpoklad 45 minut

CDN – průměrný čas na převzetí zavazadla na jedno úzkotrupé letadlo, nebo předpoklad 20 minut

NWB – počet cestujících na jedno širokotrupé letadlo při 80 % zatížení, nebo předpoklad 320 cestujících

NNB – počet cestujících na jedno úzkotrupé letadlo při 80 % zatížení, nebo předpoklad 100 cestujících

Tyto vztahy se zabývaly spíše procesy, kde hraje hlavní roli prostor, jenž je vyhrazen pro daný počet cestujících v závislosti na požadované úrovni poskytovaných služeb. Jsou však i metody, které slouží pro stanovení kapacity v halách a chodbách, které počítají s pohybem cestujících a jejich zavazadel a tudíž se zaměřují na dynamickou kapacitu.

Těmito metodami se zabýval John J. Fruin, který popsal procesy a výpočty pro stanovení prostoru pro pohyb lidí. Kromě samotného pohybu dbal i na jejich rychlost, chování, okolní prostředí atd. Některé parametry a požadavky na prostor při chůzi byly okrajově popsány již v předchozích kapitolách.

Rychlost chůze se liší u každého člověka a závisí na faktorech, jako jsou věk, pohlaví, tělesné omezení nebo vlastní účel pohybu. Předpokládá se, že typická rychlost chůze u člověka je 85 m/min.[14]

Základní rovnice pro tok pohybujících se chodců je[14]:

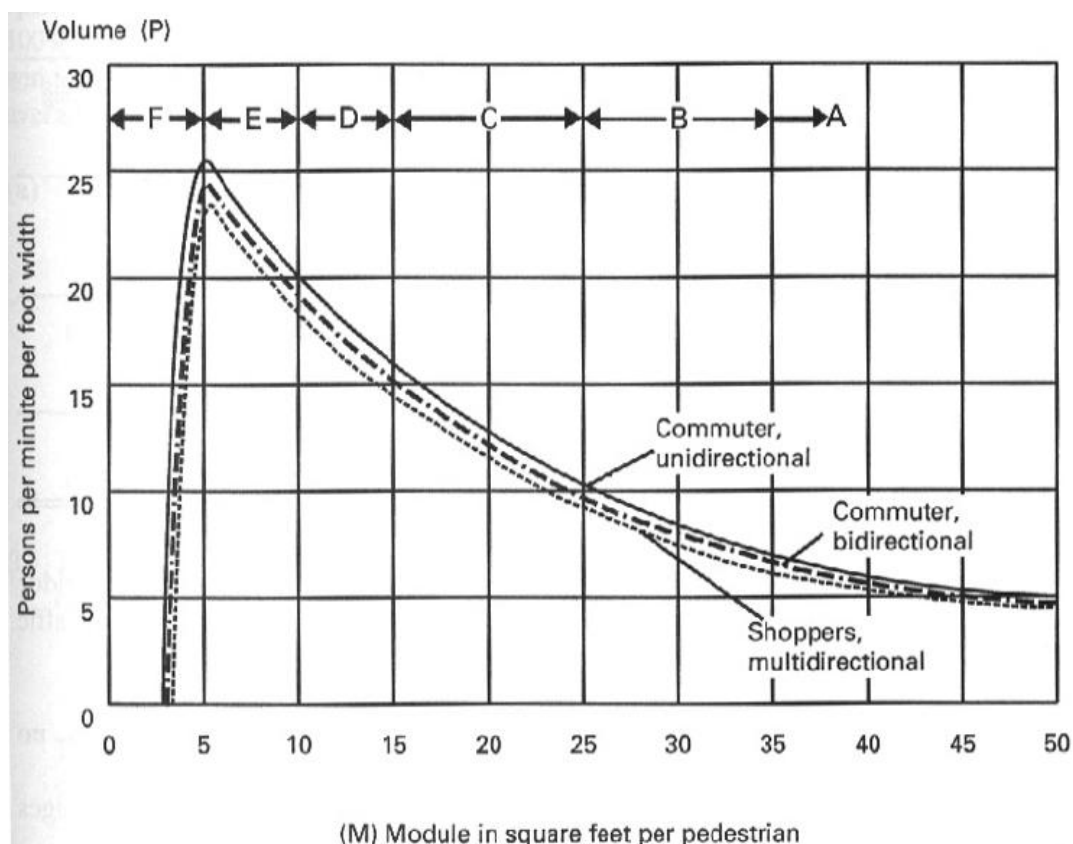
$$f = \frac{s}{a} \quad (3.15)$$

Kde: f – objem toku chodců (pr/m-min)

s – průměrná rychlost chodců (m/min)

a – prostor na jednoho člověka (m²/pr)

Na obrázku 3.16 lze vidět jak počet cestujících a prostor kolem nich ovlivňuje úroveň služby. Tento graf vychází právě ze studie Johna J. Fruina.



Obr. 3. 15 Závislost počtu chodců na prostoru a úrovni služeb [13]

3.3 Letištní sloty a slotová koordinace

Při řešení kapacitní problematiky se často můžeme setkat s pojmem letištní slot a se systémem slotové koordinace.

O leteckou dopravu je v posledních letech stále větší zájem a proto se frekvence letů neustále zvyšuje, na trhu se objevují nové letecké společnosti zaměřující se buď na osobní, nebo nákladní dopravu a s tímto zvyšujícím se počtem letů se zvyšuje i počet operací spojených s leteckou dopravou. Dochází tak k neustálému nátlaku nejen na kapacitu vzdušného prostoru, převážně v Evropě, ale také na kapacitu letišť. K tomu, aby na letištích nedocházelo k nadměrnému zpoždění a provoz byl ve všech směrech plynulý, se používají sloty. Slot, tak jak ho definuje IATA nebo ICAO, je přesně určený čas pro odlet nebo pro přilet letadla z letiště nebo na něj.[2]

Přidělování slotů patří k základní službě poskytované na koordinovaných letištích. Proces přidělování se vztahuje nejen k samotnému určení času odletu a příletu letadla, ale i k odbavování letadla, tudíž zajištění určitých stojánek a nástupních bran, nebo obslužných služeb včetně plnění paliva. Sloty je možné přidělit takřka kterémukoliv letadlu využívající prostory daného letiště, pokud si o něj zažádá.

3.3.1 Kategorie letišť

Samotný počet volných slotů je však také omezen, a pokud poptávka přesáhne nabídku, je letiště v tom okamžiku kapacitně omezeno. Tento okamžik nastává ve špičkových obdobích, ať už během dne, týdne nebo delšího období. Proto se letiště dělí do tří kategorií na základě jejich kapacitních možností a potřeby slotové koordinace.

- **Nekoordinovaná letiště** – nedochází zde k překračování stanovených kapacitních limitů ani ve špičkách
- **Částečně koordinovaná letiště** – u takových letišť může občas dojít ke krátkodobému překročení kapacitních limitů. Pokud se tak stane, je třeba regulovat provoz nebo se dohodnout s leteckými společnostmi během plánování provozu.
- **Plně koordinovaná letiště** – zde poptávka trvale překračuje kapacitní limity. Jelikož není možné v krátkém období tento problém vyřešit (např. výstavbou nové dráhy nebo terminálu) pracují tato letiště jako plně koordinovaná. Zavádí se zde funkce koordinátora letištních slotů. Tento koordinátor má pak rozhodující slovo při procesu přidělování slotů.

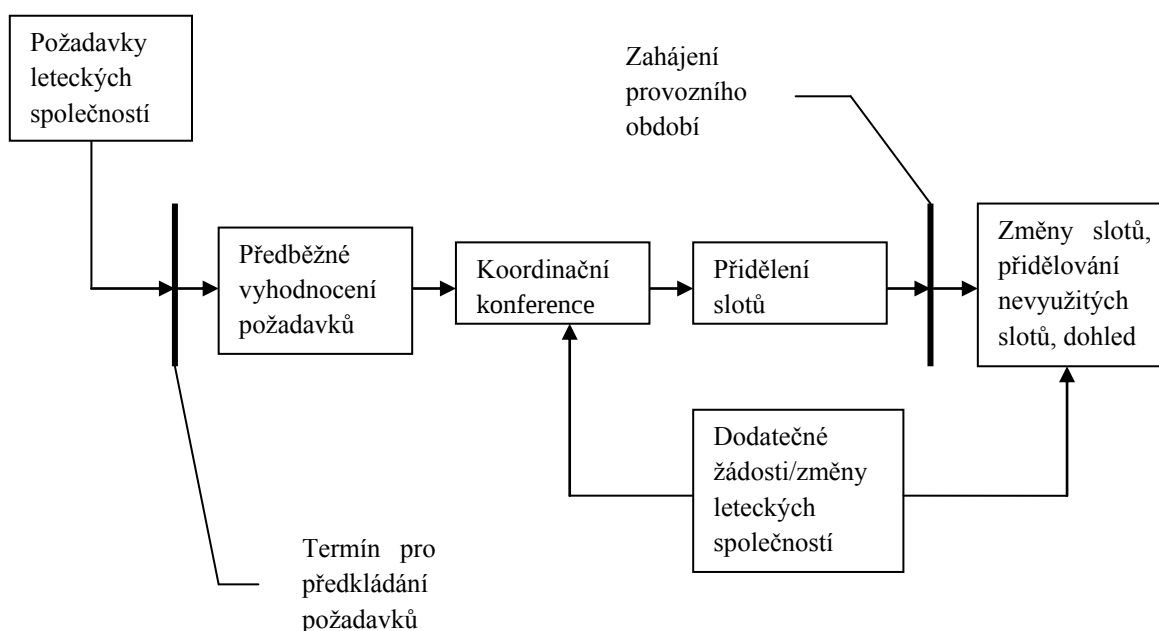
Největší počet plně koordinovaných letišť se nachází v Evropě nebo USA, mnoho jich však přibývá také v oblasti Asie a Pacifiku.

3.3.2 Proces přidělování slotů

Přidělování slotů musí být prováděno nediskriminačním, neutrálním a transparentním způsobem. Na každém koordinovaném letišti je zajištěna funkce koordinátora letištních slotů. Během plnění své funkce musí koordinátor každé své rozhodnutí dokázat odůvodnit a v celém procesu vystupuje jako autorita zodpovědná za efektivní využívání slotů a celé letištní kapacity. Mezi nejdůležitější povinnosti koordinátora patří zejména přidělování slotů a dohlížení nad jejich využíváním, vytváření letových plánů, poskytování informací nebo účast na IATA konferencích o letových řádech.

Proces přidělování slotů má v podstatě každou sezónu stejný průběh. Do předem stanoveného termínu jsou letecké společnosti povinny poslat koordinátorům své požadavky na sloty, které chce v dané sezóně využívat. Po vypršení termínu začne koordinátor pracovat se všemi požadavky a vyhodnocovat je na základě různých priorit, ať už termínu, kdy byl požadavek přijat koordinátorem, nebo jaké důležitosti nabývá. Nakonec je sestaven předběžný letový plán pro účely slotové koordinace. Mohou nastat situace, kdy dvě či více leteckých společností požadují stejný slot. Tyto situace jsou řešeny na Konferenci o letových řádech, jenž se koná dvakrát ročně. Až zde jsou letové plány upraveny do finální podoby a mohou nabýt oficiální platnosti. Dokud tak není učiněno, nesmí být slot garantován žádné letecké společnosti, pouze jí může být sdělena informace týkající se pravděpodobnosti přidělení požadovaného slotu. Této konference se účastní okolo 260 leteckých společností, a proto je

důležité dodržovat přidělené sloty a jakákoliv změna v letovém plánu může mít vliv na ostatní společnosti a letiště.[2]



Obr. 3. 17 Schéma procesu přidělování letištních slotů [2]

3.3.3 Pravidla pro přidělování slotů

Základním pravidlem je, že přidělování slotů nesmí být pro společnosti provozující leteckou dopravu zpoplatněno. Druhým pravidlem je určení pořadí priorit v jakém dostanou letecké společnosti sloty v případě, že dojde ke konfliktní situaci. Přednost před všemi mají zpravidla společnosti provozující pravidelnou obchodní leteckou dopravu. Za nimi následuje plánovaná a neplánovaná nepravidelná letecká doprava, lety všeobecného letectví a nakonec armádní a státní lety. Pravidelné linky mohou využít tzv. historické právo. V případě, že letecká společnost využívala své sloty v předešlém období alespoň z 75%, má právo si tyto sloty ponechat i v nadcházejícím období.

Kromě využívání tohoto historického práva můžou letecké společnosti využívat pravidlo tzv. „využij nebo ztrat“ (use it or lose it). Toto pravidlo umožňuje odebrat společnosti její slot, pokud ho po nějakou dobu nevyužívá.

Přístup „jeden za jeden“ (one for one) dovoluje společností výměnu svých slotů, jestliže se na tom dohodnou. Dalšími variantami jak pracovat se sloty je nákup, prodej nebo aukce.

Svá pravidla mají i formální záležitosti při vyřizování slotů, včetně veškeré dokumentace. Žádost, kterou společnost zasílá, musí obsahovat jméno dopravce a číslo letu, typ letadla a jeho kapacitu, vlastní požadavky na slot (čas, datum, letiště) a účel letu. Na každém koordinovaném letišti je zřízen slotový fond, který obsahuje informace o nově

vytvořených slotech, nevyužitých slotech nebo slotech, které jsou nabídnuty jiným společností, případně společností přicházejících na trh.[2]

Celý proces přidělování slotů by měl být komplexní a otevřený přesunům nebo výměnám. Základem je udržet si kapacitní limity, aby nedocházelo ke zpoždování. Jelikož se tato položka může během určitého období měnit, je společností k dispozici dokument „Oznámení o letištní kapacitě“ – NAC Chart, který obsahuje veškeré informace o kapacitě každého letištního subsystému. V závislosti na tomto dokumentu je možné zjistit, s jakou efektivitou jsou sloty využívány.

