

VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA

MARIBOR

**UMETNA INTELIGENCA NA MEDNARODNEM
LETALIŠČU – OPTIMIZACIJA POTNIŠKIH
TOKOV ZA HITREJŠE VKRCAVANJE**

Kandidatka: Lucija Pavlin

Vrsta študija: študentka izrednega študija

Študijski program: Informatika

Mentor predavatelj: mag. Ervin Schaff

Mentor v podjetju: Gregor Skok, dipl. org. inf.

Lektor: Tanja Slapar, prof. slov. in nem.

Maribor, 2025

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisana Lucija Pavlin sem avtorica diplomskega dela z naslovom *Umetna inteligenca na mednarodnem letališču – optimizacija potniških tokov za hitrejšo vkrcavanje*, ki sem ga napisala pod mentorstvom mag. Ervina Schaffa.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo izključno rezultat mojega dela,
- sem poskrbela, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženi nalogi, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia Maribor,
- se zavedam, da je plagiatstvo – predstavljanje tujih del oz. misli, kot moje lastne kaznivo po Zakonu o avtorski in sorodnih pravicah (Uradni list RS, št. 16/07 – uradno prečiščeno besedilo, 68/08, 110/13, 56/15 in 63/16 – ZKUASP); prekršek pa podleže tudi ukrepom Višje strokovne šole Academia Maribor skladno z njenimi pravili,
- skladno z 32.a členom ZASP dovoljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor objavo diplomskega dela na spletnem portalu šole.

Maribor, avgust 2025

Podpis študenta:

ZAHVALA

Največja zahvala gre mojemu zaročencu Jerneju – bil si moj *life admin* in *emotional tech support*. Hvala ti za potrpežljivost, spodbujanje, podporo in vse najine IT-pogovore.

Posebna zahvala gre podjetju Fraport Slovenija za priložnost, da lahko delujem v dinamičnem okolju, ki vsak dan prinese nove izzive. Letalstvo je panoga, ki vstopa v obdobje velikih tehnoloških sprememb, in veselim se, da bom ta razvoj lahko spremljala in ga, morda, nekoč soustvarjala.

Zahvaljujem se tudi podjetju Četrta pot za možnost opravljanja študijske prakse ter za priložnost učenja in pridobivanja izkušenj v zaradi izjemnega števila certifikatov visoko reguliranem in strokovnem okolju.

Prav tako se iskreno zahvaljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor za kakovosten in zahteven študijski program, ki mi je omogočil razvoj širokega nabora strokovnih in raziskovalnih kompetenc. Tema umetna inteligenca je bila kot generacijska tema na pravem mestu ob pravem času.

POVZETEK

Sodobna letališča se srečujejo z izzivi pri upravljanju potniških tokov in zagotavljanju učinkovitih procesov vkrcavanja, kar vpliva na zadovoljstvo potnikov, delovno obremenitev osebja in stroške. Zamude so pogosto posledica slabih informacij in težav z ročno prtljago – večja letališča za optimizacijo teh procesov uvajajo napredne tehnologije, kot so umetna inteligenca, računalniški vid in pametni navigacijski sistemi. Namen tega diplomskega dela je bil raziskati, kako umetna inteligenca izboljša potniške tokove in pospeši vkrcavanje, s poudarkom na potrebah manjših letališč. Metodološki cilj je bil tudi preučiti vlogo umetne inteligence pri podpori raziskovalnega projekta.

Raziskava je preverjala štiri ključne hipoteze, ki so bile vse potrjene. Kombinacija umetne inteligence in beaconov z navigacijo in s pametnimi obvestili izboljšuje pravočasnost potnikov pri vkrcanju. Umetna inteligenca in računalniški vid pred varnostno kontrolo učinkovito preprečujeta težave zaradi prevelike ročne prtljage, zmanjšujeta zamude in konflikte. Implementacija umetne inteligence za napovedovanje čakalnih vrst in razdalj na manjših letališčih zmanjšuje obremenitev zaposlenih, saj potnikom omogoča boljšo presojo o potrebi po asistenci. Končno, uporaba umetne inteligence prispeva k povečanju zmogljivosti letališča za obdelavo potnikov, k razbremenitvi osebja in točnejšemu vkrcanju, kar posledično poveča zadovoljstvo potnikov. Metodologija je vključevala kvantitativno in eksperimentalno-prototipno analizo z uporabo simuliranih podatkov iz sistemov AODB in DCS. Razvit je bil prototip simulatorja, ki vizualizira potniške tokove in preverja prtljago. Kvalitativni del je temeljil na opazovanju z udeležbo in dialogu z orodji umetne inteligence.

Umetna inteligenca na letališču transformira reaktivno odpravljanje težav v proaktivno, saj omogoča prediktivne vpoglede in avtomatizirane odločitve. Čeprav ustrezna integracija sistemov na manjših letališčih ostaja izziv, simulacijski prototip dokazuje, da je mogoče z omejenimi integracijami doseči merljive izboljšave. Raziskava prispeva k razumevanju digitalne preobrazbe v letalstvu in nudi usmeritve za implementacijo rešitev umetne inteligence za večjo učinkovitost in zadovoljstvo potnikov.

Ključne besede: *umetna inteligenca, letališče, optimizacija potniških tokov, hitrejše vkrcavanje, simulacija*

ABSTRACT

Artificial Intelligence at International Airport – optimization of passenger flows for faster boarding process

Modern airports face challenges in managing passenger flows and ensuring efficient boarding processes, which impacts passenger satisfaction, staff workload, and costs. Delays often result from poor information and issues with hand luggage. Larger airports are adopting advanced technologies like artificial intelligence, computer vision, and smart navigation systems to optimize these processes. The aim of this diploma thesis was to investigate how AI can improve passenger flows and accelerate boarding, with a focus on the needs of smaller airports. A methodological goal was also to examine the role of AI in supporting a research project.

The research tested four key hypotheses, all of which were confirmed. The combination of AI and beacons with navigation and smart notifications improves passenger punctuality during boarding. AI and computer vision before security control effectively prevent oversized hand luggage issues, reducing delays and conflicts. AI implementation for predicting queues and distances at smaller airports reduces employee workload, as it enables passengers to better assess their need for assistance. Finally, the use of AI contributes to increasing airport capacity for passenger processing, alleviating staff burden, and more punctual boarding, which consequently increases passenger satisfaction. The methodology included quantitative and experimental-prototypical analysis using simulated data from AODB and DCS systems. A prototype simulator was developed to visualize passenger flows and baggage checks. The qualitative part was based on observational participation and dialogue with AI tools.

AI thus transforms airports from reactive to proactive problem-solving, enabling predictive insights and automated decisions. Although proper system integration at smaller airports remains a challenge, the simulation prototype demonstrates that measurable improvements can be achieved with limited integrations. The research contributes to understanding the digital transformation in aviation and provides guidance for implementing AI solutions for greater efficiency and passenger satisfaction.

Keywords: *artificial intelligence, airport, passenger flow optimization, faster boarding, simulation*

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	9
1.1	OPIS PODROČJA IN OPREDELITEV PROBLEMA	9
1.2	NAMEN, CILJI IN OSNOVNE TRDITVE	9
	PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE	11
1.3	UPORABLJENE RAZISKOVALNE METODE	11
2	RAZISKAVA PODROČJA S PREGLEDOM LITERATURE	13
2.1	UMETNA INTELIGENCA TER NJENE APLIKACIJE IN INTEGRACIJE NA LETALIŠČIH	13
2.1.1	<i>Pregled priljubljenih tehnologij za optimizacijo potniških tokov s primeri uspešnih implementacij na evropskih letališčih</i>	<i>14</i>
2.1.2	<i>Informacijski sistemi za letalski sektor</i>	<i>18</i>
2.1.3	<i>Kompatibilnost in integracije</i>	<i>21</i>
2.1.4	<i>Prehod na ONE Order in vpliv na letališke informacijske sisteme</i>	<i>23</i>
2.1.5	<i>Problem usklajenosti – pregled tveganj in etičnih vidikov</i>	<i>24</i>
2.1.6	<i>Zamude v letalskem prometu</i>	<i>25</i>
2.2	REALNOČASOVNI PRIKAZ INFORMACIJ Z UMETNO INTELIGENCO	26
2.2.1	<i>Upravljanje potniških tokov – pregled operativnih in komercialnih zahtev</i>	<i>26</i>
2.3	PREVERJANJE USTREZNOSTI ROČNE PRTLJAGE S KOMBINACIJO UMETNE INTELIGENCE IN RAČUNALNIŠKEGA VIDA	32
2.3.1	<i>Upravljanje ročne prtljage – pregled operativnih in komercialnih zahtev</i>	<i>32</i>
3	RAZVOJ IZDELKA	40
3.1	ANALIZA PODATKOV	40
3.1.1	<i>Uporaba podatkov za simulacijo</i>	<i>40</i>
3.1.2	<i>Struktura in obseg podatkov</i>	<i>40</i>
3.1.3	<i>Obdelava in priprava podatkov</i>	<i>41</i>
	NAČRTOVANJE MODELA	41
3.1.4	<i>ERD-načrt podatkovne baze</i>	<i>42</i>
3.1.5	<i>Diagrami primerov uporabe</i>	<i>50</i>
3.1.6	<i>Diagram aktivnosti</i>	<i>53</i>
3.1.7	<i>Logika simulacije</i>	<i>54</i>
3.1.8	<i>Omejitve modela</i>	<i>57</i>
3.1.9	<i>Razširitve modela</i>	<i>57</i>
3.2	RAZVOJ PROTOTIPA SIMULATORJA	58
3.2.1	<i>Uporabljene tehnologije</i>	<i>58</i>
3.2.2	<i>Struktura prototipa</i>	<i>61</i>
3.2.3	<i>Logika delovanja simulatorja</i>	<i>62</i>

3.2.4	<i>Povezava s podatkovnim modelom</i>	65
3.3	TESTIRANJE	65
3.3.2	<i>Testiranje mejnih primerov.....</i>	72
3.3.3	<i>Odstranjene funkcionalnosti zaradi neuspešnega testiranja</i>	75
4	SKLEP	77
4.1	POVZETEK KLJUČNIH UGOTOVITEV.....	77
4.2	PRISPEVEK RAZISKAVE	79
4.3	PRIPOROČILA ZA NADALJNJE RAZISKAVE.....	79
5	VIRI IN LITERATURA	81
	PRILOGE.....	87