V případech, kdy dochází během provozu k jakýmkoliv změnám, kdy je potřeba měnit sloty nebo je upravovat, musí být koordinátor neprodleně informován. Takové informace se předávají ve formě provozních zpráv. Tyto zprávy mají podobu jednoduchých sdělení, často ve formě zkratk a symbolů, které mají specifický význam. Pro snadnější práci s provozními zprávami a jejich distribucí se využívá různých počítačových programů.

Mezi základní provozní zprávy patří např. SCR (žádosti/odpovědi na požadavek o slot), SIE (poskytnutí informací o slotu), SAQ (dotaz na slot), SAL (předběžné přidělení slotu), WIE (dotaz na slot v čekací listině) atd.[2]

4 Hodnocení kapacity dráhového systému v simulačním prostředí

V teoretické části této práce jsou uvedeny různé způsoby hodnocení kapacit letištních subsystémů. Byly popsány faktory ovlivňující schopnost pojmout určitý počet letadel za časový interval a možnosti, jak předvídat zatížení v daném momentě včetně ukázkových postupů a výpočtů pro stanovení teoretické kapacity.

Tato část má za cíl shrnout veškeré poznatky a vytvořit tak praktický příklad v simulačním prostředí, kde by bylo možné vytvořit simulační model a na základě vstupních parametrů a faktorů otestovat několik variant experimentů a zjistit tak, jak se dané faktory chovají a jak ovlivňují kapacitu a celkový provoz.

Vzhledem ke všem dostupným informacím a možnosti zajímavých výstupů byl zvolen jako testovaný objekt dráhový systém. Navíc simulační software Visual Simmod, využitý pro tento praktický příklad, je velmi vhodný právě pro testování dráhového systému.

Jako výstupní parametry při testování RWY budou sledovány vlivy jednotlivých vstupních faktorů, zpoždění způsobené čekáním na uvolnění dráhy a z toho nakonec vyvozená celková kapacita.

4.1 Simulační prostředí Visual SIMMOD

Simulační program Visual Simmod pochází z dílny společnosti AirportTools, jež byla založena v roce 2001 za účelem poskytování plánování letištních zařízení a vzdušného prostoru. SIMMOD (FAA Airport and Airspace Simulation Model) je simulační model, který sleduje pohyb jednotlivých letadel ve vzdušném prostoru a na pohybových plochách. Vstupní parametry obsahují letové plány, ATC pravidla a postupy, struktury letových tratí, letištní plánování a pozemní operace. Výstupy z modelu obsahují odhady cestovní doby a zpoždění pro každé letadlo v každé fázi letu.

Visual Simmod dokáže simulovat provoz na veškerých letištních plochách, včetně odmrazování, nástupu a výstupu cestujících a obsazení nástupních bran. Mimo jiné je také možné plánovat provoz ve vzdušném prostoru a směřovat tak pohyb letadel s větší přesností.

Pro správnou a přesnou funkci modelu je potřeba zajistit a poskytnout veškeré informace o letišti a zařízení, které chceme simulovat. Velkou výhodou je kompatibilita s CAD systémy, kdy je možné si předpřipravit pracovní prostředí a aplikovat jej do vlastního modelu.

Principem Simmodu je vkládání jednotlivě nadefinovaných událostí, jež jsou časově odděleny. Během simulace jsou sledovány všechny operace v časovém sledu počínaje časem 00:00. Pro každou operaci je tedy definován přesný čas vstupu do modelu. Základem pro vytvoření finálního simulačního experimentu je tak vytvoření časového plánu, podle kterého chceme, aby se operace řídily.

Simmod je stochastický model, což znamená, že používá náhodné proměnné k hodnocení různých rozdílů během simulovaného provozu. V rámci těchto náhodných proměnných mohou být definovány následující parametry[17]:

- Čas obsazenosti nástupního systému
- Čas vstupu pro odlety a přílety
- Vzdálenosti pro pojíždění
- Rozstupy mezi letadly
- Zpoždění letů
- Časy pro pojíždění na odbavovacích plochách
- Časy při přejíždění drah

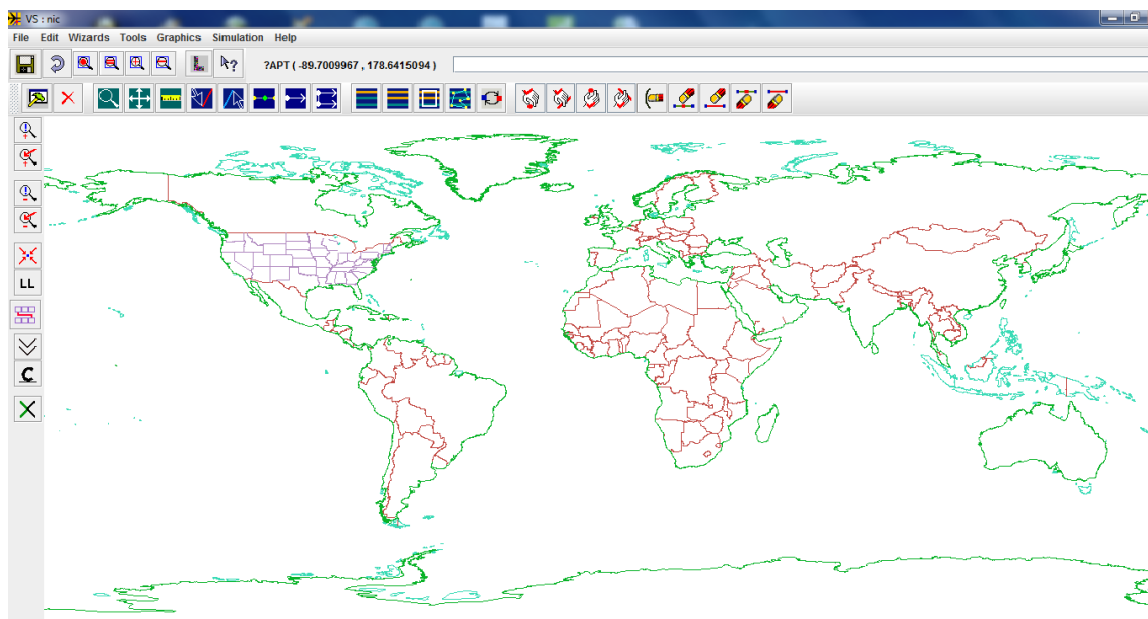
Vstupní data jsou obsažena ve třech základních vstupních souborech:

- Vzdušný prostor*** – tento soubor obsahuje data popisující charakteristiky letových tratí (příletových a odletových), vzdušných operací, separačních minim a kontrolních strategií.
- Letiště*** – obsahuje data o uspořádání provozních a odbavovacích ploch, včetně míst pro vyčkávání a odbavovacích ploch.
- Operace*** – obsahuje informace o všech událostech vstupujících do modelu, tzn. časový plán a charakteristiky letů.

Výstupní data obsahují shrnutí všech parametrů a cestovních časů včetně zpoždění. Tyto časy jsou zobrazeny pro každou část daného letu. Při analýze těchto časů je možné ve výsledku zjistit kapacitu daného subsystému, nebo jak daný vstupní parametr nebo faktor ovlivňuje danou operaci.

Pro přehled výsledků slouží další podprogramy Simmodu, mezi něž patří:

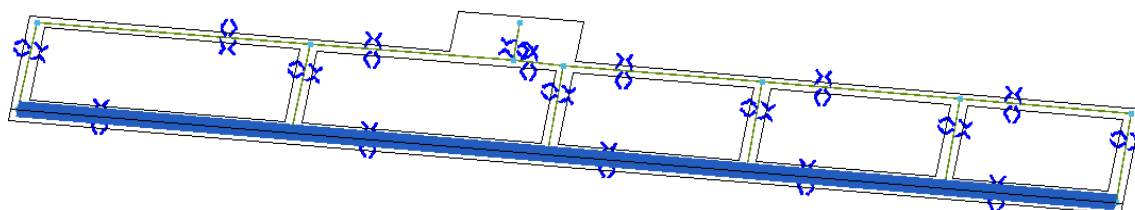
- **Animator** – zobrazuje animaci zadaných operací v reálném čase. Je zde možné přímo vidět důsledky vstupních parametrů, ovšem bez informací o časech nebo zpoždění. Možnost zobrazení i ve 3D.
- **SIMU26 Explorer** – obsahuje veškeré informace o každém letu a jeho průběhu včetně popisů všech operací a času na nich stráveném. Pro každou operaci využívá specifických kódů, avšak pro analýzu dat je výstup příliš rozsáhlý a složitý.
- **SIMMOD Reporter** – vychází ze SIMU26 Explorer. Shromažďuje všechna data z tohoto souboru a podává informace v přehledném tabulkovém editoru. Výstupem tak jsou základní data o letech, informace o využití RWY nebo tratí včetně všech časů a zpoždění.



Obr. 4. 1 Pracovní prostředí programu Visual SIMMOD

4.2 Tvorba modelu

Při tvorbě modelu pro simulaci dráhového systému bylo vycházeno z konceptu letiště Brno – Tuřany. Příkladem tedy bude hodnocení kapacity u jednodráhového systému využívající klasické dráhové výjezdy bez rychloodboček. Vzhledem k tomu, že je hodnocena kapacita RWY, není důležité, jak bude tvořen systém odbavovacích ploch včetně nástupních systémů, neboli gatů. Gate, jinými slovy taktéž odletová brána, představuje konečný bod před nastoupením cestujících do letadla. Po vytvoření pomocného CAD nákresu a vložení do modelačního prostředí byly vytvořeny veškeré dráhy, po kterých se letadla mohou ubírat, tzn. přistávací a vzletová dráha spolu s pojezdovými drahami. Výchozí model letiště je zobrazen na obrázku 4.2.



Obr. 4. 2 Výchozí model letiště pro simulování dat

Pro každou dráhu je možné nadefinovat jednotlivé parametry podle představ uživatele. Pro RWY je důležité nastavit délku (která je však dána návrhem vytvořeným v CADu), šířku, případně pak počet překřížení nebo pokud je potřeba, tak vzdálenost posunutého prahu.

Další nezbytnou částí modelu je vytvoření příletových a odletových tratí. Pro hodnocení dráhové kapacity by stačilo k plynulému chodu modelu pouze využití jedné odletové a jedné příletové tratě. Při příletu letadla nabírají zpoždění ve vzdušném prostoru a nic by na tom nezměnilo zvýšení počtu příletových tratí, navíc by se staly výsledky méně přesnými a nejasnými. Uvažujeme tedy plynulý tok letadel bez dalších nutných zpomalení při přiblížení na přistání. V případě odletových tratí však letadla čekají na odlet stále na letišti a povolení k vjezdu na dráhu a vzletu dostávají tehdy, když je zajištěn bezpečný rozstup mezi oběma letadly následujícími po sobě. Bude tedy testován případ, kdy letadla budou odlétat pouze po jedné odletové trati, nebo po více. Koncepce SID tratí v tomto konkrétním případě bude také podobná koncepci tratí u letiště Brno – Tuřany. Visual Simmod však není schopen tvořit velmi přesné křivky a tak bude systém tratí pro tento příklad zjednodušen.

Na řadu poté přijde tvorba nástupního systému. Jak již bylo zmíněno, cílem je hodnotit kapacitu dráhy, proto byl pro účely odbavení letadel vytvořen pouze jeden gate s neomezenou kapacitou. Ten byl umístěn na odbavovací plochu, která se nachází přibližně v jedné polovině délky dráhy.

Při vjezdu letadel na dráhu je nutné nastavit místo pro vyčkávání, případně pojezdové dráhy, po kterém budou letadla k dráze směřovat. Tento bod je v modelu velice důležitý, jelikož veškeré zpoždění, jenž letadla při vyčkávání nabudou, bude právě na tomto místě. Pro využití celé dráhy byl bod nastaven k místu vjezdu na TWY A, v případě hodnocení různých faktorů pak k místu vjezdu na TWY B (blíže popsáno později).

Jedním z hlavních vstupních parametrů pro simulaci jsou různé operační postupy. Mají za úkol zajišťovat časování operací na daných drahách. Konkrétně pak zajišťují dané rozstupy mezi letadly při odletech nebo příletech nebo jejich kombinaci. Visual Simmod umožňuje vytvoření několika postupů pro několik drah, pro tento případ je však využit jen jeden. Rozstupy letadel vycházejí ze standardů, jež jsou popsány v kapitole 3, konkrétní hodnoty jsou pak zobrazeny v tabulce 3.2 a 3.3. Zvláště je navíc možné určit, pro které kategorie letadel dané postupy platí. Jelikož bude experiment prováděn se všemi kategoriemi, daný postup platí pro všechny.