KAZALO SLIK

SLIKA 1: ZEMLJEVID LETALIŠČA Z DIJKSTROVIM ALGORITMOM	30
SLIKA 2: LUFTHANSA SYSTEMS CARRY-ON BAGGAGE DETECTION TOOL	33
SLIKA 3: DIAGRAM AKTIVNOSTI.....	39
SLIKA 4: ERD-NAČRT PODATKOVNE BAZE.....	43
SLIKA 5: DIAGRAM PRIMERA UPORABE 1	50
SLIKA 6: DIAGRAM PRIMERA UPORABE 2	51
SLIKA 7: DIAGRAM PRIMERA UPORABE 3	52
SLIKA 8: DIAGRAM PRIMERA UPORABE 4	53
SLIKA 9: DIAGRAM AKTIVNOSTI ZA SIMULATOR	54
SLIKA 10: DIAGRAM RAZVEJANJA ZA DODELJEVANJE PRAVICE DO PROSTORA ZA VEČJO ROČNO PRTLJAGO V KABINI LETALA.....	56
SLIKA 11: KONČNA ITERACIJA PROTOTIPA V CANVA AI	59
SLIKA 12: KONČNA VIZUALNA POSTAVITEV.....	60
SLIKA 13: PRIKAZ TESTNIH LETOV DD001, DD002 IN DD003.....	73
SLIKA 14: REZULTAT MEJNEGA TESTA 1 ZA LET DD001	73
SLIKA 15: DOSEŽENA KVOTA PRI MEJNEM TESTU 2 ZA LET DD002	74
SLIKA 16: SKENIRANJE ZADNJE ODOBRENE IN PRVE NEODOBRENE ROČNE PRTLJAGE NA TESTNEM LETU DD002 ..	74
SLIKA 17: ZAVRAČANJE NEUSTREZNE ROČNE PRTLJAGE NA TESTNEM LETU DD003	75

KAZALO TABEL

TABELA 1: ATRIBUTI ENTITETE AIRLINE	44
TABELA 2: ATRIBUTI ENTITETE AIRPORT	44
TABELA 3: ATRIBUTI ENTITETE AIRCRAFT	44
TABELA 4: ATRIBUTI ENTITETE ARRIVAL	45
TABELA 5: ATRIBUTI ENTITETE DEPARTURE.....	45
TABELA 6: ATRIBUTI ENTITETE PASSENGER.....	46
TABELA 7: RESNIČNOSTNA TABELA ZA POGOJ »HBAG OK«.....	55
TABELA 8: TESTIRANJE OBMOČJA <i>AIRPORT LAYOUT</i> Z DODANIM POJASNILOM OBNAŠANJA SISTEMA	68
TABELA 9: TESTIRANJE OBMOČJA <i>BAGGAGE SCANNER</i> Z DODANIM POJASNILOM OBNAŠANJA SISTEMA.....	69
TABELA 10: TESTIRANJE OBMOČJA <i>STATISTICS</i> Z DODANIM POJASNILOM OBNAŠANJA SISTEMA	71

1 UVOD

1.1 Opis področja in opredelitev problema

Letališča se vsakodnevno spopadajo z velikimi tokovi potnikov, ki se premikajo skozi različne faze potovanja, od prijave na let do vkrcanja v letalo. Učinkovitost teh procesov neposredno vpliva na zadovoljstvo potnikov, delovno obremenitev zaposlenih in operativne stroške letališča ter letalskih prevoznikov. Zamude pri vkrcavanju pogosto izhajajo iz slabe organizacije, nepreglednih obvestil za potnike ter težav pri upravljanju ročne prtljage, kar vodi v podaljšanje postopkov varnostne kontrole in čakalnih vrst.

V zadnjem desetletju so številna večja letališča začela uvajati napredne tehnologije, kot so umetna inteligenca, računalniški vid in pametni navigacijski sistemi, da bi optimizirala premikanje potnikov in zmanjšala zamude. Kljub temu je integracija takšnih rešitev na manjših letališčih še vedno v začetni fazi. Namen te raziskave je preučiti, kako lahko umetna inteligenca, tudi v kombinaciji s tehnologijami, kot so beacons in računalniški vid, izboljša pretočnost potnikov in optimizira proces vkrcavanja, s poudarkom na specifičnih potrebah manjših letališč.

1.2 Namen, cilji in osnovne trditve

Glavni namen tega diplomskega dela je raziskati, kako lahko uporaba umetne inteligence izboljša potniške tokove na letališčih ter pospeši proces vkrcavanja. Raziskava je osredotočena na analizo trenutnih izzivov pri upravljanju potnikov, pregled uveljavljenih tehnologij in razvoj simulatorja, ki bi omogočal večji nadzor nad količino ročne prtljage, ki jo potniki prinesejo do izhoda v letalo.

Ključni cilji raziskave so:

1. Identifikacija glavnih izzivov pri upravljanju potniških tokov na manjših letališčih.
2. Pregled in analiza uporabe umetne inteligence pri upravljanju letaliških operacij pri odpremi potnikov.
3. Razvoj in testiranje koncepta rešitve z umetno inteligenco (v obliki simulatorja), ki bi omogočala optimizacijo potniških tokov.

4. Preverjanje vpliva umetne inteligence na zmanjšanje zamud pri vkrcanju ter razbremenitev zaposlenih.

Tem ciljem se je pridružil še en, metodološki in metakognitivni: raziskati, v kolikšni meri lahko sodobna orodja umetne inteligence podprejo proces raziskovalnega projekta – umetna inteligenca je tako postala ne le orodje, temveč tudi partner v razmišljanju.

Osnovne trditve oziroma hipoteze tega diplomskega dela temeljijo na predpostavki, da lahko umetna inteligenca, v kombinaciji s pametnimi navigacijskimi sistemi, izboljša pravočasnost potnikov pri izhodu, zmanjša težave z ročno prtljago ter razbremeni zaposlene pri oskrbi potnikov. Preverjali smo naslednje hipoteze:

- H1: Uporaba kombinacije umetne inteligence in beaconov za optimizacijo potniških tokov s potnikom prijazno navigacijo ter smiselnimi in pametnimi vizualnimi in glasovnimi obvestili izboljša verjetnost, da bodo potniki za vkrcanje ob pravem času na pravem mestu in bo vkrcavanje lahko potekalo v skladu z metodo, ki je za določen let predvidena kot najbolj optimalna.
- H2: Uporaba kombinacije umetne inteligence in računalniškega vida pred varnostno kontrolo prepreči težave zaradi prevelike ročne prtljage ob vkrcavanju in zmanjša verjetnost, da bo treba presežek ročne prtljage zaradi omejitev kabine naknadno nalagati v prtljažnik. Ročna prtljaga je tudi varneje pregledana, osebje pri izhodu je deležno manj konfliktnih situacij, letalski prevozniki pa imajo zaradi bolj konsistentnega upoštevanja komercialnih pravil večji prihodek.
- H3: Implementacija umetne inteligence na majhnem letališču za napovedovanje čakalnih vrst pri prijavi na let, varnostni kontroli in (za neschengenske lete) mejni kontroli ter za napovedovanje predvidenega časa in razdalje med prijavo na let in izhodom v letalo zmanjša obremenitev zaposlenih v oskrbi potnikov (predvsem pri delu s starejšimi, ki želijo asistenco zaradi nerealnih pričakovanj o velikih razdaljah in dolgih čakalnih vrstah).
- H4 – dodatna hipoteza – BTEC 2024 »Umetna inteligenca«: Uporaba umetne inteligence za optimizacijo in upravljanje potniških tokov na letališčih prispeva k povečanju zmogljivosti letališča za obdelavo potnikov, k razbremenitvi osebja v oskrbi potnikov in bolj točnemu vkrcavanju, posledično pa tudi k večjemu zadovoljstvu potnikov.

1.3 Predpostavke in omejitve

Raziskava temelji na predpostavki, da lahko s kombinacijo umetne inteligence, simulacij in strukturirane analize podatkov dosežemo merljivo izboljšanje potniških tokov tudi na manjših letališčih, kjer fizične zmogljivosti in kadrovske rezerve pogosto predstavljajo omejitve. Pri oblikovanju prototipa in analizi rezultatov izhajamo iz simuliranih podatkov, ki so strukturirani po zgledu realnih operativnih baz letališča (AODB, DCS), vendar ne vključujejo občutljivih ali dejanskih osebnih podatkov.

Glavne omejitve izhajajo iz dejstva, da del raziskave temelji na prototipu, ki ni neposredno povezan z realnimi letališkimi informacijskimi sistemi, kar omejuje testiranje v produkcijskem okolju. Poleg tega je bila raziskava časovno in tehnično omejena na obseg, ki ga je bilo mogoče realizirati znotraj študijskega programa.

Kljub tem omejitvam raziskava ponuja uporabne uvide v to, kako lahko manjša letališča postopno uvajajo rešitve umetne inteligence, najprej v obliki simulacij in postopnih integracij, ter kako lahko z ustreznim razumevanjem informacijskih tokov in uporabniškega vedenja dosežejo konkretne izboljšave v pretočnosti in zadovoljstvu potnikov.

1.4 Uporabljene raziskovalne metode

V raziskavi je bila uporabljena kombinacija kvantitativne analize, eksperimentalno-prototipnega pristopa ter hibridne kvalitativne analize opazovanja z udeležbo in sodelovalno konceptualizacijo z uporabo generativne umetne inteligence.

Raziskava vključuje tesno prepleten kvantitativni in eksperimentalni pristop, saj je analiza podatkov potekala vzporedno z razvojem in s testiranjem funkcionalnega prototipa. Kvantitativni del raziskave temelji na strukturiranem naboru simuliranih podatkov, zasnovanih po vzoru dejanskih letaliških operativnih baz (AODB, DCS). Ti podatki so bili uporabljeni za modeliranje ključnih procesov, kot so preverjanje ustreznosti in omejitev kvot ročne prtljage ter razporeditev potnikov do izhodov v posameznih časovnih intervalih. Eksperimentalni prototip je služil kot orodje za preverjanje teh hipotez. Vključuje vizualizacijo potniškega toka skozi terminal, simulacijo statusov letov ter prikaz informacij na zaslonih.

Namesto klasične kvalitativne raziskave z intervjuji je kvalitativni del raziskave temeljil na dveh komplementarnih pristopih: opazovanju z udeležbo, kot smo ga spoznali med študijem antropologije, in reflektivnem dialogu z umetnimi inteligencami, ki so delovale kot kognitivni

sogovorniki oziroma nekakšni digitalni mentorji. V operativnem okolju letališča lahko vsakodnevno opazujemo in identificiramo dejanske težave, postopke, vzorce vedenja potnikov in reakcije zaposlenih – te izkušnje smo uporabili za oblikovanje hipotez, simulacijskih scenarijev in analiz. Opazovanje z udeležbo je tako nudilo razumevanje vsakdanjega konteksta, ki pogosto manjka v tehničnih analizah. Na drugi strani smo za teoretsko modeliranje, preverjanje konceptov in strukturiranje raziskovalnega pristopa uporabili generativna orodja umetne inteligence – Perplexity za seznanjanje z vsakodnevnimi novostmi na področju tehnologij v oskrbi potnikov, ChatGPT in Gemini za iskanje in raziskovanje virov ter dvojno preverjanje razumevanja konceptov.