Procedure data		Time and distance separation data	
PRC_ID	ASG_ID	ARR_10C	DEP_10C
ARR_10C	GA	45	45
	HVY	90	90
	LRG	60	60
	SML	45	45
DEP_10C	GA	45	45
	HVY	90	90
	LRG	60	60
	SML	45	45

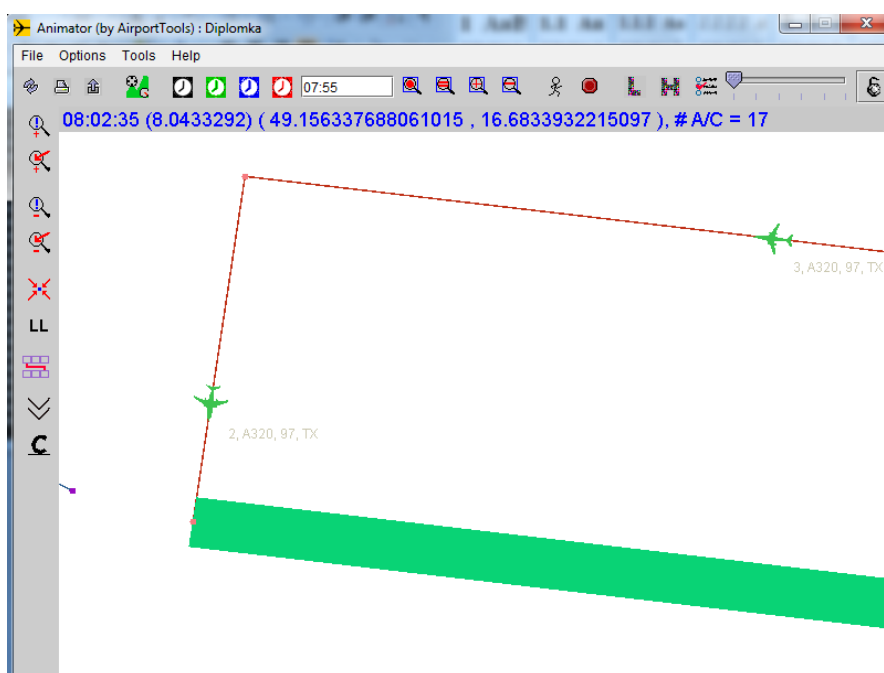
Obr. 4. 3 Definice rozstupů mezi letadly (v sekundách)

Obrázek 4.3 popisuje časové rozstupy letadel, využívané však převážně pro operace na letišti. V případě příletů je potřeba nastavit rozstupy letadel při přiblížení na přistání s uvážením vlivu turbulence v úplavu. Ukázka těchto rozstupů je zobrazena na obrázku 4.4.

Separations (in NM) of groups following this group		
ASG_ID	Minimum Separation	Final Approach Sep.
GA	3	3
HVY	5	5
LRG	3	3
SML	3	3

Obr. 4. 4 Separace mezi letadly při příletu (kategorie Large)

Zde jsme se dostali k bodu, kdy byla nadefinována všechna statická data pro tvorbu simulačního příkladu. Poslední částí je sestavení událostí, čili časového plánu veškerých letů a jejich charakteristiky. Událostí rozumíme buď přílet, nebo odlet. Jednotlivé informace se zadávají do jednoduchého tabulkového editoru. Prvním parametrem je čas, který dané operaci přiřadíme. Jde o čas, kdy se letadlo objeví v modelu, čili pokud jde o odlet, letadlo se objeví na gatu a je zahájeno odbavování cestujících. Jestliže se jedná o přílet, letadlo se objeví na prvním bodě příletové trati a směřuje k letišti na přistání. Abychom zjistili skutečný čas, kdy se letadlo objeví na dráze, je třeba spustit zkušební simulaci a zjistit čas, ve kterém letadlo přistálo nebo odstartovalo z dráhy. Z tohoto času poté odečteme čas pojiždění a odbavování a tak zjistíme, jakou dobu do modelu zadat, aby letadlo přiletělo nebo odletělo z letiště tak, jak potřebujeme. V dalším kroku definujeme typ operace, typ letounu, případně linku, číslo letu, destinaci a odletovou trať. V poslední fázi se přesvědčíme, zdali je vše v pořádku, uložíme data a spustíme simulaci. Animaci výsledné simulace si můžeme prohlédnout v podprogramu Animator, informace o časech a zpoždění pak v SIMMOD Reporter.



Obr. 4. 5 Ukázka z animace nasimulovaných dat

4.3 Simulační experiment

K provedení experimentu je třeba se vrátit zpět k tvorbě modelu a to především k sestavování událostí a časových plánů, z nichž simulace vychází. První příklad se bude zabývat vlivy různých faktorů a budu sledovat, jak je ovlivněna kapacita dráhy. V druhé části bude pozorováno zpoždění letadel v závislosti na počtu operací za jednu hodinu, přičemž se budou měnit vstupní parametry s následným hledáním kritické hodnoty pro stanovení dráhové kapacity.

4.3.1 Plánování experimentu – metoda DOE

Ještě než se dostaneme k samotnému experimentování, je potřeba vytvořit návrh faktorů, které budeme testovat a na jakých úrovních. K tomu slouží metoda DOE (Design of Experiments).

Experimentem si můžeme představit průběžnou změnu pracovních podmínek s výsledkem nalezení nejlepších hodnot a informací o vlivu parametrů, které do experimentu vstupují. Experimentální postupy je možné rozdělit na plánované experimenty a neplánované experimenty. Právě plánované experimenty se řídí metodou DOE. Principem je stanovení počtu pokusů, které bude experiment obsahovat, určení podmínek a pořadí pokusů. Pojem pokus rozumíme zjištění hodnoty ukazatele kvality za předem plánovaných podmínek, pojem experiment vyjadřuje systém všech pokusů. Cílem plánování experimentů je rozhodnout, které faktory významně ovlivňují kvalitu testovaného systému a určení ideální úrovně faktorů.[7]

- **Odezva (charakteristika jakosti)** – veličina, podle které hodnotíme výsledky experimentu. Představuje závislou proměnnou.
- **Faktor (parametr)** – nezávislá návrhová proměnná, která ovlivňuje odezvu. Faktory jsou označovány velkými písmeny, jejich úrovně pak číselnými indexy.

Rozlišují se faktory spojité, u nichž lze nastavit libovolnou hodnotu (např. množství) a diskrétní, které vyjadřují konkrétní hodnotu (např. typ materiálu).[7]

Příklad značení faktoru: A_1 = faktor A na první úrovni

Nastavení faktoru: A = kategorie letadla, A_1 = Small

Pro zjištění vlivu faktorů je potřeba provést experimenty minimálně na dvou úrovních faktorů. Celkový počet experimentů se spočítá následovně:[18]

- 3 faktory ve 2 úrovních: $2^3 = 8$
- 7 faktorů ve 2 úrovních: $2^7 = 128$
- 4 faktory ve 3 úrovních: $3^4 = 81$

Z tohoto příkladu je zřejmé, že je v praxi velmi složité provést tolik experimentů. Proto sestavil Taguchi sadu speciálních tabulek, tzv. ortogonální soustavy, díky nimž je možné provádět pouze část pokusů s maximálním množstvím informací. [18]

Nejmenší ortogonální soustavou je soustava L-4:

Tab. 4. 1 Ortogonální soustava L-4 [18]

Sloupec	1	2	3
číslo experimentu	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Základní popis tabulky:[18]

- Označení L vyjadřuje původ soustavy (Eulerovy latinské čtverce)
- Číslice (4) vyjadřují počet pokusů
- Číslice v soustavě označují úrovně faktorů (1; 2)
- Řádky reprezentují podmínky pro testování
- Sloupce ukazují možnost přiřazení faktoru
- Každá soustava má více možností použití

Celá experimentální procedura se skládá z 5 základních kroků:

- Plánování experimentů
- Navrhování experimentů
- Provedení experimentů
- Analýza experimentů
- Ověřovací testy

První fází je plánování experimentů, kdy se nadefinují cíle experimentu, sestaví se seznam potřebných vstupů a faktorů včetně jejich úrovní a vyzdvihnou se ty hlavní. Během navrhování experimentu se vytvoří základní ortogonální soustava vyhovující pro daný počet faktorů a úrovní. U složitých experimentů (interakce, smíšené úrovně atd.) je nutné používat jiné postupy. Provedení experimentů probíhá dle potřeb na příslušném zařízení (laboratoř, počítačový software) a to v náhodném pořadí. Analýza zahrnuje stanovení optimálních podmínek, procentuální podíl faktorů a odhad hodnoty odezvy při ideálních podmínkách. Ověřovacími testy zajišťujeme, že závěry z analýzy jsou správné.[18]

4.3.2 Hodnocení vlivu faktorů na kapacitu RWY

Cílem následujícího experimentování bude hodnocení vlivu faktorů na hodinovou kapacitu dráhového systému. K dosažení výsledků bude proveden zátěžový test RWY s velkým počtem operací za krátkou dobu. Plán experimentu bude vytvořen metodou DOE, jejíž princip byl popsán v předchozí kapitole. Odezvou bude propustnost dráhy za jednu hodinu.

1) Vstupní hodnoty

V první řadě je potřeba zadat vstupní hodnoty modelu, pro které budu jednotlivé faktory hodnotit. Dráha bude tedy využívána pro přílety i pro odlety v poměru 50:50. Ve stejném poměru budou k jednotlivým operacím přiřazeny i různé kategorie letadel. Celkový počet operací bude 100, čili 50 odletů a 50 příletů, které budou rozloženy do jedné hodiny. Cílem pozorování bude, za jak dlouho je schopna RWY tento počet operací propustit a následně výsledné hodnoty přepočítány tak, aby byly vztaženy k jedné hodině a ukazovaly požadovanou hodinovou propustnost. Veškeré rozložení operací a přiřazení letadel bude pro celý experiment generováno náhodně. Jelikož může samotné náhodné rozdělení operací a letadel ovlivňovat výslednou propustnost, budou ke zjištění tohoto vlivu použita tři různá náhodná rozdělení. Experiment bude tedy prováděn celkem třikrát, pokaždé se stejným časovým plánem i faktory, avšak s jiným rozdělením operací.

2) Faktory

Při hodnocení kapacity letiště je potřeba se zamyslet nad několika faktory, o nichž předpokládáme, že jakýmsi způsobem zasahují do provozu. Pro každý z nich pak stanovíme jejich úroveň. Při rozsáhlém experimentování je možné se setkat s velkým množstvím faktorů a jejich úrovněmi, avšak pro potřeby diplomové práce byl výběr omezen na oblast dráhového systému s využitím menšího počtu faktorů a úrovní. Byly tedy vybrány 4 faktory, u kterých je předpoklad, že každý nějak ovlivňuje celkovou propustnost dráhy. Všechny z těchto faktorů má dvě úrovně, což znamená, že celkový počet experimentů bude $2^4 = 16$. Sledovanými faktory jsou:

- **Mix letadel** – v simulačním příkladu jsou použity tři kategorie letadel (lehké, střední, těžké). Z teoretických poznatků je jasné, že největší roli zde hraje rozstup letadel kvůli turbulenci v úplavu. Proto bude sledována kapacita letadel v závislosti na použití různých kategorií. První úroveň bude využití kategorií lehkých letadel společně se středními, druhou úroveň bude využití lehkých letadel s těžkými. Zástupcem kategorie lehkých letadel je letoun DHC 6, střední kategorii zastupuje Airbus A320 a pro kategorii těžkých letadel byl vybrán Boeing B747-200. Každý typ letounu má Simmodem danou konfiguraci, včetně jejich rychlostních parametrů, doby odbavení při odletu i příletu a rychlosti během pojíždění.

- **Vjezd na dráhu při odletu** – uvažujeme-li rozestavení pojezdových drah stejně jako na letišti Brno – Tuřany, v ideálním případě budou letadla vjíždět na dráhu z TWY A ve směru dráhy 10, což je první úroveň tohoto faktoru. V praxi však může nastat případ, kdy je část dráhy neprovozuschopná a je nutné posunout prahu, stejně jako v situaci, kdy není možné použít TWY A, například z důvodu opravy pojezdové dráhy nebo jiných provozních důvodů. Proto nastavíme v simulačním modelu možnost vjezdu a startu letadel z TWY B, jakožto druhou úroveň faktoru. Byla taktéž zvažována možnost využití jednoho vjezdu pouze pro lehkou kategorii letadel a druhý vjezd pro ostatní kategorie. Visual Simmod ovšem tuto situaci nedokáže nadefinovat a tak byly vjezdy vždy použity pro všechny typy letadel.
- **Výjezdy z dráhy** – podobný případ jako u vjezdů na dráhu při odletech, nastává při využití dráhových výjezdů při přiletu letadel. Každý typ letounu požaduje různou délku dráhy pro přistání. V tomto simulačním příkladu je výjezd B určen pro kategorii lehkých letadel, výjezd D pro kategorii středních letadel a výjezd A pro kategorii těžkých letadel (první úroveň). Pomocí tohoto faktoru bude testováno, jak se změní propustnost, jestliže by nebylo možné využít výjezd B, C a D a letadla lehké i střední kategorie by musela využít až výjezd E (druhá úroveň). Čas obsazenosti dráhy by se tak zvýšil v rámci několika dalších desítek sekund.
- **Vliv odletových tratí** – tento faktor je založen na separacích letadel při jejich odletu z letiště v závislosti na jejich horizontálním směřování ve vzdušném prostoru. V tomto příkladu byl bod rozvětvení tratí umístěn přibližně 3,5 NM za dráhou letiště. Zkusíme tedy testovat, zda má struktura odletových tratí nějaký vliv na propustnost dráhy. První úroveň bude využití pouze jedné odletové tratě, druhou úroveň bude využití všech odletových tratí, které se vážou k RWY 10.

Tab. 4. 2 Přehled faktorů a jejich úrovní

<i>Faktor</i>	<i>Úroveň 1</i>	<i>Úroveň 2</i>
A) Mix letadel (kategorie)	Lehké + Střední	Lehké + Těžké
B) Vjezd na dráhu při odletu	TWY A	TWY B
C) Výjezdy z dráhy (B + C + D)	Otevřeny	Uzavřeny
D) Vliv odletových tratí	Jedna	Všechny

V tomto momentě jsou navrženy všechny kombinace experimentů, které chceme provést. Do modelu tedy vstoupí 100 letadel, náhodně rozvrženy do 50 odletů a 50 přiletů při daných kategoriích. Během každého z 16 experimentů se podmínky provozu mění a je sledován celkový čas propustnosti RWY. Celý systém experimentů bude proveden třikrát, pokaždé pro jiné náhodné rozdělení operací, aby byl zahrnut i tento vliv. Celkem bude tedy provedeno 48 pokusů.

Hodnoty propustností pro každé náhodné rozdělení operací a každou kombinaci experimentu jsou zobrazeny v Tab.4.3. Propustnost je dána počtem operací vykonaných za jednu hodinu.