2 RAZISKAVA PODROČJA S PREGLEDOM LITERATURE

2.1 *Umetna inteligenca ter njene aplikacije in integracije na letališčih*

Sodobna letališča predstavljajo izjemno kompleksna operativna okolja, ki se nenehno srečujejo z izzivi, kot so naraščajoče povpraševanje po letalskih potovanjih, nepredvidene motnje, pomanjkanje osebja in nenehno razvijajoče se varnostne zahteve. Tradicionalne metode načrtovanja in upravljanja pogosto ne morejo slediti tej ravni kompleksnosti in dinamike, obenem pa težko sledijo trajnostnemu razvoju letalske panoge, ki zahteva povečanje zmogljivosti letališča brez potrebe po dragi in okoljsko obremenjujoči fizični širitvi (Procter, 2025). V takšnem kontekstu se je umetna inteligenca izkazala kot transformativna tehnologija, ki letališčem omogoča temeljit prehod iz reaktivnega reševanja problemov v proaktivno optimizacijo in upravljanje (Durgut, 2023). Zmožnost umetne inteligence, da analizira ogromne količine realnočasovnih in preteklih podatkov, omogoča generiranje prediktivnih vpogledov in avtomatiziranih odločitev. To pomeni, da lahko letališča predvidijo in preprečijo težave, kot so zastoji ali pomanjkanje osebja, še preden postanejo kritične. Ta proaktivna sposobnost, ki jo prinaša umetna inteligenca, je ključna za izboljšanje splošne učinkovitosti in odpornosti.

Ena najpogostejših aplikacij umetne inteligence na letališčih je uporaba računalniškega vida za avtomatizacijo varnostnih pregledov. Napredni algoritmi strojnega učenja omogočajo prepoznavo prepovedanih predmetov v prtljagi ter izboljšujejo natančnost in hitrost varnostnih kontrol (Li & Wang, 2020). Poleg tega umetna inteligenca omogoča napredno analizo potniških tokov z uporabo video nadzora in senzorjev, kar pripomore k boljši distribuciji potnikov skozi terminale ter optimizaciji čakalnih vrst (Liao & Goh, 2021).

Poleg varnostnih pregledov umetna inteligenca igra pomembno vlogo tudi pri napovedovanju in usmerjanju potnikov. S kombinacijo podatkov iz letaliških operativnih baz in realnočasovne analize se lahko oblikujejo personalizirana obvestila o čakalnih vrstah, časih vkrcanja in optimalnih poteh skozi letališče (Wada & Ishioka, 2017). To omogoča boljšo razporeditev potnikov in zmanjšuje verjetnost zamud pri vkrcanju, kar je še posebej pomembno na velikih mednarodnih vozliščih.

Drugi pomemben vidik pri uporabi umetne inteligence je upravljanje prtljage. Z avtomatizirano analizo podatkov o prtljagi in s sledenjem prtljage v realnem času lahko letališča zmanjšajo število izgubljenih kovčkov ter izboljšajo izkušnjo potnikov (IATA, 2020). Prav tako lahko umetna inteligenca optimizira procese pri obdelavi ročne prtljage, saj računalniški vid omogoča

avtomatsko preverjanje velikosti in skladnosti prtljage s predpisi letalskih prevoznikov (Štancar, 2020).

Integracija umetne inteligence na letališčih se ne omejuje zgolj na operativne vidike, temveč vključuje tudi interakcijo s potniki. Pametni pomočniki, ki temeljijo na naravnem jeziku, omogočajo boljšo komunikacijo s potniki preko klepetalnih robotov in glasovnih asistentov. S tem se izboljša dostopnost informacij in zmanjša potreba po osebni pomoči zaposlenih (Carstens & Pattison, 2016).

Med naprednejšimi letališči pri uvajanju umetne inteligence so letališča, kot so London Heathrow (LHR), Amsterdam Schiphol (AMS) in Frankfurt (FRA), ki že uporabljajo napredne sisteme umetne inteligence za optimizacijo čakalnih vrst in navigacijo potnikov skozi terminale (IATA, 2021c). Te izkušnje so pomembne tudi za manjša letališča, kot je Ljubljana, saj omogočajo prilagajanje tehnologij njihovim specifičnim potrebam in omejitvam.

2.1.1 Pregled priljubljenih tehnologij za optimizacijo potniških tokov s primeri uspešnih implementacij na evropskih letališčih

Optimizacija potniških tokov je eden izmed ključnih izzivov sodobnih letališč, saj vpliva na zadovoljstvo potnikov, operativno učinkovitost in varnostne standarde. S tehnološkim napredkom so se razvile različne rešitve, ki pomagajo pri upravljanju množic, zmanjševanju čakalnih vrst ter izboljšanju splošne pretočnosti letaliških procesov. Primeri so evropski zaradi podobnih pravnih okvirjev.

2.1.1.1 Pametna avtomatizacija in podatkovna analitika

Ta skupina priljubljenih tehnologij za optimizacijo potniških tokov vključuje umetno inteligenco in analitiko podatkov. Ti dve omogočata boljše upravljanje potniških tokov, optimizacijo razporejanja virov in predvidevanje zastojev. Letališča uporabljajo napredne algoritme za spremljanje potniških gibanj, prilagajanje varnostnih kontrol ter izboljšanje procesov vkrcavanja. Internet stvari (IoT) in senzorji dopolnjujejo analitiko s podatki iz pametnih naprav, ki zaznavajo gostoto množic in promet. Vse te tehnologije pomagajo zmanjšati čakalne vrste, optimizirati delovanje terminalov in izboljšati celotno potniško izkušnjo, pri čemer zmanjšujejo operativne stroške letališč.

Na letališču Stockholm Arlanda (ARN) so implementirali sistem umetne inteligence, ki s kamerami in senzorji spremlja število potnikov in predviden čas čakanja na kontrolnih točkah. Potniki lahko v realnem času prek mobilne aplikacije in informacijskih zaslonov preverijo, kje so najkrajše vrste, kar je skrajšalo čakalne dobe za 20 odstotkov (Swedavia, 2023). Frankfurt (FRA) je uvedel pametne terminale, ki zbirajo podatke iz različnih virov, vključno z informacijami o letih, obremenjenosti varnostnih točk in gibanju množic, ter potnikom ponujajo personalizirane poti skozi letališče, kar je izboljšalo pretok potnikov za 10 odstotkov (Fraport AG, 2023b). Oslo Gardermoen (OSL) uporablja umetno inteligenco za napovedovanje čakalnih vrst na različnih kontrolnih točkah, pri čemer sistem temelji na kombinaciji preteklih podatkov, trenutnega prometa in vremenskih razmer (Avinor, 2022). København (CPH) analizira podatke o gibanju potnikov in preteklih vzorcih zastojev, kar omogoča dinamično prilagajanje zmogljivosti ter prerazporeditev osebja v realnem času (Štancar, 2020). Amsterdam Schiphol (AMS) je razvil mobilno aplikacijo, ki uporablja umetno inteligenco za personalizirano navigacijo skozi letališče. Aplikacija obdeluje realnočasovne podatke o čakalnih vrstah, napovedih letov in potniških tokovih ter priporoča najbolj optimalno pot do izhoda ali letaliških storitev, kar je zmanjšalo zamude pri vkrcavanju za 15 odstotkov (Royal Schiphol Group, 2023).

Na letališču Dublin (DUB) so uvedli omrežje inteligentnih senzorjev, ki spremljajo gostoto množic in gibanje potnikov skozi terminale. Sistem zbira podatke in jih posreduje operativnemu centru, kjer umetna inteligenca analizira tok potnikov ter priporoča prilagoditve pri odpiranju dodatnih kontrolnih točk ali preusmerjanju potnikov na manj obremenjene poti, kar je skrajšalo čakalne dobe pri varnostnih pregledih za 25 odstotkov (Dublin Airport Authority, 2023). Na letališču Berlin Brandenburg (BER) so implementirali inteligentni sistem obveščanja potnikov, ki analizira čakalne vrste in napovedane zamude ter prilagaja obvestila o vkrcanju glede na dejanske razmere v terminalih. Sistem potnike obvešča prek mobilnih aplikacij in pametnih zaslonov, kar je zmanjšalo število zamujenih letov zaradi napačnih informacij za 20 odstotkov (FBB, 2023). Amsterdam Schiphol (AMS) uporablja pametne LED-zaslone in prilagojene osvetlitvene sisteme, ki potnike vizualno usmerjajo proti določenim kontrolnim točkam, varnostnim pregledom in izhodom. Sistem uporablja umetno inteligenco za analizo gostote množic in prilagaja osvetlitev ter prikazane informacije v realnem času, kar je izboljšalo pretočnost potnikov za 10 odstotkov (Royal Schiphol Group, 2022). London Heathrow (LHR) uporablja beacone, ki omogočajo usmerjanje potnikov prek mobilnih aplikacij in digitalnih prikazovalnikov. Sistem v realnem času spremlja gibanje potnikov in jih vodi skozi letališke

postopke, kar zmanjšuje izgubljeni čas in povečuje točnost vkrcanja (Wada & Ishioka, 2017). Pariz Orly (ORY) je uvedel sistem pametne osvetlitve, ki potnike vodi skozi terminal s prilagodljivimi svetlobnimi signali. Sistem uporablja senzorske podatke in analizira gostoto množic ter potnikom dinamično prikazuje najbolj optimalno pot do izhoda, varnostne kontrole ali prijave na let, kar je zmanjšalo zastoje v terminalu za 15 odstotkov (Groupe ADP, 2023).

2.1.1.2 Digitalna identifikacija in povezljivost

Biometrične tehnologije in digitalna identifikacija pospešujejo varnostne preglede in mejne kontrole ter odpravljajo potrebo po fizičnih dokumentih. Sistemi za prepoznavo obrazov, prstnih odtisov ali skeniranje oči omogočajo hitrejše in varnejše vkrcavanje. 5G-povezljivost in digitalna infrastruktura pa omogočata visoko hitrost prenosa podatkov, brezhibno komunikacijo med letališkimi sistemi ter izboljšano uporabniško izkušnjo. Zanesljiva povezljivost omogoča tudi hitrejše obdelave podatkov, kar pripomore k večji pretočnosti potnikov in varnosti.

Letališče Milano Malpensa (MXP) je uvedlo biometrično preverjanje identitete potnikov na varnostnih kontrolah, kar omogoča hitrejši prehod brez potrebe po skeniranju dokumentov. Sistem prepozna obraz potnika in ga primerja s podatki, shranjenimi ob prijavi na let, kar zmanjšuje čakalne vrste in povečuje varnost. Povprečni čas varnostnega pregleda se je skrajšal za 35 odstotkov (SEA Milan Airports, 2023). Ženeva (GVA) je avtomatizirala mejno kontrolo z združitvijo biometričnih podatkov, strojnega učenja in tehnologije veriženja podatkovnih blokov. Potniki lahko predhodno naložijo svoje podatke v digitalno aplikacijo, kar omogoča brezpapirni in brezstični prehod skozi mejne kontrole ter skrajša povprečni čas prehoda za 35 odstotkov (Geneva Airport, 2023). Na letališču Bruselj (BRU) so uvedli biometrične kabine, ki omogočajo avtomatsko mejno kontrolo potnikov s prepoznavo obrazov, prstnih odtisov in preverjanjem potnega lista brez interakcije z mejno policijo. Povprečni čas prehoda skozi mejno kontrolo se je skrajšal za 40 odstotkov (Brussels Airport Company, 2023). Amsterdam Schiphol (AMS) je implementiral sistem Seamless Flow, ki temelji na prepoznavi obrazov in omogoča hitrejši prehod skozi varnostne kontrole ter vkrcanje brez potrebe po fizičnih dokumentih (Liao & Goh, 2021).