Tab. 4. 3 Přehled všech experimentů a výsledků propustností

Číslo pokusu	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	Propustnost 1	Propustnost 2	Propustnost 3
1	L + S	TWY B	Uzavřeny	Jedna	52.91	53.93	52.11
2	L + S	TWY A	Uzavřeny	Jedna	53.19	54.23	52.41
3	L + S	TWY B	Otevřeny	Jedna	52.91	53.93	52.11
4	L + S	TWY A	Otevřeny	Jedna	53.19	54.23	52.41
5	L + T	TWY B	Uzavřeny	Jedna	48.94	49.96	48.28
6	L + T	TWY A	Uzavřeny	Jedna	48.35	50.25	48.56
7	L + T	TWY B	Otevřeny	Jedna	48.94	49.96	48.28
8	L + T	TWY A	Otevřeny	Jedna	48.35	50.25	48.56
9	L + S	TWY B	Uzavřeny	Všechny	64.34	61.23	60.52
10	L + S	TWY A	Uzavřeny	Všechny	64.68	61.63	60.88
11	L + S	TWY B	Otevřeny	Všechny	64.34	61.23	60.52
12	L + S	TWY A	Otevřeny	Všechny	64.68	61.63	60.88
13	L + T	TWY B	Uzavřeny	Všechny	54.69	54.17	52.73
14	L + T	TWY A	Uzavřeny	Všechny	54.41	54.52	52.04
15	L + T	TWY B	Otevřeny	Všechny	54.69	54.17	52.73
16	L + T	TWY A	Otevřeny	Všechny	54.41	54.52	52.04

Z výsledků je zřejmé, že různé náhodné rozdělení operací hraje menší roli a výsledky se tak u některých experimentů o málo liší. Z prvotního pohledu sledujeme, že největší propustnost vykazují experimenty, kdy byly v modelu použity letadla malé společně se střední kategorií. Rozbor vlivů jednotlivých faktorů bude rozebrán v kapitole věnující se analýze výsledků.

4.3.3 Hodnocení kapacity RWY a zpoždění letadel

Druhým příkladem bude hodnocení kapacity RWY , kde bude navíc sledován průběh zpoždění v závislosti na počtu letadel a hledáno maximální množství operací, u kterých se žádné zpoždění nevyskytne. Tím bude dán kritický bod představující dráhovou kapacitu. Princip bude tedy podobný jako u předchozího příkladu. Kapacita však nebude stanovena z času, za který dráha daný počet operací propustí, ale bude zjišťována postupným simulováním a určitým počtem operací.

Vzhledem k tomu, že se vstupní parametry neustále mění, bylo by velice složité použít pro plánování experimentu metodu DOE. Experimenty jsou tak rozděleny do několika operací, u nichž bude testován vliv jednotlivých kategorií letadel a pozorováno, jak se bude měnit hodinová kapacita. Do modelu již nebude vkládána vstupní hodnota 100 operací, nýbrž přesná hodnota, u které bude důležitým výstupním parametrem zpoždění.

V tabulce 4.4 je popsán plán simulací pro druhý příklad. Pro jednotlivé operace budou hodnoceny nejdříve každé kategorie letadel zvlášť, nakonec pak pro všechny dohromady.

Tab. 4. 4 Rozložení experimentů pro hodnocení kapacity

Operace	Kategorie letadel
Odlety letadel s využitím jedné odletové tratě	Lehká
	Střední
	Těžká
	Všechny
Odlety letadel s využitím všech odletových tratí	Lehká
	Střední
	Těžká
	Všechny
Přílety letadel	Lehká
	Střední
	Těžká
	Všechny
Přílety a odlety letadel s využitím jedné odletové tratě	Lehká
	Střední
	Těžká
	Všechny
Přílety a odlety letadel s využitím všech odletových tratí	Lehká
	Střední
	Těžká
	Všechny

Faktory, které budou do těchto experimentů zasahovat, jsou jednotlivé operace prováděné buď zvlášť nebo dohromady, různé kategorie letadel, rovněž hodnocené zvlášť nebo dohromady, a vliv odletových tratí. V modelu letiště nebude docházet k žádnému omezení, čili všechny výjezdy jsou otevřené a práh dráhy není posunutý. Jednotlivé kategorie letadel budou zastupovány stejnými modely jako tomu bylo v předchozím příkladu (viz kapitola 4.3.2). V případě využití všech kategorií bude každý typ letounu zaujímat jednu třetinu celého počtu letadel, náhodně rozdělených pro jednotlivé operace. Stejný postup platí i pro všechny operace, čili náhodné rozdělení v poměru 50% příletů a 50% odletů. Výsledkem simulací bude zjištění hodinové kapacity dráhy využívané pouze pro přílety, pouze pro odlety nebo pro obě operace, při vlivech kategorií letadel (rozdíl v separacích letadel) a jejich uspořádání, a vlivech odletových tratí. Finálním ukazatelem bude grafické znázornění závislosti hodinové kapacity (počtu operací) na průměrném zpoždění letadel.

4.4 Analýza výsledků

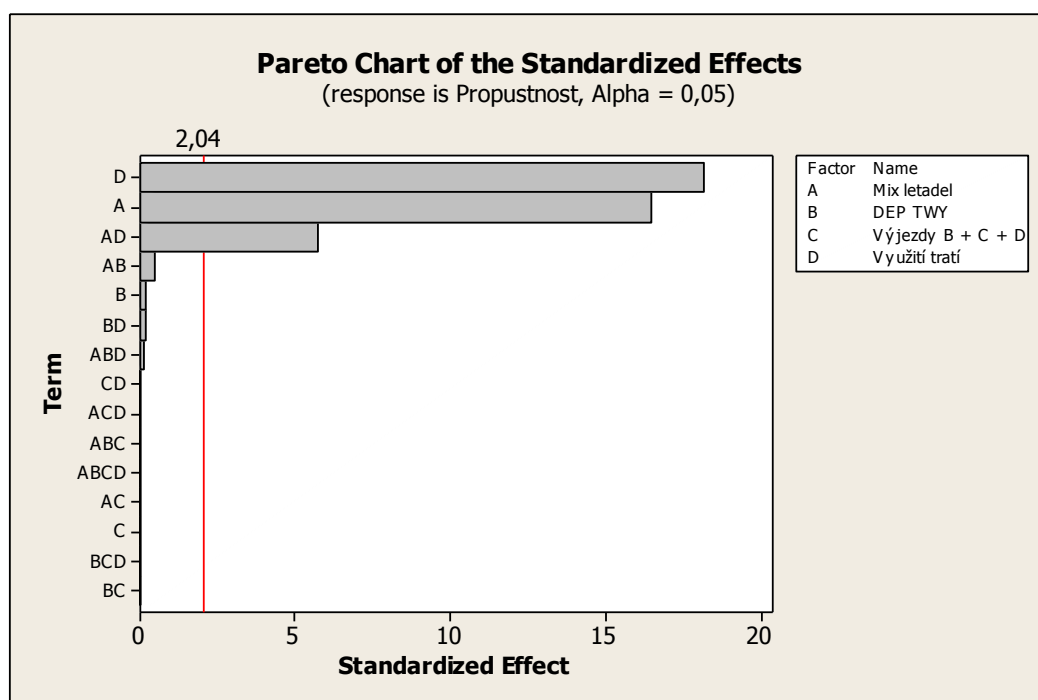
Po dokončení všech simulací a dosažení konečných výsledků se dostáváme k porovnání použitých faktorů ovlivňující operace na letišti.

4.4.1 Analýza vlivu faktorů na kapacitu RWY

Prvním příkladem bylo hodnocení čtyř vybraných faktorů společně s jejich dvěma úrovněmi. Výsledkem tak bylo 16 experimentů pro každé ze tří náhodných rozdělení operací. Díky simulačnímu programu jsme dosáhli určitých výsledků vyjadřující hodinovou propustnost dráhy, ze kterých je sice možné vyčíst, co nejvíce ovlivňuje provoz na letišti, avšak vzhledem ke kombinacím faktorů a úrovní není zřejmé, do jaké míry zasahují do celkové propustnosti.

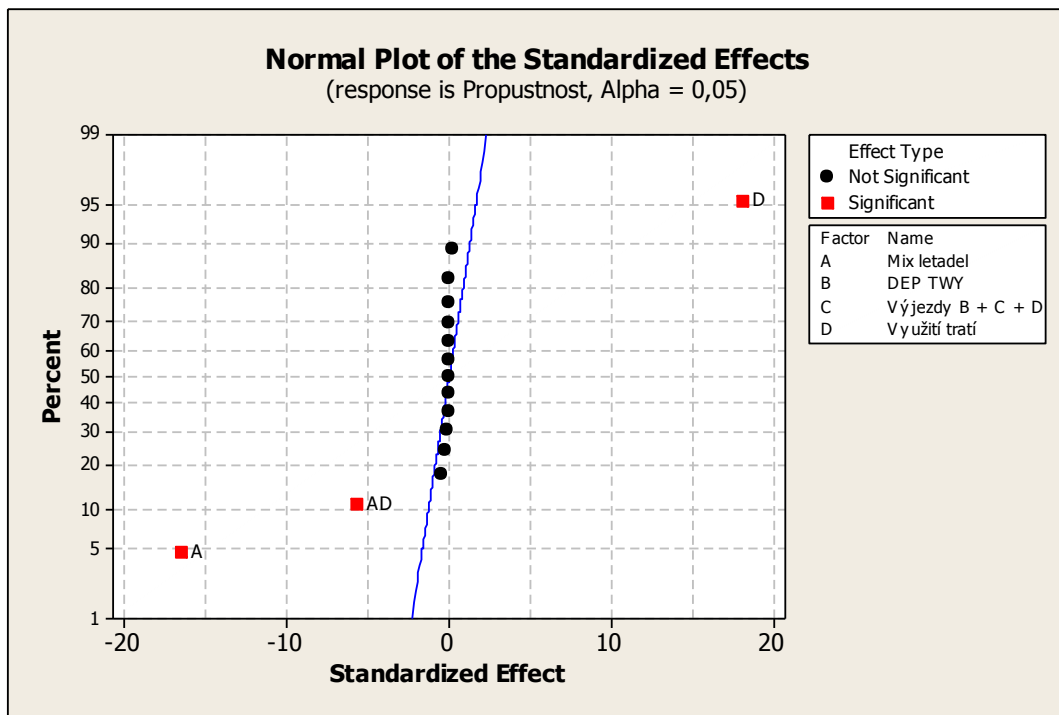
K analýze výsledků nám pomůže software Minitab, který slouží jako pomůcka pro statistické metody určené právě pro analýzu dat. Minitab mimo jiné dokáže analyzovat i experimenty vycházející z metody DOE. Do této funkce nadefinujeme všechny faktory a úrovně použité v tomto příkladě a program vytvoří stejné rozložení experimentů, jak je zobrazeno v Tab. 4.3. Do prázdného sloupce dopíšeme výsledné hodnoty ze simulací a vybereme grafy, které nám znázorní vlivy faktorů.

Obr. 4.6 znázorňuje Paretův diagram významnosti faktorů. Hladina významnosti je $\alpha = 0,05$. Z tohoto diagramu je zřejmé, že největší vlivy na propustnost mají odletové tratě a mixy letadel. Červenou čarou je vyznačena kritická hodnota významnosti.

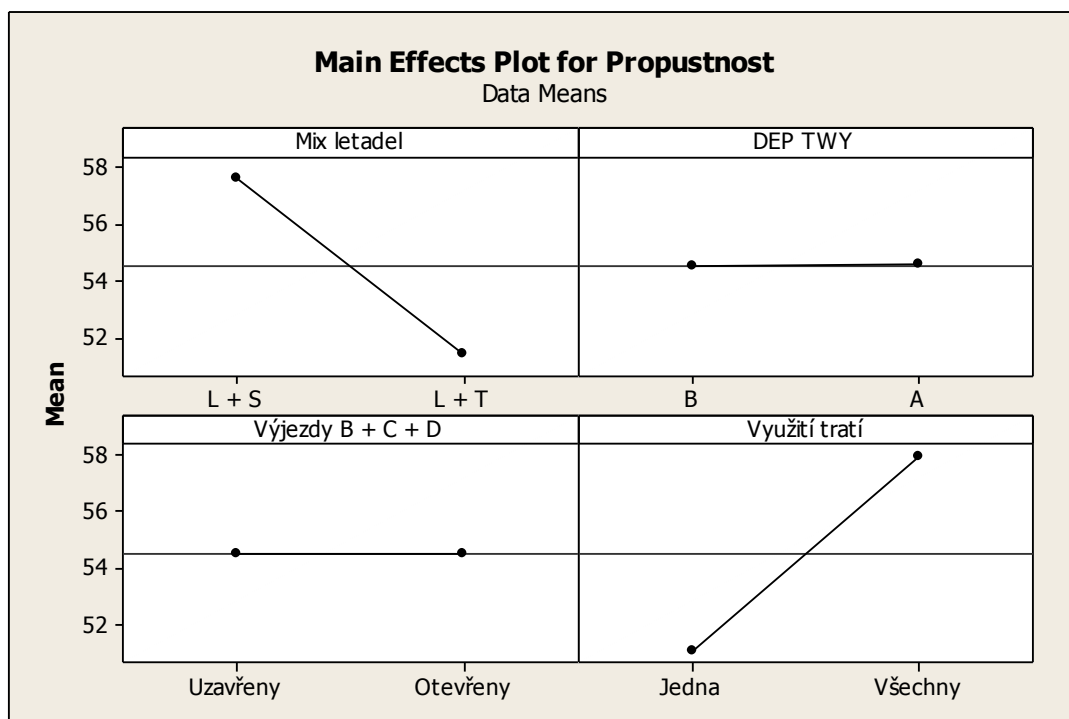


Obr. 4. 6 Paretův diagram významnosti faktorů

Korelační diagram na obrázku 4.7 vyznačuje významné (červená barva) a nevýznamné (černá barva) faktory. Modrá čára znázorňuje průběh ideálních teoretických hodnot. Hladina významnosti je $\alpha = 0,05$. Tento diagram má ukázat, zda jsou hodnoty v normálu. V tomto případě opět vidíme, že význačnými faktory jsou mix letadel a odletové tratě, společně s jejich kombinací.



Obr. 4. 7 Korelační diagram



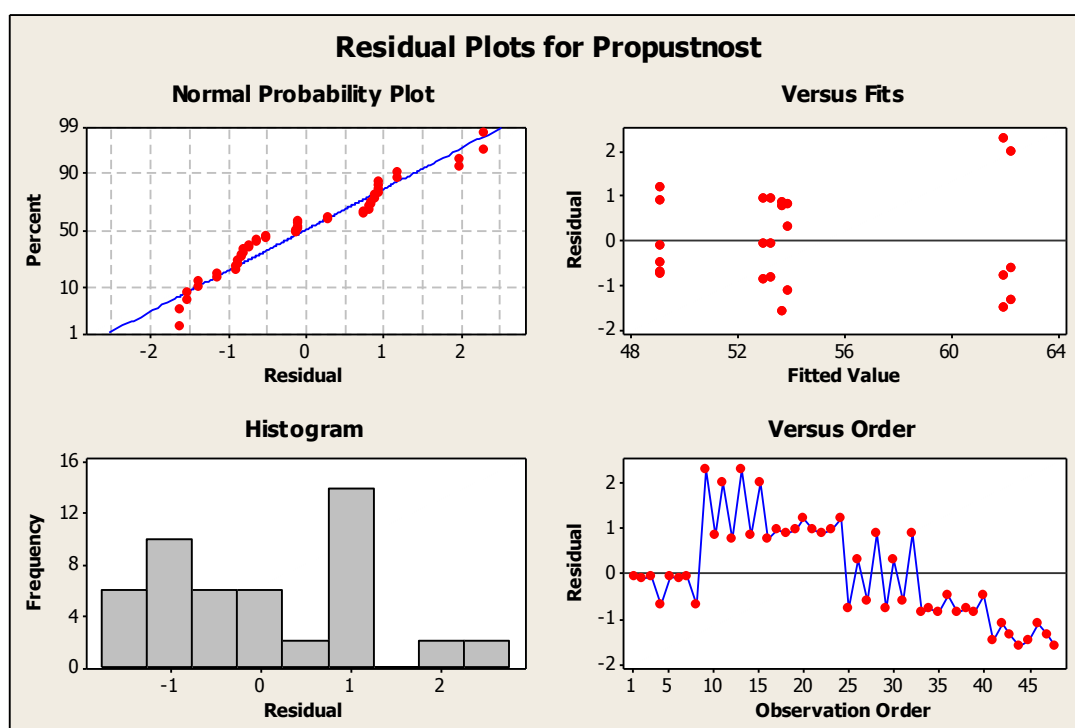
Obr. 4. 8 Významy úrovní jednotlivých faktorů

Na obrázku 4.8 je popsán vliv jednotlivých úrovní na střední hodnotu propustnosti. U faktoru sledující mix letadel můžeme vidět rozdíl mezi mixem lehkých a středních letadel a mixem lehkých a těžkých letadel. Tento rozdíl je dán vlastnostmi letounů a jejich požadavky na letové postupy, hlavně pak rozstupy mezi letadly z důvodu turbulence v úplavu. Vzhledem k tomu, že rozstupy mezi lehkými a středními letadly jsou kratší než u těžkých letadel, je u použití lehčích kategorií zřejmé, že se počet operací za danou dobu zvýší.

Vliv posunutého prahu dráhy, čili využití TWY B pro vyčkávání na vzlet má dle výsledků minimální důsledek na propustnost, nepatrně se však zvyšuje, pokud je v provozu celá dráha včetně pojezdových drah.

Již z předchozích grafů bylo zřejmé, že typ použitého výjezdu nemá na propustnost žádný vliv. Může to být dáno příliš malým časovým rozdílem v obsazenosti dráhy a tak se tento faktor na kapacitu neprojeví.

Nejvýznamnějším faktorem je v tomto příkladu využití odletových tratí. Při porovnání jeho úrovní zjistíme, že využitím všech odletových tratí dosáhneme vyšší propustnosti než u využití jedné tratě. Takový rozdíl může být způsoben letovými postupy při odletu letadel z letiště a z jeho vzdušného prostoru, konfigurací tratí nebo náhodným rozdělením tratí během plánování experimentů. Vzhledem k velké zátěži RWY během krátké chvíle existuje i možnost nesprávného plnění časového plánu, který jsem do modelu nadeřinoval.



Obr. 4. 9 Diagramy výchylek od středních hodnot

Obrázek 4.9 zobrazuje různé způsoby grafických znázornění výsledků jednotlivých experimentů a jejich výchylky od střední hodnoty, rozptyly, významnosti a závislosti na propustnosti daných pokusů.

4.4.2 Analýza kapacity RWY a zpoždění letadel

Druhým příkladem bylo hodnocení kapacity RWY a sledování průběhu zpoždění v závislosti na počtu letadel, s cílem nalézt maximální hranici propustnosti s nulovým zpožděním. Rozhodujícími vstupními hodnotami byly separace letadel při každé operaci. Nejdříve byla hodnocena kapacita pro každý typ letounu zvlášť, poté byla provedena simulace pro všechna letadla najednou, při rovnoměrném zastoupení a náhodném rozdělení. Rovněž byly hodnoceny přílety a odlety samostatně, nakonec pak společně v poměru 50% příletů a 50% odletů.

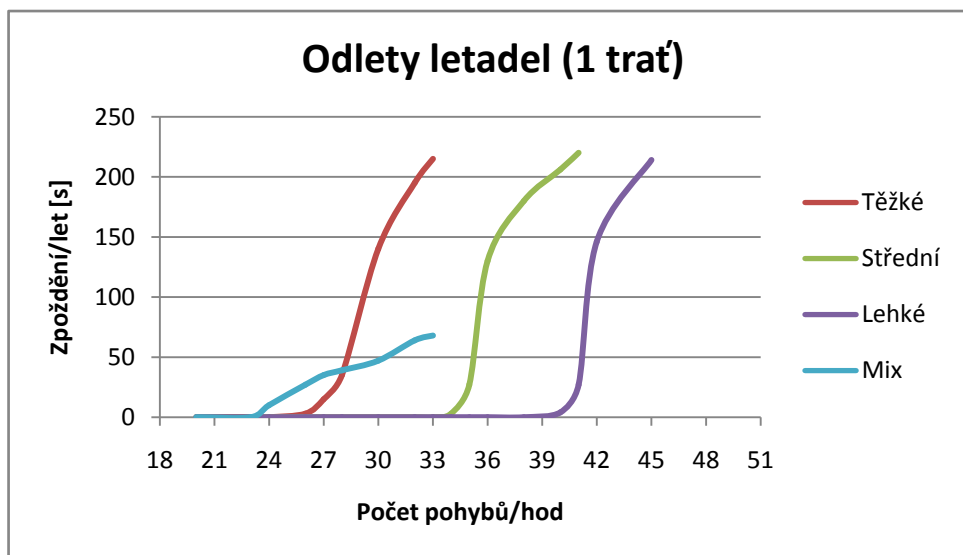
V tabulce 4.5 jsou znázorněny kapacitní meze pro jednotlivé operace a kategorie letadel. Tyto kritické hodnoty byly nalezeny postupným testováním různých množství pohybů a vyhodnoceny z průběhu zpoždění v závislosti na počtu letadel.

Tab. 4. 5 Výsledné hodnoty kapacit získané postupným experimentováním

Operace	Kategorie letadel	Kapacita / hod
Odlety letadel s využitím jedné odletové tratě	Lehká	40
	Střední	34
	Těžká	26
	Všechny	23
Odlety letadel s využitím všech odletových tratí	Lehká	41
	Střední	35
	Těžká	27
	Všechny	23
Přílety letadel	Lehká	80
	Střední	80
	Těžká	60
	Všechny	40
Přílety a odlety letadel s využitím jedné odletové tratě	Lehká	46
	Střední	38
	Těžká	26
	Všechny	29
Přílety a odlety letadel s využitím všech odletových tratí	Lehká	47
	Střední	39
	Těžká	27
	Všechny	29

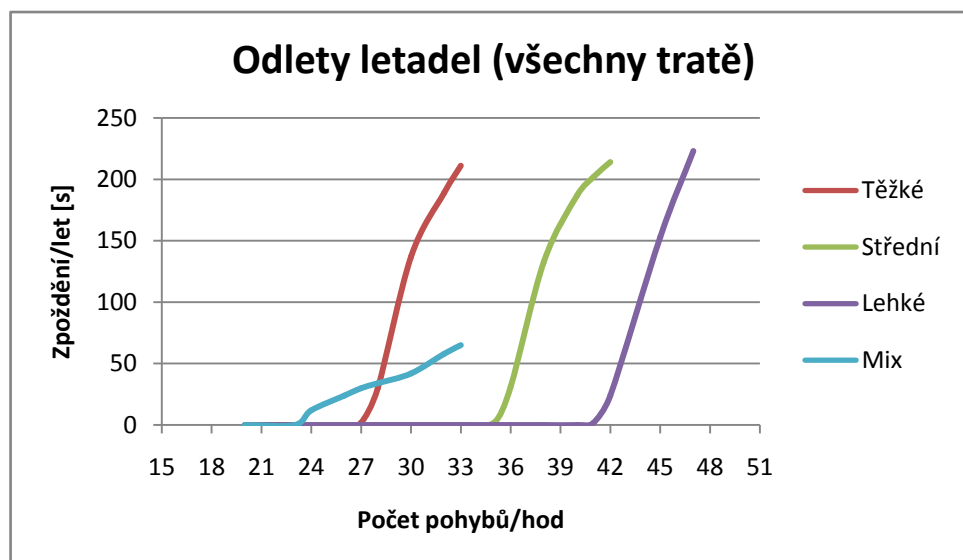
Průběhy zpoždění v závislosti na počtu letadel za jednu hodinu jsou vyobrazeny v následujících grafech, z nichž každý zastupuje jednu operaci. V grafu jsou barevně rozlišeny jednotlivé kategorie letadel a průběh zpoždění na jejich počtu.

a) Odlety letadel s jednou odletovou tratí



Obr. 4. 10 Průběh kapacity při odletech letadel (jedna trať)

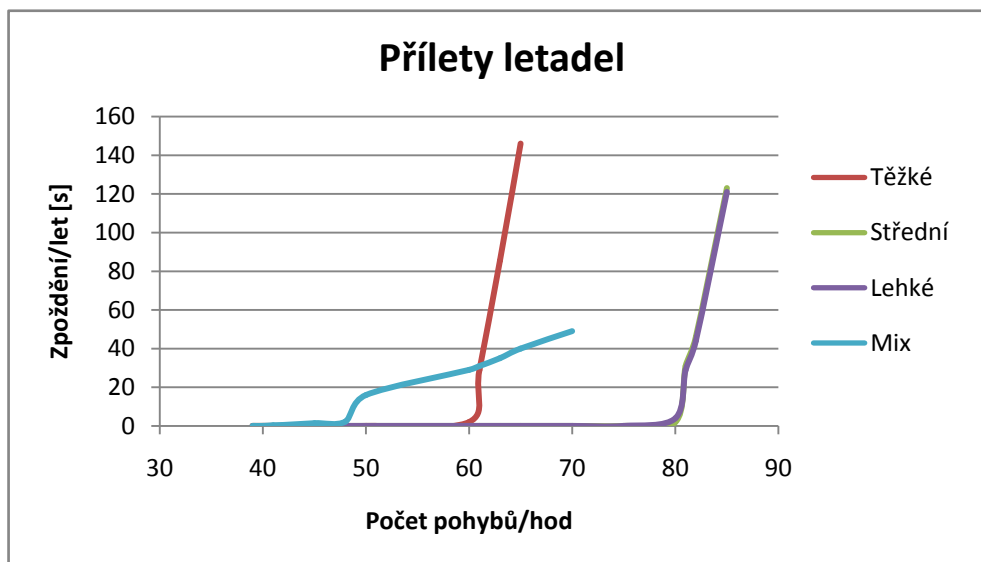
b) Odlety letadel se všemi odletovými tratěmi



Obr. 4. 11 Průběh kapacity při odletech letadel (všechny tratě)

Předchozí dva systémy experimentů ukazují průběh zpoždění při odletu letadel. Pro tento příklad opět platí, že při dané konfiguraci tratí je u jejich plného využití nepatrně vyšší kapacita než u využití pouze jedné tratě. V praxi se tyto rozdíly mohou poměrně lišit, jelikož každé letiště má vlastní konfiguraci tratí a systém jejich využívání. V případě tohoto příkladu může být rozdíl způsoben rozdělením tratí při simulaci, letových postupech při odletu z letiště nebo nastavením modelu.

c) Přilety letadel



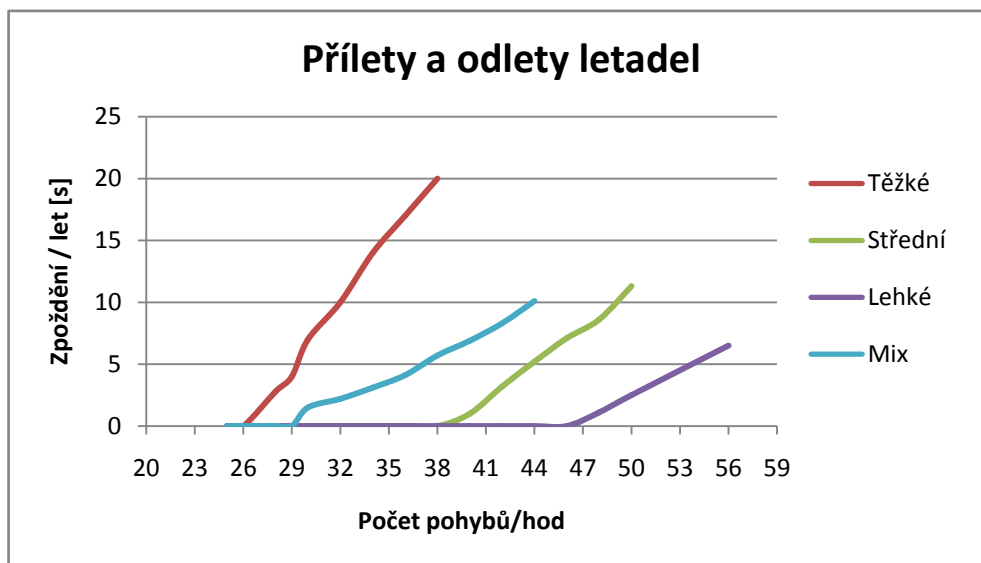
Obr. 4. 12 Průběh kapacity při přiletu letadel

U přiletů byla hodnocena optimální situace při přiblížení na přistání bez možnosti způsobení dalšího zpoždění ve vzdušném prostoru a vyčkávání letadel. Proto byla využita pouze jedna příletová trať sloužící pro navedení letadel na letiště.