Poleg biometričnih tehnologij je ključna tudi napredna digitalna povezljivost. Madrid Barajas (MAD) je za optimizacijo operacij implementiral 5G-omrežje in Internet stvari (IoT). Sistem omogoča učinkovitejše upravljanje prtljage, avtomatizirano vodenje potnikov ter izboljšano

komunikacijo med zaposlenimi in letališkimi sistemi. 5G-omrežje povezuje več kot 5000 senzorjev in pametnih naprav, kar omogoča 15-odstotno hitrejšo obdelavo potnikov (Aena, 2023). München (MUC) je eno prvih evropskih letališč, ki je v celoti implementiralo 5G-omrežje, kar omogoča boljšo povezljivost za potnike, izboljšano navigacijo v realnem času in učinkovitejšo komunikacijo med letališkim osebjem. Potniki lahko prek mobilnih naprav pridobijo natančne informacije o čakalnih vrstah, optimalnih poteh skozi letališče ter obvestila o spremembah letov (Deutsche Telekom, 2023).

2.1.1.3 Avtomatizacija logistike in potniških storitev

Letališča vlagajo v avtomatizacijo prtljage in logistike, kjer pametni tekoči trakovi, RFID-oznake in robotski sistemi omogočajo učinkovitejše sledenje ter razvrščanje prtljage, kar zmanjšuje zamude in izgubljeno prtljago. Digitalni asistenti in personalizirane storitve, kot so klepetalni roboti UI, holografski informacijski terminali in personalizirane mobilne aplikacije, izboljšujejo interakcijo s potniki. S temi tehnologijami letališča nudijo hitrejša in bolj prilagojene informacije o letih, čakalnih vrstah in potovalnih poteh, kar zmanjšuje stres in izboljšuje splošno izkušnjo potnikov.

Frankfurt (FRA) je uvedel klepetalnega robota, ki potnikom omogoča hiter dostop do informacij o letih, postopkih in čakalnih dobah. Ta deluje prek letališke aplikacije in omogoča komunikacijo v več jezikih, kar je zmanjšalo obremenitev informacijskih točk in osebja za 30 odstotkov (Fraport AG, 2023a). Na letališču Helsinki Vantaa (HEL) testirajo avtonomne robotske asistente, ki pomagajo potnikom pri navigaciji skozi terminale. Roboti, opremljeni z umetno inteligenco, odgovarjajo na vprašanja potnikov, jih usmerjajo proti pravim izhodom in prikazujejo aktualne informacije o letih, kar je zmanjšalo napačne prihode do izhodov za 20 odstotkov (Finavia, 2023). London Heathrow (LHR) testira holografske informacijske terminale, ki delujejo kot virtualni pomočniki in interaktivno odgovarjajo na vprašanja potnikov o letih, terminalih in čakalnih dobah. Ta inovacija je zmanjšala potrebo po fizičnih informacijskih točkah za 30 odstotkov in izboljšala pretočnost skozi terminale (Heathrow Airport, 2023).

Na področju prtljage letališče København (CPH) uporablja računalniški vid in umetno inteligenco za preverjanje velikosti in teže ročne prtljage že pred vkrcanjem. Potniki lahko z mobilno aplikacijo posnamejo svojo prtljago, sistem pa jim takoj sporoči, ali ustreza omejitvam

letalskega prevoznika. To zmanjšuje zamude pri vkrcavanju in preprečuje dodatne stroške zaradi neustrezne prtljage (Copenhagen Airport, 2022).

2.1.2 Informacijski sistemi za letalski sektor

Na letališču je potnikovo gibanje skozi terminal od prihoda do vkrcanja podprto z vrsto informacijskih sistemov, ki si med seboj izmenjujejo podatke – nekateri so last letalskega prevoznika, drugi letališča, tretji preostalih ponudnikov (na primer SITA in Amadeus).

Sisteme, ki sodelujejo pri obdelavi potnikov na letališčih, lahko glede na njihovo funkcijo razdelimo v štiri glavne kategorije: sistemi za upravljanje operacij, sistemi za upravljanje potnikov, sistemi za prikaz informacij in obveščanje ter sistemi za varnost in prtljago.

2.1.2.1 Viri podatkov

Glavna vira podatkov sta AODB (*Airport Operational Database*) in DCS (*Departure Control System*), ki sta vsak na svojem področju odgovorna za zbiranje in upravljanje ključnih informacij, ki so bistvene za celotno delovanje letališča. Njunsko skupno delovanje zagotavlja, da so vsi deležniki opremljeni z najnovejšimi in s točnimi podatki.

AODB je hrbtenica letaliških operacij in osrednja podatkovna baza za vse z leti povezane operacije – informacije centralizira in jih distribuira. AODB zbira in shranjuje primarne podatke o načrtovanih in dejanskih časih prihodnih in odhodnih letov, registracijah in tipih letal itd. Deluje kot integracijsko vozlišče, saj podatke prejema iz zunanjih virov (na primer letalskih družb) in internih letaliških sistemov, kot so RMS (dodeljevanje virov), BHS (upravljanje prtljage) in DCS (obdelava potnikov). Obenem deluje kot podpora odločanju in optimizaciji – z zbiranjem in z okrepitvijo vseh operativnih podatkov omogoča analizo in poročanje, to pa letališču pomaga pri optimizaciji dodeljevanja virov, prepoznavanju ozkih grl, napovedovanju potreb in izboljšanju operativne učinkovitosti (Copenhagen Optimization, 2024).

DCS je glavni vir podatkov za vse, kar je povezano s potniki in prtljago. Zaposlenim v oskrbi potnikov omogoča upravljanje potnikov od prihoda do vkrcanja. DCS podatke o potnikih prejema iz rezervacijskih sistemov letalskih družb, omogoča prijavo na let (fizično pri okencu, preko kioska, spletno/mobilno), dodeljuje sedeže in izdaja vstopne kupone. Ob oddaji prtljage za vsak kos ustvari edinstveno številko in jo poveže s potnikom in z letom, nato pa te

informacije posreduje v BRS (usklajevanje in sledenje prtljage). Omogoča tudi nadzor nad vkrcavanjem – spremlja, kateri potniki so se že vkrcali v letalo in kateri še manjkajo, to pa omogoča učinkovito dokončanje postopka vkrcanja in pravočasen odhod letala. Zaposlenim v oskrbi letal omogoča kontrolo obremenitve letala – izračun in optimizacijo razporeditve teže potnikov in prtljage v letalu za varnost in učinkovitost (BagsID Network, 2022).

2.1.2.2 Standardi in protokoli

Mednarodna združenja, kot sta IATA (*International Air Transport Association*) in ACI (*Airports Council International*), igrajo pomembno vlogo pri razvoju standardov za aplikacijske programske vmesnike API, saj se le tako lahko olajša integracija med različnimi ponudniki programske opreme in letalskimi družbami. Taki API morajo obenem biti varni, saj se skozi njih pretakajo občutljivi podatki (uporabljajo se avtentikacija, avtorizacija in šifriranje podatkov), ter robustni in zmogljivi, ker morajo biti sposobni obvladati obsežen promet podatkov v realnem času.

1. **AIDX** (*Aviation Information Database Exchange*) je globalni standard sporočanja XML, ki se uporablja za izmenjavo podatkov o letih med letalskimi prevozniki, letališči in vsemi tretjimi deležniki, ki uporabljajo operativne podatke. Standard podpirata tudi IATA in ACI (IATA, n. d.).
2. **SITA-sporočila Type B** so teleks sporočila, prilagojena za uporabo v letalski panogi. Gre za standardiziran format sporočil, ki se uporabljajo za izmenjavo operativnih informacij med letalskimi družbami, letališči in drugimi deležniki v letalskem prometu. Čeprav je teleks tehnologija starejša, so SITA-sporočila Type B skozi leta ostala ključna za zagotavljanje zanesljive in učinkovite komunikacije v letalski panogi (SITA, 2024).
3. **BCBP** (*Bar Coded Boarding Pass*) je IATA tehnični standard za vstopne kupone – gre za standardiziran format 2D-črtne kode (običajno PDF417 ali QR-koda), ki vsebuje vse ključne podatke o potniku in letu (IATA, 2021a).

Sodobna letališča se razvijajo proti bolj odprtim in fleksibilnim arhitekturam, ki temeljijo na standardnih API (zlasti RESTful API z JSON/XML-formati), da bi olajšala integracijo in izmenjavo podatkov med vsemi elementi letališkega ekosistema.

2.1.2.3 Tok podatkov in medsebojno sodelovanje

1. **AODB ↔ RMS** (*Resource Management System*)

- AODB → RMS: AODB posreduje RMS vse informacije o letih (načrtovani čas, tip letala, število potnikov – ocenjeno iz rezervacijskih sistemov preko DCS).
- RMS → AODB: RMS na osnovi teh podatkov in razpoložljivosti optimizira in dodeli letališke vire (izhode za vkrcanje, okenca za prijavo, parkirne pozicije za letala, opremo, osebje), te informacije se nato shranijo nazaj v AODB.
- Glavni protokoli/formati: AIDX, XML/JSON preko RESTful API, SITA-sporočila Type B.

2. **AODB ↔ DCS**

- AODB → DCS: DCS iz AODB prejme informacije o dodeljenih okencih za prijavo na let in izhodih.
- DCS → AODB: Ko se potniki prijavijo, DCS beleži njihov status, številko sedeža in informacije o oddani prtljagi – ti posodobljeni podatki se pošljejo nazaj v AODB, kar omogoča letališču in drugim sistemom, da spremljajo status leta in število potnikov.
- Glavni protokoli/formati: XML/JSON preko RESTful API, SITA Type B, lastniški protokoli (nekateri DCS-sistemi, kot sta Amadeus Altea in SonicSabre, ki sta del večjih paketov rešitev, imajo lahko lastniške protokole za integracijo z AODB, ki so prav tako del paketa).

3. **AODB/DCS ↔ BRS** (*Baggage Reconciliation System*)

- DCS → BRS: BRS na osnovi podatkov iz DCS zagotavlja, da je vsak kos prtljage povezan s potnikom, ki se je vkrca v letalo; če se potnik ne vkrca, DCS javi BRS, da prtljaga ne sme biti naložena.
- BRS → DCS/AODB: BRS pošlje posodobljene informacije o statusu prtljage (naložena, zamujena itd.) nazaj v DCS in AODB.