Průběh je zde podobný jako u odletů, avšak celková hodinová kapacita je téměř dvojnásobně vyšší než u odletů. Jak již bylo vysvětleno v předchozích kapitolách, separace letadel při přiletu na letiště je dána vzdáleností, kdežto u odletů je dána časem. Je tak možné, že letadlo je danou vzdálenost rozestupu schopno urazit za kratší čas, než je tomu u odletů. Významnou roli může hrát rychlost letounu při přiblížení na přistání. Model však pracuje pouze s konstantní rychlostí a tak není možné nasimulovat přesné postupy a dosáhnout tak jasnějších výsledků.

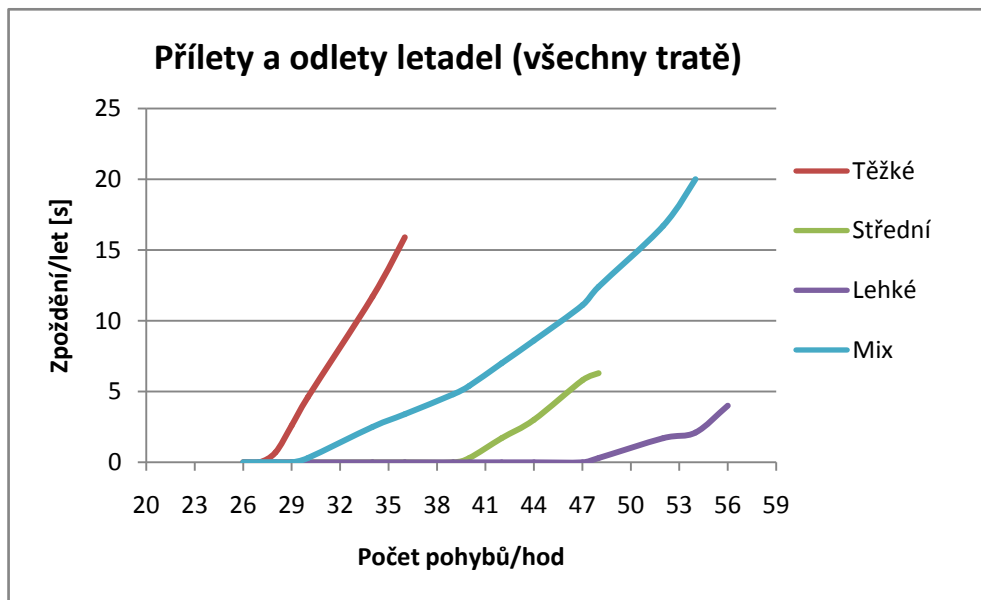
Poslední dva systémy experimentů se zabývaly hodnocením kapacity při využití dráhy pro všechny operace. Mezi využitím počtu odletových tratí lze opět zpozorovat nepatrný rozdíl při různých kategoriích letadel, jinak však průběh zůstává stejný. Grafy jsou znázorněny níže.

d) Přílety a odlety letadel s jednou odletovou trasí



Obr. 4. 13 Průběh kapacity při příletech i odletech

e) Přílety a odlety letadel se všemi odletovými tratěmi



Obr. 4. 14 Průběh kapacity při příletech a odletech se všemi odletovými tratěmi

Ze všech experimentů je jasné, že vyšší poměr lehčích letadel přispívá k větší propustnosti. Zvýšení kapacity se dá dosáhnout taktéž řazením jednotlivých typů letadel (pokud jsou využívány všechny kategorie). Pokud by byla letadla řazena od nejlehčích po ta nejtěžší, bylo by možné dosáhnout takové kapacity, jakou vykazují letadla těžké kategorie. V tom momentě by záleželo na počtu použitých letadel, a jak se to projeví na zpoždění. Využitím RWY zvláště pro přílety nebo pro odlety by tak byla celková hodnota kapacity se všemi letadly na úrovni kapacity s využitím pouze těžkých letadel. Tento systém je pohodlný například pro pracovníky ATC, jelikož nedochází k tak velké zátěži.

Důvodem rozdělení operací na přílety a odlety bylo ukázání si, jak by vypadal provoz například na dvou paralelních drahách, kdy je jedna dráha využívána pouze pro přílety a druhá pouze pro odlety. Obě dráhy by však musely mít v praxi stejnou konfiguraci, abychom mohli uvažovat o jejich porovnání na základě počtu operací, využití různých kategorií letadel, konfigurací tratí a letových postupech. Při konfiguraci dráhového systému bylo však v tomto příkladu vycházeno z letiště Brno – Tuřany, které má dráhový systém s jednou VPD. Hlavním ukazatelem je tak kapacita bez omezení využívání příletů a odletů.

5 Závěr

Cílem diplomové práce je seznámit se s kapacitní problematikou letišť a jejich subsystémů. Kapacita letiště je v poslední době čím dál častěji probírána z důvodu velké poptávky po letecké dopravě. Problémy se vyskytují zejména na velkých hubových letištích, u nás pak může být příkladem Letiště Václava Havla, kdy se už delší dobu řeší výstavba paralelní dráhy.

První část práce se zabývá analýzou současných metod hodnocení letištních subsystémů. Vzhledem k významnosti je problematika zaměřena pouze na kapacitu provozních ploch a odbavovací budovy. Byly popsány základní pojmy týkající se kapacity a vyčleněny jednotlivé faktory ovlivňující kapacitu těchto subsystémů. Mimo jiné bylo vysvětleno několik ukázkových výpočtových metod pro stanovení teoretické kapacity v případě dráhového systému, u odbavovacích budov byl hlavním ukazatelem systém úrovně služeb, který kategorizuje jednotlivé prostory pro čekání.

Hlavním cílem práce bylo vytvoření praktického příkladu v simulačním prostředí Visual Simmod. Pomocí tohoto softwaru je možné modelovat různé provozní situace a zjišťovat, jaký to má vliv na kapacitu, jak dlouho trvají jednotlivé fáze letu, poježdění a odbavení včetně možnosti využití podprogramu Animator, jenž slouží pro animaci namodelovaných operací.

Jako ukázkový příklad byly sestaveny dva modely. První model aplikoval metodu DOE. Cílem tohoto příkladu bylo hodnocení vlivu různých faktorů na propustnost dráhy za jednu hodinu. Byly vybrány 4 faktory se dvěma úrovněmi, načež bylo následně provedeno 16 různých simulací. Operace však byly náhodně rozděleny, a aby byl zjištěn i vliv tohoto rozdělení, celý systém experimentů byl testován ještě dvakrát. Celkem tak bylo provedeno 48 experimentů. Z výsledků propustností bylo možné předem předpokládat, že největší hodnoty budou u experimentů využívající mix lehkých a středních letadel. Poměrně překvapivým výsledkem byl vliv odletových tratí, jenž se na propustnosti dráhy projevil nejvíce. Tyto vlivy faktorů byly vyhodnoceny v programu Minitab, v němž byly taktéž graficky znázorněny jednotlivé kombinace faktorů a úrovní. Z grafů je patrné, že největší vliv mají skutečně odletové tratě společně s kategoriemi použitých letadel. Jelikož jsou obecně separace letadel určeny mezinárodními pravidly řízení provozu, nelze předpokládat změnu při tvorbě jiného modelu. Odletové tratě jsou však dány parametry vzdušného prostoru daného letiště, tudíž by mohl být vliv tohoto faktoru na každém letišti jiný, stejně tak, jak by se mohl lišit s určitým směrem dráhy. V tomto případě tedy rozdíl dráhy 10 a dráhy 28. Naopak faktory týkající se pojezdových drah a výjezdů z hlavní dráhy se jevily jako ne příliš zásadní pro výslednou propustnost. Větší rozdíl by mohl být zaznamenán například při využití pojezdových drah pro rychlé odbočení.

Jelikož bývá jedním z ukazatelů kapacity zpoždění, druhý příklad se věnoval stanovení průběhu zpoždění v závislosti na počtu letadel. Díky několikanásobné simulaci pro různé operace a kategorie letadel byla stanovena hodinová kapacita dráhového systému. Tyto experimenty byly provedeny nezávisle na předchozí metodě DOE. U této metody hodnocení se tak nejvíce projevilo využití jednotlivých kategorií letadel. Ze všech pokusů by byla kapacita dráhy nejvyšší, pokud by byla určena pouze pro provoz malých letadel. Pokud se však bavíme o civilním letišti, které je cílovou destinací velkých dopravců a počet

odbavených cestujících přesahuje několik stovek tisíc, je tak z praktického hlediska nemožné uvažovat o takovém provozu. Důležitým ukazatelem ze všech možných variant experimentů je hodnota kapacity při využití smíšeného provozu s využitím všech kategorií letadel. Veškeré výsledky jsou pouze teoretickou hodnotou kapacity. Pro hodnocení praktické kapacity by bylo potřeba znát všechny postupy při přistání a odletu, včetně procentuálního zastoupení těchto operací, mix index letadel, povětrnostní a hlukové podmínky v okolí letiště, technické a navigační vybavení a výkonnost ATC.

Kvůli náročnosti a potřeby zjednodušení byly veškeré experimenty prováděny pro systém jedné dráhy. Visual Simmod je však velice dobrým nástrojem pro tvorbu neomezeného množství modelů a pomocníkem pro plánování provozu na letišti nebo v jeho vzdušném prostoru. Dalšími oblastmi hodnocení kapacity by mohly být pojezdové dráhy, odbavovací plochy nebo nástupní systémy. Tato práce je přínosem pro vysvětlení a znázornění metod hodnocení kapacit letištních subsystémů. Metoda DOE přispěla k lepší práci při navrhování experimentů a bylo tak předvedeno její zavedení do praxe. Práce dále ukazuje, jak se mění kapacita a zpoždění s různými konfiguracemi vstupů a přibližuje tak teoretické poznatky z úvodních kapitol. Optimalizace využití dráhového systému nebo testování nových letových postupů by mohly být další součástí této problematiky. Během návrhu experimentů je taktéž důležitý vhodný výběr simulačního prostředí, jenž je základem pro správné posouzení vlivů a dosažení výsledků. Celkový proces simulace je vlastně zkoušením různých nových věcí, bez velkých finančních nároků a s přínosem užitečných dat do praxe.

Seznam použité literatury

Tištěné zdroje:

- [1] Ministerstvo dopravy ČR, Úřad pro civilní letectví, Letecký předpis L14: Letiště Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2009
- [2] KERNER, L., KULČÁK, L., SÝKORA, V.: Provozní aspekty letišť, Vydavatelství ČVUT, vydáno v Praze 2003, ISBN 80-01-02841-0
- [3] VESELÝ, P.: Kapacita nástupního gatu v závislosti na stání odbavovací plochy. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, 2007. 76 s. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Kerner
- [4] DE NEUFVILLE, R., ODONI, A.: Airport systems - planning, design and management. New York: McGraw – Hill, 2003. 883 p. ISBN 0-07-138477-4
- [5] ŽIHLA, Z. a kol.: Provozování podniků letecké dopravy a letišť, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2010. 301 s. ISBN 978-80-7204-677-5
- [6] ASHFORD, N., MUMAYIZ, S., WRIGHT, P.: Airport Engineering: Planning, Design and Development of 21st Century Airports 4th Edition, New York: John Wiley & Sons, 2011. 768 p. ISBN 978-0-470-39855-5
- [7] TOŠENOVSKÝ, Josef a Darja NOSKIEVIČOVÁ. Statistické metody pro zlepšování jakosti. Ostrava: Montanex, 2000, 362 s. ISBN 80-7225-040-x
- [8] KUJAL, Tomáš. Zvyšování propustnosti na rozhraní letiště - vzdušný prostor. Brno, 2004. 94 s. Doktorská disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing.Bohuslav Sedláček, CSc.