4. **AODB ↔ FIDS** (*Flight Information Display System*)

- AODB → FIDS: FIDS iz AODB prejema realnočasovne informacije o statusu letov in jih prikazuje na zaslonih po celotnem letališču; to zagotavlja, da imajo potniki in osebje vedno najnovejše informacije (NSELED, 2024).
 - Glavni protokoli/formati: AIDX, XML/JSON preko RESTful API, SITA Type B, neposredna povezava z bazo AODB ali njen modul.
5. **A-CDM** (*Airport Collaborative Decision Making*) pravzaprav ni samostojen sistem v smislu shranjevanja primarnih podatkov, temveč je platforma za izmenjavo informacij in sodelovanje, ne samo med letališčem in letalskimi družbami, ampak tudi kontrolo zračnega prometa (ATC) in drugimi relevantnimi deležniki. A-CDM-platforma združuje podatke iz AODB, DCS in RMS in jih obdela v skupne operativne informacije (na primer *Estimated Off-Block Time* – EOBT, *Target Off-Block Time* – TOBT itd.). Te informacije so na voljo vsem partnerjem A-CDM, kar jim omogoča sprejemanje usklajenih odločitev in optimizacijo operacij (Eurocontrol, n. d.).
- A-CDM-informacije → AODB/RMS/DCS: posodobljene informacije, ki izhajajo iz sodelovanja z A-CDM (na primer spremembe v časovnih načrtih letov), se posredujejo nazaj v AODB in druge sisteme, da se posodobijo vsi relevantni podatki in prilagodijo operacije.

Vsi naštet sistemi so zasnovani za nenehno posodabljanje in izmenjavo podatkov v realnem času – vsaka sprememba v enem sistemu se takoj odrazi v AODB, nato pa se posreduje vsem relevantnim sistemom, ki te podatke potrebujejo. Sodelovanje med sistemi poteka preko standardiziranih vmesnikov (API) in protokolov, ki omogočajo gladko in varno izmenjavo podatkov. Podatki, ki tečejo skozi te sisteme, se tudi shranjujejo za analizo in poročanje (IATA, n. d.).

2.1.3 Kompatibilnost in integracije

Na večjih letališčih je stopnja integracije informacijskih sistemov bistveno višja kot na manjših regionalnih letališčih. Velika letališča uporabljajo celovite sisteme, kot je A-CDM, ki omogočajo realnočasovno izmenjavo podatkov med AODB, RMS, DCS, FIDS in BRS. Takšna arhitektura temelji na standardih, kot je AIDX, kar omogoča konsistentno in avtomatizirano

komunikacijo med vsemi ključnimi deležniki – letališčem, letalskimi prevozniki, zemeljskim osebjem in celo modeli umetne inteligence za napovedovanje vrst (IATA, 2020).

Nasprotno pa se manjša letališča zaradi ekonomije obsega in omejenih sredstev, manjše kompleksnosti operacij in omejene prisotnosti standardiziranih rešitev pogosto spopadajo z omejeno integracijo med sistemi (Airport Cooperative Research Program, 2015). Kompleksnost operacij je prilagojena:

- številu hkrati aktivnih izhodov (pogosto le 4–5),
- istočasnosti različnih prevoznikov – pogosto zadostuje uporaba CUTE (*Common Use Terminal Equipment*), ni potrebe po CUPPS (*Common Use Passenger Processing System*, novejši različici CUTE, ki temelji na IP in omogoča večjo fleksibilnost) in CUSS (*Common Use Self-Service*) na ravni kompleksnejših letališč,
- številu povezovalnih letov (če ti sploh so).

Praktična bližnjica v obliki telefonske komunikacije namesto systemskega opozorila je pogosto bolj priročna in hitrejša. Omejena prisotnost standardiziranih rešitev se kaže v tem, da veliko manjših letališč uporablja prilagojene rešitve ali cenejše verzije komercialnih sistemov, ki niso v celoti skladni s standardi AIDX, CUPPS in BCBP. Obenem pogosto ni enotnega vmesnika med sistemi – na primer AODB ni neposredno povezan z DCS-sistemi (vseh) prevoznikov, kar pomeni, da statusi potnikov ali informacije o vkrcavanju pogosto niso dostopne v realnem času. Problem so tudi nepopolne integracije z DCS-sistemi letalskih prevoznikov. Manjša letališča imajo lahko omejeno kontrolo nad tem, kateri DCS uporabljajo prevozniki, posledično pa ne letališče in ne sistem umetne inteligence zaradi neobstoječe CUPPS-infrastrukture ne moreta enostavno dostopati do podatkov o prijavljenih potnikih, saj enotna točka dostopa ne obstaja. Poleg tega so sistemi, kot so FIDS, RMS ali BRS, pogosto ločeni moduli z omejeno medsebojno komunikacijo, kar otežuje razvoj celostnih rešitev z umetno inteligenco. Eden ključnih razlogov za to je ekonomski – implementacija integriranih sistemov zahteva večje investicije in obsežno reorganizacijo delovnih procesov, kar na manjših letališčih pogosto ni upravičeno (SITA, 2023).

Kombinacija naštetih dejavnikov vodi do tega, da se na manjših letališčih pogosto uporabljajo delno avtomatizirane rešitve, kjer je veliko podatkov še vedno obdelanih ročno ali preko izoliranih sistemov. To posledično omejuje možnosti napredne analitike in prediktivnega upravljanja toka potnikov, kar bi sicer lahko občutno izboljšalo učinkovitost delovanja letališča

tudi pri manjšem številu potnikov in prispevalo k možnosti povečanja zmogljivosti oskrbe potnikov brez investicij v fizično širitev.

Zaradi navedenih razlik v integraciji sistemov med večjimi in manjšimi letališči bomo v nadaljevanju pri oblikovanju rešitev za optimizacijo potniških tokov upoštevali tehnološke omejitve, značilne za manjša letališča. Tam, kjer bo za delovanje predlagane rešitve ključna višja stopnja systemske povezanosti, bomo posebej izpostavili, katere integracije so nujne, ter analizirali, katere komponente v sedanji arhitekturi manjkajo, oziroma bi jih bilo treba nadgraditi za uspešno implementacijo. Tako bomo zagotovili, da so predlogi prilagojeni realnim možnostim uvajanja in hkrati usmerjeni k postopnemu izboljševanju poveztljivosti sistemov.

2.1.4 Prehod na ONE Order in vpliv na letališke informacijske sisteme

IATA v sodelovanju z največjimi letalskimi skupinami že postopoma uvaja standard ONE Order, ki naj bi do leta 2030 postal prevladujoč med prevozniki, ki ponujajo povezovalne lete. Skupine, kot so Lufthansa Group, Air France-KLM in Iberia/LEVEL že izvajajo pilotne projekte ali delne implementacije, ki združujejo NDS (*New Distribution Capability*) s strukturiranimi Order komponentami (IATA, 2021b). Prevozniki z lastnimi IT-rešitvami, kot sta Lufthansa Systems (n. d.) in Navitaire (2020), že testirajo delne migracije.

Pričakuje se, da bodo nizkocenovni prevozniki v prehod vstopili pozneje (če sploh), saj uporabljajo poenostavljene ali lastne sisteme in zaradi njihovega poslovnega modela niso motivirani za spremembo, saj je IT-migracija na ONE Order trenutno draga in dolgotrajna.

Standard ONE Order bistveno poenostavlja integracijo sistemov DCS, AODB in FIDS. Z enotnim objektom Order namreč nadomešča vse tradicionalno ločene identifikatorje – PNR (*Passenger Name Record*, ki vsebuje vse podatke o potniku, itinerariju, dodatnih storitvah in kontaktih), TKT (*ticket*, vozovnica za sedež v letalu) in EMD (*Electronic Miscellaneous Document*, dodatne storitve za vse, kar ni vozovnica). Order vsebuje vse ključne podatke o potniku in njegovih storitvah, to pa omogoča enoten, strukturiran in standardiziran vir podatkov, ki bistveno olajša dostop do podatkov prek enega vmesnika (na primer REST API ali XML) in standardizirano izmenjavo v skladu z IATA AIDM (*Airline Industry Data Model*). ONE Order prispeva tudi k učinkovitejšemu upravljanju sprememb ob nerednostih v prometu. Pri današnjih sistemih se ob prisilnih spremembah rezervacij (*involuntary rebooking*) na druge

prevoznike podatki pogosto izgubijo ali postanejo nedosledni, kar zahteva ročne popravke in povečuje možnost napak. Enotna Order struktura omogoča, da vse informacije o potniku in njegovih storitvah ostanejo povezane in dosledne tudi ob prenosu med sistemi različnih prevoznikov, s čimer se zmanjša potreba po ročnih posegih ter izboljša izkušnja potnika.

Za popolno uvedbo bo potrebna prilagoditev številnih DCS-sistemov, zlasti tistih zunaj ekosistema Amadeus, pa tudi posodobitev AODB-platform, ki trenutno še ne podpirajo nativnega dostopa do struktur Order. Integracijo bo v prihodnje olajšala vzpostavitev OMS (*Order Management System*) kot osrednjega vozlišča podatkov, kar bo letališčem omogočilo hitrejša, natančnejša in bolj zanesljiva obveščanja potnikov preko FIDS.

2.1.5 Problem usklajenosti – pregled tveganj in etičnih vidikov

Ena večjih nevarnosti pri uporabi umetne inteligence v kritičnih sistemih izhaja iz njene dovzetnosti za napačno usmerjene cilje (t. i. *alignment problem*). Harari pojasnjuje (2024), da ko umetna inteligenca prevzame naloge, ki neposredno vplivajo na vedenje ljudi in procese v realnem času, lahko že manjša napaka v definiciji cilja vodi do resnih posledic. Razloži, da je zmožnost računalniških sistemov zgodovinsko postala nevarna takrat, ko so ti začeli aktivno sodelovati pri oblikovanju odločitev, ki prej niso bile domena strojev. Pri razvoju programske opreme se je zato treba zavedati, da umetna inteligenca lahko vnaprej sicer dobro (namerno) določenemu cilju učinkovito sledi, vendar to počne na načine, ki jih ljudje pogosto ne pričakujemo ali razumemo. Če je cilj napačno definiran ali vsebuje nedoslednosti, umetna inteligenca tega morda ne bo prepoznala kot težavo. To lahko privede do rezultatov, ki so v nasprotju s človekovimi interesi, z varnostjo in celo zakonodajo.

V letališkem okolju bi se ta težava lahko pokazala na več načinov – na primer sistem za optimizacijo vkrcavanja lahko začne ignorirati potrebe potnikov s posebnimi potrebami ali vodi do diskriminatorne obravnave zaradi napačno uteženih vhodnih podatkov. Podobno lahko napačno zaznana prtljaga zaradi pristranskega učenja povzroči konflikte med vkrcavanjem in/ali zamude. Za razliko od ljudi umetna inteligenca nima zmožnosti samokritičnosti ali zaznave, da je nekaj morda “čudno” ali vredno preverjanja. Zato je pri snovanju rešitev, ki vključujejo umetno inteligenco za upravljanje potniških tokov, ključno:

- natančno določiti cilje algoritmov (primeri v naslednjih poglavjih),
- zagotoviti mehanizme za periodično preverjanje ciljev,

- vključiti nadzor človeka pri odločanju – najmanj v točkah, kjer bi napačne odločitve lahko vplivale na varnost ali pravice potnikov.

2.1.6 Zamude v letalskem prometu

Zamude v potniškem letalskem prometu lahko razvrstimo v naslednje kategorije: omejitve zmogljivosti v kontroli zračnega prometa, slabe vremenske razmere, tehnične težave, operativne težave zaradi zemeljske oskrbe (dolgi časi obračanja letala, zamude v oskrbi zaradi zadržanosti pri drugih letalih) ali posadke (pomanjkanje osebja, prekoračitev delovnega časa), pozen prihod zaradi veriženja predhodnih zamud letala ter zamude iz varnostnih ali potniških razlogov (Eurocontrol, 2024b).

Za potnike zamuda pomeni poznejši prihod na destinacijo, kar pogosto vključuje zamujen povezovalni let in stroške, povezane z ad hoc spreminjanjem potovalnih načrtov (AirHelp, 2023). Stroški za letalskega prevoznika se kažejo v neposrednih operativnih stroških (dodatno gorivo, nadure posadke, dodatni stroški zemeljske oskrbe, preusmeritve potnikov), odškodninah potnikom (skupaj z brezplačnimi spremembami vozovnic ter organizacijo nočitev, obrokov in prevoza; EU uredba 261/2004) v posrednih stroških in izgubah, saj so prihodki zmanjšani zaradi vračil in vavčerjev, ugled in zvestoba potnikov sta omajana, ter v pravnih in administrativnih stroških. Stroški za letališče se kažejo v zmanjšani učinkovitosti zmogljivosti (steze in terminali), povečanih stroških osebja in opreme (podaljšano delo za zemeljsko osebje, dodatne storitve v nenačrtovanih situacijah) ter posredno v ugledu in privlačnosti za potnike (Eurocontrol, 2024a). Po podatkih Eurocontrola (2025) je bilo v letu 2024 v Evropi 27,5 odstotka vseh letov zamujenih za več kot 15 minut, po predpostavkah pa se ocenjuje, da se skupni enotni strošek ene minute zamude giblje okrog 100 evrov (Eurocontrol Network Manager, n. d.).

Letališče na večino vzrokov zamud ne more vplivati, lahko pa k zmanjšanju zamud, ki ob vkrcavanju nastajajo kot verižna reakcija, prispeva s pametnejšim upravljanjem potniških tokov. Zato želimo v diplomskem delu raziskati možnosti, ki omogočajo, da:

- (poglavje 2.2.) potniki, ki želijo pomoč pri vkrcavanju/izkrcavanju, pravočasno ugotovijo, ali je za kratko pot po manjšem letališču pomoč dejansko potrebna,
- (poglavje 2.2.) so potniki ob pravem času na pravem mestu pripravljeni za vkrcanje,

- (poglavje 2.3.) presežek ročne prtljage ni treba nalagati v prtljažnik med vkrcavanjem ali po njem, temveč preden se obračanje letala sploh začne.

2.2 Realnočasovni prikaz informacij z umetno inteligenco

2.2.1 Upravljanje potniških tokov – pregled operativnih in komercialnih zahtev

Na sodobnih letališčih je pravočasna prisotnost potnikov na pravem mestu ključna za nemoten potek vkrcavanja in točnost letov. Zaradi kompleksnosti terminalov, raznolikosti postopkov (na primer varnostnih pregledov, mejne kontrole) ter različnih časovnih oken za posamezne prevoznike se potniki pogosto spopadajo z negotovostjo glede tega, kdaj morajo kje biti. Smiselna, jasno strukturirana in pravočasna obvestila – vizualna in glasovna – omogočajo boljšo orientacijo, zmanjšujejo stres in izboljšujejo pretočnost. Takšna obvestila so še posebej pomembna za manj izkušene potnike, starejše osebe ter tiste z omejenim razumevanjem jezika ali strukture letališča.

Ker ne moremo pričakovati, da bodo vsi potniki uporabljali aplikacijo letališča ali letalskega prevoznika, še posebej ob upoštevanju pogostosti potovanj, različnih starostnih skupin, tujih državljanov in tehnično manj veščih uporabnikov, imajo digitalni zasloni na letališču osrednjo vlogo pri zagotavljanju ključnih informacij. Zato se bomo v nadaljevanju osredotočili na strukturiran prikaz informacij na digitalnih zaslonih v fizičnem prostoru terminala, kjer lahko vsak potnik – ne glede na pogostost potovanja ali digitalne navade – pravočasno pridobi podatke, ki jih potrebuje za orientacijo in nemoten prihod do izhoda.

2.2.1.1 Informacijska arhitektura digitalnih zaslonov glede na uporabniški tok potnika

Učinkovita informacijska arhitektura na letališčih temelji na tem, da potnikom v vsakem trenutku potovanja posredujemo točne, pravočasne in smiselno umeščene informacije. Digitalni zasloni predstavljajo ključno orodje za usmerjanje potnikov, zmanjševanje negotovosti in optimizacijo tokov skozi terminal. Ker se informacijske potrebe potnika spreminjajo glede na njegovo lokacijo in fazo poti, mora biti zasnova prikaza vsebin na teh zaslonih natančno prilagojena uporabniškemu toku (AIScreen, 2023). V tem delu analiziramo, katere informacije so smiselne na posameznih točkah poti in kako jih je mogoče strukturirano prikazovati.

Pri uporabi digitalnih zaslonov za obveščanje potnikov in usmerjanje njihovega gibanja skozi letališki prostor se pojavljajo izzivi, ki jih prestavljamo v nadaljevanju.

Nepovezanost informacijskih sistemov, ročno posodabljanje statusov in alternativno obveščanje potnikov

Na številnih letališčih, zlasti manjših, informacijski zasloni niso neposredno povezani z AODB in DCS. To pomeni, da se številni podatki, kot so statusi letov, faze vkrcavanja ali spremembe izhodov, še vedno posodablja ročno, kar povečuje možnost napak, zamud in neustreznega obveščanja potnikov (UK Civil Aviation Authority, 2009). V idealno zasnovanem sistemu AODB zbira in usklajuje vse operativne podatke o letih, DCS posreduje informacije o prijavljenih potnikih in fazah vkrcavanja, FIDS pa v realnem času prikazuje te podatke na zaslonih. Samodejna povezljivost med temi sistemi zagotavlja, da potniki prejemajo točne, pravočasne in usklajene informacije, kar izboljša njihovo orientacijo in pretočnost v terminalu. V idealnem sistemu DCS tudi sproži status vkrcavanja in skupin, AODB uskladi časovne podatke, FIDS pa jih samodejno prikaže potnikom – to pomaga pri pretočnosti ob vkrcavanju, točnosti odhoda letala in manjši odvisnosti od osebja. Če je sistem integriran, lahko FIDS prek povezave z DCS in AODB samodejno zazna, kdaj se približuje zaključek vkrcavanja in je večina potnikov že vkrcana v letalo (NSELED, 2024). Tako sistem brez posredovanja osebja prikaže status Final call – na primer 10 minut pred zaprtjem izhoda in ob pogoju, da se je že vkrcala večina potnikov. Ta avtomatizacija omogoča dosledno, pravočasno in manj stresno obveščanje potnikov.

Neusklajenost prikaza informacij s kontekstom potnikove poti

Preden potnik prestopi varnostno kontrolno točko, potrebuje vse informacije, ki mu omogočajo orientacijo in pravočasno izvedbo vseh potrebnih postopkov, ki ga čakajo pred vstopom v letalo. Ključno je, da zasloni poleg statusa leta jasno prikazujejo tudi status, časovni okvir in lokacijo prijave na let (in oddaje prtljage), pomembne pa so tudi informacije o izhodu in morebitni mejni kontroli (za neschengenske lete). Po prehodu varnostnokontrolne točke se potnikovo informacijsko sidro premakne na točno lokacijo izhoda, čas hoje do tja, trenutni status leta (vkrcavanje, zamuda, zadnji poziv ...) in morebitne posebnosti, kot so skupine za vkrcavanje ali dodatna kontrola dokumentov. Prikaz mora biti prostorsko orientiran (kam naj gre) in časovno relevanten (kdaj mora biti tam) (Pickcel, 2021).

Pomanjkanje informacij o razdalji in dostopnosti izhoda

Potniki ob prijavi na let pogosto ne prejmejo nobenih informacij o tem, kako dolga in zahtevna bo pot do izhoda. Po evropski uredbi (ES št. 1107/2006) so letališča dolžna zagotoviti asistenco vsem potnikom z omejeno mobilnostjo, ki jo ob rezervaciji ali na dan potovanja izrazijo – ne glede na to, ali gre za potnike z invalidskim statusom, zdravniškim potrdilom ali zgolj s težavami pri hoji. To pomeni, da pomoč prejmejo tudi tisti, ki bi pot sicer zlahka opravili sami, a zaradi negotovosti raje zaprosijo za asistenco (ACI Europe, 2023). Posledično so sistemi za asistenco pogosto preobremenjeni, kar povzroča zamude, neracionalno rabo kadrov in povečuje tveganje za resnično gibalno ovirane osebe, ki tako lahko prejmejo pomoč prepozno ali v okrnjenem obsegu. Na manjših letališčih asistenco pogosto zagotavljajo zaposleni, ki sicer opravljajo druge naloge – na primer na okencih za prijavo na let ali pri ravnanju s prtljago – zato takšna obremenitev neposredno vpliva na potek osnovnih procesov. Pomoč mora namreč pogosto biti izvedena tudi takrat, ko fizična pomoč dejansko ni potrebna (na primer po ravni poti brez stopnic in z majhno razdaljo). Če bi se na zaslonu pri okencu za prijavo na let izpisale informacije o razdalji (metri in koraki) in predvidenem času hoje (minute), bi mnogi potniki lažje presodili, da asistence ne potrebujejo. Takšen prikaz bi razbremenil osebje, zmanjšal zamude in omogočil, da resnično pomoč prejmejo tisti, ki jo dejansko potrebujejo (Gresham Smith, 2025). O tem priča tudi ameriška raziskava iz leta 2017, izvedena na letališču Atlanta (ATL), ki je ugotovila 11–17-odstotno povečanje hoje, ko so bile na ključnih mestih nameščene »point-of-decision« table z jasno označenim časom hoje do izhoda (Fulton, in drugi, 2017).

Odsotnost informacij o fazah vkrcavanja

Še preden letalo pristane, potniki pogosto sprašujejo, kdaj se bodo vkrcali. Če zasloni nad izhodi ne prikazujejo časovnice (na primer letalo je na poti → letalo pristaja → poteka priprava letala → pripravijo naj se potniki, ki potrebujejo več časa ali pomoč (družine z majhnimi otroki, gibalno ovirani potniki) → skupina 1 → skupina ... → zadnji poziv → vkrcavanje zaključeno) (Haynes, 2022), se ustvarja nestrpnost pri potnikih in nepotreben pritisk na osebje, ki se mora pripraviti na vkrcavanje ali v zadnjem trenutku odpravlja kakšne težave. Vizualni prikaz vodi potnika skozi realna pričakovanja.

2.2.1.2 Zahteve ob implementaciji takšne rešitve

Za uspešno vzpostavitev tehnološke rešitve je ključno razumevanje arhitekture in medsebojnih povezav sistemov, ki omogočajo samodejno, natančno in pravočasno prikazovanje informacij potnikom. V nadaljevanju so izpostavljeni ključni izzivi in možne tehnične rešitve.