Elektronické zdroje:

- [9] Zařízení pro kontrolu zavazadel. *Airports International* [online]. [©2012]. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: <http://www.airportsinternational.com/>
- [10] Ščurek, R.: Studie analýzy rizika protiprávních činů na letišti. Skriptum, VŠB-TU Ostrava: Ostrava 2009, 115 str.[online].[cit. 2013-02-19]
Dostupné z: http://www.fbi.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fbi/040/cs/sys/resource/PDF/analyzy_rizika_letisti.pdf

- [11] Teorie front. ŽIŽKA, M. *Technická Univerzita v Liberci* [online]. 20. 3. 2007. [cit. 2013-02-25]. Dostupné z: http://ilex.kin.tul.cz/~miroslav.zizka/multiedu/Teorie_front_1.pdf
- [12] Teorie hromadné obsluhy. DORDA, M. *Technická Univerzita Ostrava* [online]. [2012]. [cit. 2013-02-25]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dor028/Hromadna_obsluha.pdf
- [13] Teorie hromadné obsluhy. *National Transportation Library* [online]. [© 2011]. [cit. 2013-02-25]. Dostupné z: http://ntl.bts.gov/DOCS/11877/Chapter_8.html
- [14] Airport landside. *Advanced Airport and Airspace Capacity Seminar* [online]. 13. 6. 2002. [cit. 2013-02-27]. Dostupné z: http://128.173.204.63/courses/cee4674/cee4674_pub/airport_landside1.pdf
- [15] Souhrn leteckých nehod 1959 - 2011. *Boeing* [online]. [© 2012]. [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.boeing.com/news/techissues/pdf/statsum.pdf>
- [16] Bezpečnost v okolí letiště. *European Transport Safety Council (ETSC)* [online]. [1999] [cit. 2013-03-10]. Dostupné z: <http://www.etsc.eu/documents/safety%20in%20airports.pdf>
- [17] Visual Simmod. *AirportTools* [online]. [2001]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.airporttools.com/apt/html/vs.php>
- [18] Design of Experiments. *PQM Ostrava* [online]. [2013]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z: http://www.pqm.cz/nvcss/met_PDF/DOE_webcss.pdf
- [19] Airport Development Reference Manual. *IATA* [online]. [© 2013]. [cit. 2013-02-26]. Dostupné z: <http://www.iata.org/publications/Documents/toc-adrm-9-ed-2004.pdf>
- [20] Mapa letiště Brno - Tuřany. *AIP - Aeronautical Information Publication* [online]. [© 2013]. [cit. 2013-03-16]. Dostupné z: http://lis.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aip.htm
- [21] Předpis L-4444. *Postupy pro letecké navigační služby* [online]. 29. 8. 2011. [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-4444/index.htm>
- [22] Airport Capacity. GILBO, Eugene P. *National Transportation Library* [online]. [1993] [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://ntl.bts.gov/lib/35000/35000/35066/gilbo_1993_IEEE_airport.pdf
- [23] Žádost o slot. *Slot Coordination Czech Republic* [online]. [2005]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: http://www.slot-czech.cz/en/site/useful-informations/gcr_message_manual.pdf

Seznam použitých zkratek

A/C	Aircraft	Letadlo
ACRO	Aircraft Crashes Record Office	Úřad pro zaznamenávání leteckých nehod
ATC	Air Traffic Control	Řízení letového provozu
ATM	Air Traffic Management	Systém řízení letového provozu
CAD	Computer Aided Design	Počítačem podporované navrhování
DOE	Design of Experiments	Plánování experimentů
EASA	European Aviation Safety Agency	Evropská agentura pro bezpečnost letectví
EU	European Union	Evropská Unie
FAA	Federal Aviation Administration	Dozor nad civilním letectvím (USA)
IATA	International Air Transport Association	Mezinárodní sdružení leteckých dopravců
ICAO	International Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
IFR	Instrument Flight Rules	Let podle přístrojů
IMC	Instrument Meteorological Conditions	Povětrnostní podmínky pro lety IFR
LOS	Level of service	Úroveň služeb
MHD	-	Městská hromadná doprava
MI	Mix Index	Mix index
MTOW	Maximum Take-off Weight	Maximální vzletová hmotnost
NM	Nautical mile	Námořní míle
PAX	Passenger	Cestující
PT	Positionning time	Čas na připravení letadla
RWY	Runway	Vzletová (přistávací) dráha
SHO	-	Systém hromadné obsluhy
SID	Standard instrument departure	Standardní odletové tratě
SIMMOD	Simulation Model	Simulační model
SOT	Schedule occupancy time	Čas pro využití stojánky
TAAM	Total Airspace and Airport Modeler	Simulační model pro letiště
TMA	Terminal Manouvering Area	Koncová řízená oblast
TWY	Taxiway	Pojezdová dráha
VFR	Visual Flight Rules	Let podle viditelnosti
VMC	Visual Meteorological Conditions	Povětrnostní podmínky pro lety VFR
VPD	-	Vzletová a přistávací dráha

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Příklady žádostí o slot v České republice

Příloha č. 2 – Výpis dat ze Simmod Reporter (ukázka)

Příloha č. 3 – Příklad zadávání operací do Visual Simmod

Příloha č. 4 – Tabulka náhodných rozdělení operací při hodnocení faktorů

Příloha č. 1 – Příklady žádostí o slot v České republice [23]

1. GCR standard format

The GCR standard request consists of 3 main components.

GCR	}	1. Message Header
/FLT		
LKPR		
N TVS064J 20MAY 000C680 0730LKT B D / RE.OKUGJ/	}	2. Flight detail line(s)
NTVS065J 22MAY 000C680 LKT B1100 D / RE.OKUGJ/		
SI IF NOT AVBL PLS CFM NEXT LATER POSS	}	3. Footnote(s)
GI BRGDS		

1.1. Header

GCR Type of request: GCR - General aviation Clearance Request
/FLT Message type for operation using flight designator plus flight number or the aircraft registration

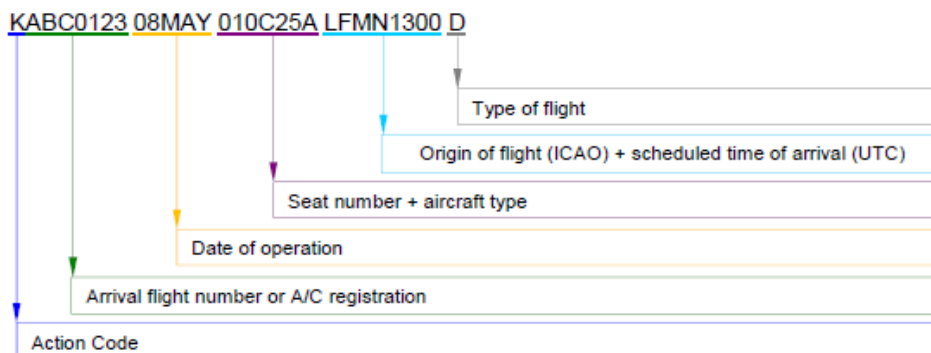
! FLT = Slot request using flight number **!**
REG = Slot request using aircraft registration

LKPR Airport at which slots are being requested: ICAO code

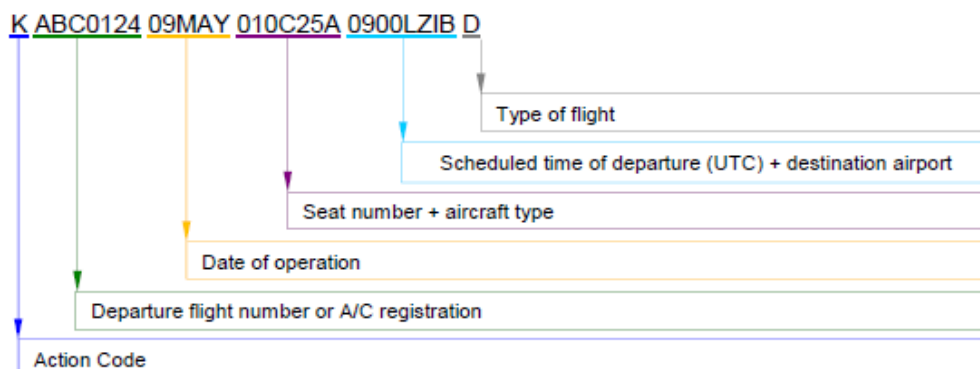
Example:

GCR	GCR
/FLT	/REG
LKPR	LKPR
NOPJ0900 17MAY 003C25B LATI1500 D	NOKDAY 05MAY 010C208 LZKZ0200 D
N OPJ0900 17MAY 003C25B 1545LK KU D	N OKDAY 05MAY 010C208 0230LZKZ D

Arrival slot Format



Departure slot Format



GCR Examples

Airport Slot Request

Example N1: Slot request for a departure flight using a registration (Action code "N")
Airport being coordinated : LKPR
Type of Aircraft : Piper 42 Cheyenne III, Registration OKPIP
Flight details : Departure: LKPR 1200utc / 10MAY
Arrival: LFMN 1400utc / 10MAY

GCR
/REG
LKPR
N OKPIP 10MAY 006PAY3 1200LFMN D
GI BRGDS

Example N2: Slot request for an arrival using a flight number or a call sign (Action code "N")
Airport being coordinated: LKPR
Type of Aircraft : Gulfstream G-159 Flight number: ABC888
Flight detail: Departure: LOWI 1600utc / 10MAY
Arrival: LKPR 1700utc / 10MAY

GCR
/FLT
LKPR
NABC888 10MAY 009G159 LOWI1700 D
GI BRGDS

Example N3: Slot request for an arrival and departure with differing flight numbers or call signs (Action code "N")
Airport being coordinated: LKPR
Type of Aircraft: Gulfstream G-159, Registration N125GA
Flight details: Flight number: ABC123
Departure: LZIB 1000utc / 10MAY
Arrival: LKPR 1100utc / 10MAY
Flight number: ABC456
Departure: LKPR 1200utc / 10MAY
Arrival: EDDM 1250utc / 10MAY

GCR
/FLT
LKPR
NABC123 10MAY 009G159 LZIB1100 D / RE.N125GA/
N ABC456 10MAY 009G159 1200EDDM D / RE.N125GA/
GI BRGDS

Příloha č. 2 – Výpis dat ze Simmod Reporter

SIMMOD Number	Injection time	Ejection time	Origin	Destination	Op Type	Airspace Grp.	Airfield Grp.	Model	A/C Number	Flt Num	Airline	Gate	Dep. Queue	Runway	Route
1	7,34	8,11	BRQ	VKO	DEP	HVY	2	747200		2 12_DBRQ	UTA	GATE	DPQ_10C	10C	HLV_2C
2	7,37	8,21	BRQ	LTN	DEP	HVY	2	747200		2 165_DBRQ	RJR	GATE	DPQ_10C	10C	TUMKA_DEP
3	7,41	8,18	BRQ	BGY	DEP	HVY	2	747200		2 65_DBRQ	RJR	GATE	DPQ_10C	10C	MIKOV_2D
4	7,44	8,28	BRQ	EIN	DEP	HVY	2	747200		2 78_DBRQ	WZZ	GATE	DPQ_10C	10C	TUMKA_DEP
5	7,48	8,25	BRQ	HRG	DEP	HVY	2	747200		2 11_DBRQ	CSA	GATE	DPQ_10C	10C	ODNEM_2C
6	7,51	8,29	BRQ	BGY	DEP	HVY	2	747200		2 123_DBRQ	CSA	GATE	DPQ_10C	10C	MIKOV_2D
7	7,54	8,32	BRQ	HRG	DEP	HVY	2	747200		2 532_DBRQ	TVS	GATE	DPQ_10C	10C	ODNEM_2C
8	7,58	8,43	BRQ	LTN	DEP	HVY	2	747200		2 1238_DBRQ	WZZ	GATE	DPQ_10C	10C	TUMKA_DEP
9	7,61	8,4	BRQ	VKO	DEP	HVY	2	747200		2 1211_DBRQ	UTA	GATE	DPQ_10C	10C	HLV_2C
10	7,65	8,43	BRQ	HRG	DEP	HVY	2	747200		2 789_DBRQ	WZZ	GATE	DPQ_10C	10C	ODNEM_2C
11	7,68	8,47	BRQ	VKO	DEP	HVY	2	747200		2 99_DBRQ	UTA	GATE	DPQ_10C	10C	HLV_2C
12	7,71	8,57	BRQ	STN	DEP	HVY	2	747200		2 1100_DBRQ	RJR	GATE	DPQ_10C	10C	TUMKA_DEP
13	7,75	8,55	BRQ	BGY	DEP	HVY	2	747200		2 963_DBRQ	CSA	GATE	DPQ_10C	10C	MIKOV_2D
14	7,78	8,65	BRQ	LTN	DEP	HVY	2	747200		2 365_DBRQ	RJR	GATE	DPQ_10C	10C	TUMKA_DEP
15	7,82	8,61	BRQ	HRG	DEP	HVY	2	747200		2 55_DBRQ	TVS	GATE	DPQ_10C	10C	ODNEM_2C
16	7,85	8,66	BRQ	BGY	DEP	HVY	2	747200		2 30_DBRQ	TVS	GATE	DPQ_10C	10C	MIKOV_2D
17	7,88	8,69	BRQ	BGY	DEP	HVY	2	747200		2 84_DBRQ	CSA	GATE	DPQ_10C	10C	MIKOV_2D
18	7,92	8,73	BRQ	VKO	DEP	HVY	2	747200		2 164_DBRQ	UTA	GATE	DPQ_10C	10C	HLV_2C
19	7,95	8,83	BRQ	EIN	DEP	HVY	2	747200		2 87_DBRQ	WZZ	GATE	DPQ_10C	10C	TUMKA_DEP
20	7,99	8,87	BRQ	LTN	DEP	HVY	2	747200		2 45_DBRQ	RJR	GATE	DPQ_10C	10C	TUMKA_DEP
21	8,02	8,83	BRQ	HRG	DEP	HVY	2	747200		2 459_DBRQ	TVS	GATE	DPQ_10C	10C	ODNEM_2C
22	8,05	8,88	BRQ	VKO	DEP	HVY	2	747200		2 783_DBRQ	UTA	GATE	DPQ_10C	10C	HLV_2C
23	8,09	8,91	BRQ	BGY	DEP	HVY	2	747200		2 111_DBRQ	WZZ	GATE	DPQ_10C	10C	MIKOV_2D
24	8,12	8,95	BRQ	BGY	DEP	HVY	2	747200		2 223_DBRQ	CSA	GATE	DPQ_10C	10C	MIKOV_2D
25	8,16	9,05	BRQ	STN	DEP	HVY	2	747200		2 741_DBRQ	RJR	GATE	DPQ_10C	10C	TUMKA_DEP
26	8,19	9,08	BRQ	EIN	DEP	HVY	2	747200		2 747_DBRQ	TVS	GATE	DPQ_10C	10C	TUMKA_DEP
27	8,22	9,05	BRQ	HRG	DEP	HVY	2	747200		2 757_DBRQ	WZZ	GATE	DPQ_10C	10C	ODNEM_2C
28	8,26	9,1	BRQ	BGY	DEP	HVY	2	747200		2 756_DBRQ	CSA	GATE	DPQ_10C	10C	MIKOV_2D
29	8,29	9,19	BRQ	LTN	DEP	HVY	2	747200		2 820_DBRQ	RJR	GATE	DPQ_10C	10C	TUMKA_DEP
30	8,33	9,17	BRQ	VKO	DEP	HVY	2	747200		2 822_DBRQ	UTA	GATE	DPQ_10C	10C	HLV_2C