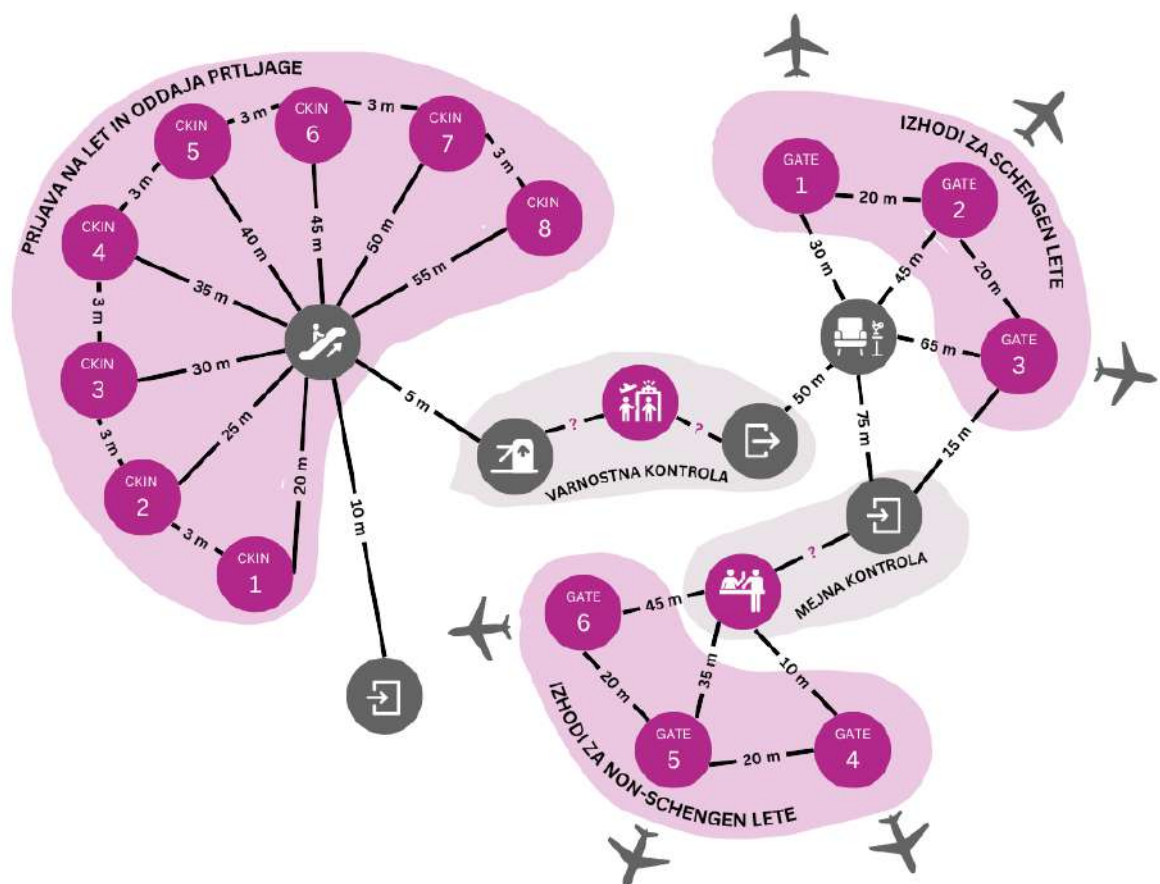
Tehnična povezanost ključnih sistemov

Učinkovita implementacija informacijske arhitekture digitalnih zaslonov zahteva tesno povezanost treh ključnih sistemov – AODB, DCS in FIDS. Ti sistemi morajo med seboj samodejno in v realnem času izmenjevati informacije, da so podatki, prikazani potnikom, zanesljivi, ažurni in usklajeni z dejanskim stanjem postopkov. Predpostavimo, da se manjše letališče odloči za AODB-rešitev, ki je cenovno dostopnejša zaradi manjše kompleksnosti operacij, obenem pa omogoča tehnološko neodvisnost in fleksibilnost zaradi lažjega povezovanja z različnimi DCS-sistemi (na primer Skyport AODB namesto AODB iz Amadeusovega ekosistema). Takšna rešitev zahteva dodatne integracijske sloje – treba je vzpostaviti dodatne vmesnike za prenos podatkov – na primer prek AIDX, API-integracij, vnaprej dogovorjenih XML-struktur ali vmesne aplikacije (AIScreen, 2023). Natančno mora biti definirano, kateri podatki so potrebni za pravočasen prikaz informacij (na primer »boarding open«, »gate closing«, »final call«), in zagotovljeno, da so ti podatki avtomatsko preneseni ob ključnih dogodkih v procesu vkrcavanja. V nasprotnem primeru FIDS ne more delovati samodejno in mora osebje ročno posodablјati prikaz, kar pomeni več dela, več napak in manjšo informacijsko zanesljivost za potnike.

Prikazovanje razdalje in časa hoje

Za izračun razdalje in časa hoje od prijavnega okenca do izhoda lahko uporabimo Dijkstrov algoritem, ki na osnovi digitalnega zemljevida terminala določi optimalno pot med ključnimi vozlišči, kot so okenca, varnostna kontrola, dvigala in izhodi. Povezave med temi točkami vključujejo metriko razdalje, dostopnosti in časovne zahtevnosti. Oceno časa dopolnjuje napovedni model z umetno inteligenco, ki na osnovi preteklih podatkov, urnika letov in trenutne obremenjenosti napove čakalno dobo na varnostni (in mejni) kontroli. Dodatno natančnost omogočajo oddajniki BLE (Bluetooth Low Energy), ki anonimno in brez potrebe po aplikacijah zaznajo gibanje potnikov od vhoda do izhoda. Sistem tako beleži realne čase prehodov in na tej osnovi sproti prilagaja ocene za naslednje potnike (AiRISTA Flow, 2025). Potniku se nato v realnem času prikažejo predvideno trajanje, razdalja in število korakov, skupaj z informacijami

o dostopnosti poti. Ti podatki se prek API- ali podatkovnih tokov (npr. JSON/XML) prenesejo v AODB, od koder jih FIDS prevzame in prikaže na zaslonih pri prijavi na let in ob vходу v varnostno kontrolo. Tak prikaz izboljša informiranost, zmanjša zmedo in potnikom pomaga pri odločitvi, ali potrebujejo asistenco. Pri tem lahko letališče za upravljanje BLE-oddajnikov uporabi trenutne rešitve, kot je SITA Beacon Registry (2025), ki prek standardiziranega API omogoča zanesljiv dostop do lokacijskih podatkov brez potrebe po lastni aplikaciji. Čeprav SITA Beacon Registry ni neposredno integriran z AODB, kot je Skyport, je prek vmesnega modula mogoče enostavno povezati zajete podatke z napovednim modelom, rezultati pa se nato strukturirano vključijo v AODB in prikažejo preko FIDS. Tak pristop omogoča robustno in razširljivo rešitev, ki se lahko implementira tudi na manjših letališčih.



Slika 1: Zemljevid letališča z Dijkstrovim algoritmom

Vir: (Lastni vir)

Prikazovanje skupin za vkrcavanje

Poseben izziv v integraciji med DCS, AODB in FIDS predstavlja prikaz skupin za vkrcavanje, ki potnikom sporočajo vrstni red vstopa v letalo. V sistemih, kot je Amadeus Altea DCS (v primerih »full-Altea« prevoznikov), se te skupine običajno samodejno določijo glede na razred vozovnice, status potnika v programu zvestobe ali druge kriterije. Informacija o skupini se nato lahko izpiše na vstopnem kuponu, prek AODB se posreduje v FIDS in prikaže na zaslonih nad izhodom. Številni DCS-sistemi, ki jih uporabljajo posamezni prevozniki, pa niso del odprtih in standardiziranih ekosistemov, kot sta Amadeus Altea in SabreSonic, temveč gre za lastniške ali specializirane rešitve, ki zahtevajo posebne integracijske dogovore z letališči. Med takšne sisteme sodijo na primer Troya (različica Sabre), Sprint (Radixx – različica Sabre za nizkocenovne prevoznike) ter Navitaire (Amadeusova rešitev za nizkocenovne in hibridne prevoznike). Ti sistemi pogosto ne omogočajo vnaprej določenih skupin za vkrcavanje ali pa teh informacij ne posredujejo v strukturirani obliki. V praksi to pomeni, da informacija o vrstnem redu vkrcavanja v DCS sploh ne obstaja, posledično pa skupin ni mogoče avtomatsko prikazati prek FIDS-sistemov. Poleg tega ti sistemi običajno ne podpirajo privzetega AIDX-sporočanja, ki bi omogočalo, da letališka baza AODB samodejno prejema ključne podatke, kot so status vkrcavanja in število že vkrcanih potnikov. Da bi AODB (kot je na primer Skyport) lahko te podatke obdelal, mora biti vzpostavljen poseben vmesnik – bodisi prek standardiziranega protokola AIDX/XML, če ga DCS podpira, bodisi prek API integracije, razvite v sodelovanju z operaterjem sistema. Če je takšna povezava uspešno vzpostavljena, lahko AODB samodejno sinhronizira podatke iz DCS in jih posreduje naprej v FIDS. Če integracije ni, mora osebje letališča vse faze posodabljanja ročno. Če želi letališče skupine za vkrcavanje prikazovati kljub temu, da jih DCS ne posreduje, je treba s prevoznikom urediti pravico do lokalne razvrstitve potnikov, na primer po sedežni razporeditvi (najprej zadnje vrste ipd.) ali po drugih kriterijih (na primer posebne potrebe, družine z majhnimi otroki). Namesto generičnih oznak (Skupina 1) sistem v takem primeru lahko neposredno uporabi podatke o sedežnih vrstah in na zaslonih prikaže konkretne številke vrst, ki se trenutno vkrcavajo. Za tovrsten prikaz mora imeti AODB ali povezan vmesnik (middleware) možnost preslikave sedežnih vrst v prikazna besedila, ki jih FIDS dinamično izpiše na zaslonih nad izhodom. Tak pristop omogoča strukturirano, razumljivo in pretočno vkrcavanje.