Takeoff duration	Landing duration	Gate use duration	Gate turnaround	Gate wait	Departure queue delay	Runway cross	Taxi in duration	Taxi out duration	Undelayed taxi in	Undelayed taxi out	Delayed taxi	Delayed taxi
27,63	0	2100	0	0	0	0	0	267,19	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	9,47	0	0	276,66	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	18,94	0	0	286,13	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	28,41	0	0	295,6	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	37,88	0	0	305,07	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	47,34	0	0	314,54	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	56,81	0	0	324	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	66,29	0	0	333,47	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	75,75	0	0	342,94	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	85,22	0	0	352,41	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	94,69	0	0	361,88	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	104,16	0	0	371,35	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	113,63	0	0	380,82	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	123,09	0	0	390,29	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	132,57	0	0	399,76	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	142,03	0	0	409,22	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	151,5	0	0	418,7	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	160,97	0	0	428,16	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	170,44	0	0	437,63	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	179,91	0	0	447,1	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	189,38	0	0	456,57	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	198,85	0	0	466,04	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	208,32	0	0	475,51	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	217,78	0	0	484,97	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	227,26	0	0	494,45	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	236,72	0	0	503,92	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	246,19	0	0	513,38	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	255,66	0	0	522,85	0	239,56	0	0
27,63	0	2100	0	0	265,13	0	0	532,32	0	239,57	0	0
27,63	0	2100	0	0	274,6	0	0	541,79	0	239,56	0	0

Total airborne time	Undelayed airborne	Airborne hold delay	Total airborne delay	Gate arrival time	Gate departure	Queue arrival	Queue departure	Runway arrival time	Runway departure	Airspace arrival	Airspace departure
389,96	389,96	0	0	7,34	7,94	7,98	7,98	7,99	8	8	8,11
617,63	617,63	0	0	7,37	7,97	8,01	8,01	8,03	8,03	8,03	8,21
397,92	397,92	0	0	7,41	8,01	8,05	8,05	8,06	8,07	8,07	8,18
617,63	617,63	0	0	7,44	8,04	8,08	8,09	8,1	8,11	8,11	8,28
367,38	367,38	0	0	7,48	8,07	8,11	8,12	8,14	8,14	8,14	8,25
397,92	397,92	0	0	7,51	8,11	8,15	8,16	8,17	8,18	8,18	8,29
367,38	367,38	0	0	7,54	8,14	8,18	8,2	8,21	8,22	8,22	8,32
617,63	617,63	0	0	7,58	8,18	8,22	8,23	8,25	8,25	8,25	8,43
389,96	389,96	0	0	7,61	8,21	8,25	8,27	8,28	8,29	8,29	8,4
367,38	367,38	0	0	7,65	8,24	8,28	8,31	8,32	8,33	8,33	8,43
389,96	389,96	0	0	7,68	8,28	8,32	8,34	8,36	8,36	8,36	8,47
617,63	617,63	0	0	7,71	8,31	8,35	8,38	8,39	8,4	8,4	8,57
397,92	397,92	0	0	7,75	8,35	8,39	8,42	8,43	8,44	8,44	8,55
617,63	617,63	0	0	7,78	8,38	8,42	8,45	8,47	8,47	8,47	8,65
367,38	367,38	0	0	7,82	8,41	8,45	8,49	8,5	8,51	8,51	8,61
397,92	397,92	0	0	7,85	8,45	8,49	8,53	8,54	8,55	8,55	8,66
397,92	397,92	0	0	7,88	8,48	8,52	8,56	8,58	8,58	8,58	8,69
389,95	389,95	0	0	7,92	8,52	8,56	8,6	8,61	8,62	8,62	8,73
617,63	617,63	0	0	7,95	8,55	8,59	8,64	8,65	8,66	8,66	8,83
617,63	617,63	0	0	7,99	8,58	8,62	8,67	8,69	8,69	8,69	8,87
367,39	367,39	0	0	8,02	8,62	8,66	8,71	8,72	8,73	8,73	8,83
389,96	389,96	0	0	8,05	8,65	8,69	8,75	8,76	8,77	8,77	8,88
397,92	397,92	0	0	8,09	8,69	8,73	8,78	8,8	8,8	8,8	8,91
397,92	397,92	0	0	8,12	8,72	8,76	8,82	8,83	8,84	8,84	8,95
617,63	617,63	0	0	8,16	8,75	8,79	8,86	8,87	8,88	8,88	9,05
617,63	617,63	0	0	8,19	8,79	8,83	8,89	8,91	8,91	8,91	9,08
367,39	367,39	0	0	8,22	8,82	8,86	8,93	8,94	8,95	8,95	9,05
397,92	397,92	0	0	8,26	8,86	8,9	8,97	8,98	8,99	8,99	9,1
617,63	617,63	0	0	8,29	8,89	8,93	9	9,02	9,02	9,02	9,19
389,96	389,96	0	0	8,33	8,92	8,96	9,04	9,05	9,06	9,06	9,17

Příloha č. 3 - Příklad zadávání operací do Visual Simmod

[illegible]

Příloha č. 4 - Tabulka náhodných rozdělení operací při hodnocení faktorů

Rozdělení 1				Rozdělení 2			Rozdělení 3		
Číslo operace	Druh operace	A/C kategorie	SID	Druh operace	A/C kategorie	SID	Druh operace	A/C kategorie	SID
1	D	S	TUMKA_1C	A	S		A	S	
2	A	S		D	S	TUMKA_1C	A	L (H)	
3	A	L (H)		D	S	HLV_2C	A	L (H)	
4	D	S	HLV_2C	A	L (H)		D	S	TUMKA_1C
5	A	L (H)		D	L (H)	HLV_2C	D	S	HLV_2C
6	A	S		D	S	ODNEM_2C	A	L (H)	
7	A	S		D	S	TUMKA_1C	D	S	MIKOV_2D
8	D	L (H)	TUMKA_1C	D	L (H)	TUMKA_1C	A	L (H)	
9	A	S		A	L (H)		D	L (H)	ODNEM_2C
10	D	L (H)	ODNEM_2C	D	S	TUMKA_1C	A	L (H)	
11	A	L (H)		A	S		D	S	HLV_2C
12	D	S	MIKOV_2D	A	L (H)		D	L (H)	TUMKA_1C
13	D	L (H)	ODNEM_2C	D	L (H)	HLV_2C	D	L (H)	HLV_2C
14	A	S		D	L (H)	HLV_2C	A	L (H)	
15	D	L (H)	TUMKA_1C	D	L (H)	HLV_2C	D	S	TUMKA_1C
16	D	S	TUMKA_1C	A	L (H)		A	S	
17	D	S	HLV_2C	D	L (H)	MIKOV_2D	D	L (H)	ODNEM_2C
18	A	L (H)		D	L (H)	ODNEM_2C	A	L (H)	
19	A	L (H)		D	L (H)	HLV_2C	A	L (H)	
20	A	L (H)		A	L (H)		A	S	
21	A	L (H)		A	S		A	S	
22	A	S		A	S		D	S	MIKOV_2D
23	A	L (H)		D	L (H)	ODNEM_2C	D	S	HLV_2C
24	D	L (H)	MIKOV_2D	D	S	HLV_2C	D	L (H)	MIKOV_2D
25	A	S		D	L (H)	ODNEM_2C	D	L (H)	HLV_2C
26	D	L (H)	MIKOV_2D	A	L (H)		D	S	ODNEM_2C
27	D	L (H)	ODNEM_2C	A	S		D	L (H)	TUMKA_1C
28	D	S	ODNEM_2C	A	S		A	L (H)	
29	D	S	TUMKA_1C	D	L (H)	ODNEM_2C	D	S	HLV_2C
30	D	L (H)	HLV_2C	A	S		A	L (H)	
31	A	L (H)		D	L (H)	MIKOV_2D	D	S	TUMKA_1C
32	D	L (H)	HLV_2C	D	S	ODNEM_2C	A	L (H)	
33	A	L (H)		A	S		D	L (H)	TUMKA_1C
34	A	L (H)		D	L (H)	MIKOV_2D	D	S	MIKOV_2D
35	D	S	TUMKA_1C	A	L (H)		D	S	TUMKA_1C
36	D	L (H)	MIKOV_2D	A	L (H)		D	L (H)	MIKOV_2D
37	A	L (H)		A	L (H)		A	S	
38	D	L (H)	ODNEM_2C	A	S		D	S	HLV_2C
39	D	L (H)	MIKOV_2D	A	L (H)		A	L (H)	
40	D	L (H)	TUMKA_1C	D	S	TUMKA_1C	D	L (H)	MIKOV_2D
41	A	S		D	S	TUMKA_1C	A	S	
42	D	S	TUMKA_1C	D	S	ODNEM_2C	D	S	TUMKA_1C
43	A	S		D	L (H)	ODNEM_2C	D	L (H)	ODNEM_2C
44	A	S		A	S		A	S	
45	A	L (H)		A	S		A	S	
46	A	L (H)		A	S		A	S	
47	D	S	HLV_2C	D	S	TUMKA_1C	A	S	
48	D	S	ODNEM_2C	A	L (H)		D	L (H)	MIKOV_2D
49	A	L (H)		D	S	TUMKA_1C	D	L (H)	ODNEM_2C
50	A	S		D	S	ODNEM_2C	A	L (H)	

51	A	L (H)			A	S			A	S	
52	D	L (H)	MIKOV_2D		A	L (H)			A	S	
53	D	S	TUMKA_1C		D	S	HLV_2C		A	S	
54	D	S	HLV_2C		A	L (H)			A	S	
55	D	S	MIKOV_2D		D	L (H)	MIKOV_2D		D	L (H)	TUMKA_1C
56	D	S	MIKOV_2D		D	S	HLV_2C		D	L (H)	TUMKA_1C
57	A	S			D	L (H)	ODNEM_2C		D	L (H)	MIKOV_2D
58	D	S	TUMKA_1C		A	L (H)			A	L (H)	
59	A	L (H)			A	S			A	L (H)	
60	A	L (H)			A	S			D	S	TUMKA_1C
61	A	S			D	L (H)	ODNEM_2C		A	S	
62	A	S			A	S			D	S	HLV_2C
63	D	L (H)	TUMKA_1C		A	S			A	S	
64	D	L (H)	ODNEM_2C		A	L (H)			A	S	
65	D	L (H)	HLV_2C		A	L (H)			D	L (H)	ODNEM_2C
66	A	L (H)			A	S			D	S	ODNEM_2C
67	D	L (H)	HLV_2C		A	S			A	L (H)	
68	D	S	TUMKA_1C		D	L (H)	HLV_2C		A	L (H)	
69	D	S	MIKOV_2D		A	L (H)			A	L (H)	
70	D	L (H)	ODNEM_2C		A	S			A	L (H)	
71	A	S			A	L (H)			A	S	
72	A	S			D	S	MIKOV_2D		A	S	
73	A	L (H)			A	L (H)			A	S	
74	A	S			D	S	TUMKA_1C		D	S	ODNEM_2C
75	D	L (H)	TUMKA_1C		A	L (H)			D	L (H)	ODNEM_2C
76	A	S			A	S			A	L (H)	
77	D	L (H)	HLV_2C		D	S	TUMKA_1C		A	S	
78	D	L (H)	ODNEM_2C		D	L (H)	MIKOV_2D		A	S	
79	A	S			D	L (H)	TUMKA_1C		D	S	HLV_2C
80	D	S	ODNEM_2C		A	L (H)			D	L (H)	TUMKA_1C
81	A	S			D	S	MIKOV_2D		D	S	MIKOV_2D
82	A	S			D	L (H)	HLV_2C		D	S	ODNEM_2C
83	D	S	HLV_2C		D	S	HLV_2C		A	S	
84	D	L (H)	TUMKA_1C		D	S	MIKOV_2D		A	S	
85	A	L (H)			D	L (H)	ODNEM_2C		A	L (H)	
86	D	S	MIKOV_2D		A	L (H)			A	S	
87	D	S	ODNEM_2C		A	S			A	L (H)	
88	D	S	HLV_2C		D	S	TUMKA_1C		D	L (H)	TUMKA_1C
89	D	L (H)	ODNEM_2C		A	S			D	S	TUMKA_1C
90	D	L (H)	TUMKA_1C		D	L (H)	MIKOV_2D		D	L (H)	MIKOV_2D
91	A	S			A	S			D	S	HLV_2C
92	A	L (H)			A	L (H)			D	L (H)	ODNEM_2C
93	A	S			D	L (H)	TUMKA_1C		D	S	TUMKA_1C
94	A	S			A	S			A	L (H)	
95	A	S			A	L (H)			A	S	
96	A	L (H)			D	L (H)	TUMKA_1C		D	L (H)	ODNEM_2C
97	D	S	TUMKA_1C		A	L (H)			D	L (H)	TUMKA_1C
98	A	L (H)			D	S	TUMKA_1C		D	L (H)	HLV_2C
99	D	S	HLV_2C		D	S	MIKOV_2D		D	L (H)	HLV_2C
100	A	L (H)			D	S	TUMKA_1C		A	L (H)	

Kde: A – Arrivals (přilety)

D – Departures (odlety)

S – Small (lehké)

L – Large (střední)

H – Heavy (těžké)