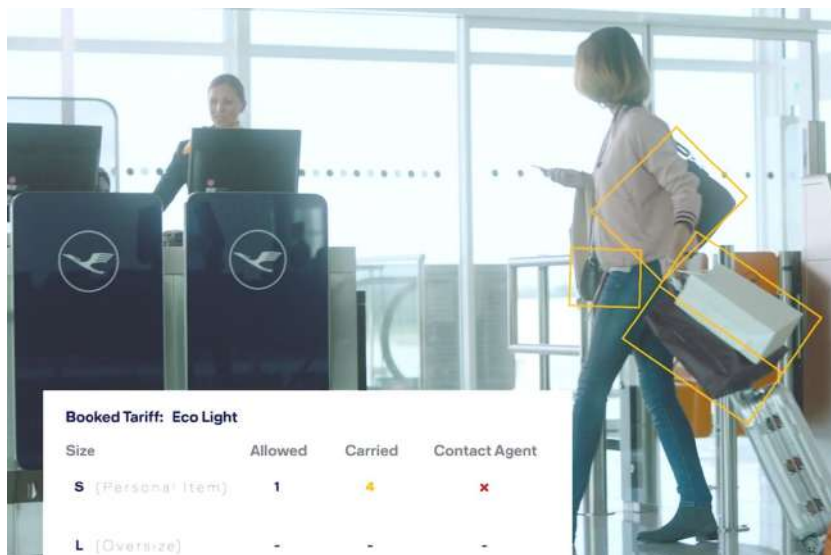
2.3 Preverjanje ustreznosti ročne prtljage s kombinacijo umetne inteligence in računalniškega vida

2.3.1 Upravljanje ročne prtljage – pregled operativnih in komercialnih zahtev

Upravljanje ročne prtljage predstavlja pomemben del letaliških operacij, saj neposredno vpliva na varnost, časovno učinkovitost in splošno izkušnjo potnikov. V praksi se pogosto pojavljajo situacije, ko količina ročne prtljage preseže prostorske zmogljivosti kabine, kar zahteva hitro odzivanje in dodatne postopke tik pred vkrcanjem v letalo.

Kvote prostorske zmogljivosti kabine so določene glede na tip letala in njegovo konfiguracijo ter delež prodanih sedežev – pri polno zasedenih letih na Airbus 319 s 156 sedeži večjo prtljago lahko prinese tretjina potnikov, na novejših Airbus 220-300 s 145 sedeži pa (v teoriji) vsi. V praksi to za zemeljsko osebje pomeni ročno štetje večjih kosov in označevanje prtljage med vkrcavanjem ter naknadno nalaganje v prtljažnik, za kabinsko posadko pa hitro »igranje tetrisa«.

Ker se zaradi izogibanja temu, da bi presežene kose zavračala kabinska posadka, paradoksalno pobere tudi preveč ročne prtljage, obenem pa zaradi zmožnosti izigravanja sistema potniki lahko potujejo s prevelikimi, pretežkimi in preštevilnimi prtljagami, je Lufthansa v sodelovanju z zeroG razvila sistem za preverjanje ročne prtljage z računalniškim vidom. *Carry-On Baggage Detection Tool* je trenutno v operativnem testiranju na letališčih Frankfurt (FRA) in Hamburg (HAM) in uporablja kamere, nameščene na različnih točkah vkrcavanja, s katerimi zaznava in kategorizira ročno prtljago (»suitcase«, »handbag«, »backpack«) ter opozarja osebje na morebitne prekoračitve dovoljenih količin in dimenzij prtljage. Obenem ocenjuje napolnjenost prostora za prtljago v kabini, kar zmanjšuje potrebo po naknadnem nalaganju odvečno pobrane prtljage v prtljažni prostor letala (Lufthansa Group, n. d.).



Slika 2: Lufthansa Systems Carry-On Baggage Detection Tool

Vir: (posnetek zaslona iz videoposnetka *The Inside Sessions (Season 3 Episode 1)* | *Carry-on Baggage detection with AI* dostopnega na <https://innovation-runway.lufthansagroup.com/en/focus-areas-projects/use-cases/detect-hand-luggage-using-computer-vision.html>)

2.3.1.1 Težave preverjanja ustreznosti ročne prtljage pri izhodu

Pri izbranem postopku se pojavljajo štiri ključne težave.

Varnostni pregled prtljage

Prtljaga, ki je zaradi omejitev prostora v kabini v zadnjem trenutku naložena v prtljažnik, je na varnostnem pregledu obravnavana kot kabinska prtljaga, kar pomeni, da se preverjajo drugačna pravila nevarnih snovi in prepovedanih predmetov kot za oddano prtljago. Poseben izziv predstavljajo elektronske naprave, ki niso pravilno izklopljene (npr. prenosniki) ali katerih moč presega 100 Wh (npr. polnilne baterije). Prevozniki sicer zahtevajo, da osebje potnika povpraša po nevarnih snoveh in prepovedanih predmetih v prtljagi in pokaže na infografiko, vendar je treba upoštevati, da je potovanje z letalom za mnoge ena najbolj stresnih izkušenj, zato kratka interakcija med potnikom in osebjem – pogosto v naglici in ob morebitnih jezikovnih ali kulturnih nesporazumih – ne zagotavlja, da bo potnik dejansko prepoznal pomen svarila in nevarne predmete iz svoje prtljage odstranil. Kljub postopkom ostaja tveganje za človeško napako visoko.

Porazdelitev pobiranja prtljage med potniki ni vedno optimalna

Da bi se izognili težavam pri vkrcavanju, se ročna prtljaga pogosto pobira že pri okencih za prijavo na let in oddajo prtljage. Tako neprijetnost pobrane ročne prtljage doleti predvsem potnike, ki oddajajo tudi večje kose prtljage in/ali potujejo na destinacije, za katere je zaradi pogojev vstopa v državo treba dodatno preveriti potovalne dokumente. Praviloma so to potniki, ki so bodisi kupili dražjo tarifo vozovnice bodisi bi jim ročna prtljaga prišla prav na dolgih urah potovanja ali ob izgubi ostale prtljage. Nasprotno pa številni potniki s cenejšimi vozovnicami, ki gredo neposredno čez varnostno kontrolo do izhoda, ročno prtljago večinoma obdržijo, saj jih sistem ne zajame dovolj zgodaj.

Nepredvidljivost števila kosov prtljage v kabini

Napovedovanje, koliko večjih ročnih prtljag bodo potniki prinesli na let in koliko jih bo dejansko končalo v kabini, je nezanesljivo, predvsem zaradi pomanjkanja neposrednega nadzora ali stika z večino potnikov pred vkrcanjem. Osebe se sicer lahko deloma zanaša na pretekle izkušnje (sezonske razlike, število družin, večje skupine, delež povezovalnih letov na določene destinacije ...) ter na nekaterih letih na informacije iz preračunanih operativnih sistemskih podatkov, vendar se predvidevanja pogosto ne uresničijo.

Dodatna operativna tveganja

Letalski prevozniki imajo za ročno prtljago, pobrano v zadnjem trenutku, različna navodila, kako jo označiti. Če je sistem dobro zastavljen, prtljaga dobi prtljažni listek z RFID-kodo, potnik dobi potrdilo o oddani prtljagi in e-sporočilo od prevoznika – sledljivost je mogoča, prtljaga je poslana do končne destinacije, potnik je obveščen o lokaciji prevzema in morebitni carinski kontroli. Če je sistem solidno zastavljen, prtljaga dobi privesek, potnik dobi odtrgan del priveska, svojo prtljago pa mora takoj po pristanku prevzeti neposredno pred letalom – prtljaga se lahko izgubi le, če jo potnik pozabi ali če jo vzame kdo drug. Če je sistem slabo zastavljen, prtljaga dobi ročno izpolnjen prtljažni listek, potnik dobi odtrgan del listka, svojo prtljago pa prevzame v prostoru za prevzem prtljage na letališču, kjer letalo pristane – ob izgubi ali kraji je tako označeno prtljago težje najti, sploh če je prtljažni listek izpolnjen napačno ali nečitljivo.

Pred leti smo ustreznost kabinske prtljage za nekatere nizkocenovne prevoznike ročno preverjali pred varnostno kontrolno točko. Ko smo našli dovolj kosov, so preostali potniki ročno prtljago oddali. Preverjali smo tudi ustreznost – potniki, katerih prtljaga ni ustrezala

zakupljeni količini, so morali prevelike in/ali dodatne kose oddati in plačati. Pri vkrcavanju se takrat zaradi presežka prtljage ni delalo zamud.

Danes nimamo na voljo dodatnega kadra, ki bi opravljal te zadolžitve, obenem pa so se težave s preveč ročne prtljage razširile na večino prevoznikov – predvsem zato, ker so preprosti poslovni modeli vozovnic z vključeno oddano prtljago praktično preteklost. Letalski prevozniki gredo vse bolj v smer fleksibilne cenovne politike, kjer potnik plača le tisto, kar potrebuje (oziroma se ne zaveda, kakšne neprijetnosti za sabo potegnejo najcenejše tarife z zelo malo vključene prtljage, nemogočo izbiro sedeža in nemogočim spreminjanjem vozovnice). Z vse večjo priljubljenostjo »light« vozovnic in mobilno prijavo na let pa imajo letališča omejene možnosti »poloviti« potnike na točkah pred vkrcavanjem, torej na točki, ko preveč ročne prtljage postane težava.

Zato je rešitev pri preverjanju ročne prtljage pred varnostno kontrolno točko – z računalniškim vidom in umetno inteligenco.

2.3.1.2 Zahteve ob implementaciji takšne rešitve

Pri implementaciji te rešitve mora sistem upoštevati več dejavnikov.

Pravočasnost odhoda letala

Potniki, pri katerih sistem na varnostnokontrolni točki prepozna, da morajo oddati večjo ročno prtljago, naj ne zamudijo roka za prijavo na let, obenem pa naj bodo pravočasno pri izhodu. Sistem naj torej upošteva rok za prijavo na let in oddajo prtljage – pri tem naj upošteva povprečen čas za oddajo prtljage potnikov, ki so že prijavljeni na let in oddajajo le en kos prtljage, ter povprečen čas, ki ga potnik porabi od okenca za prijavo na let do varnostnokontrolne točke. Ker lahko predvidevamo, da bodo nekateri potniki prišli na letališče pozneje, ko za oddajo ročne prtljage na okencu za prijavo na let ne bo več časa, naj sistem razpoložljivost kvote ustrezno preračunava in k oddaji prtljage usmeri potnike, ki so prišli že prej. Če je letalo v prihodu predčasno in potnikova prtljaga do 10 odstotkov presega kvoto ročne prtljage v kabini, naj sistem potnika brez obvestila spusti čez varnostno kontrolno točko.

Omejitev predmetov in/ali snovi v oddani prtljagi

Ker lahko pričakujemo, da bodo nekateri potniki imeli v ročni prtljagi stvari, ki ne sodijo v oddano prtljago (na primer večje elektronske naprave z litijevimi baterijami, medicinske

pripomočke in zdravila), obenem pa ne želimo dodatno obremeniti osebja, naj sistem brez ponovnega obvestila spusti potnika čez varnostno kontrolno točko, če sta od prvega skeniranja vstopnega kupona pretekli dve minuti.

Jezikovne ovire potnikov

Ker lahko pričakujemo, da nekateri neslovenski potniki ne bodo razumeli niti angleško, naj sistem obvestilo izpiše tudi v jeziku destinacije odhodnega leta.

Zagotovljen prostor za ročno prtljago za letalskega prevoznika pomembnih potnikov in družin z majhnimi otroki

Na letih, kjer letalski prevoznik vsakemu potniku dovoljuje en manjši in en večji kos ročne prtljage, naj imajo nekateri potniki zagotovljen prostor za večji kos v kabini letala. Sistem naj od kvote odšteje vse potnike s prednostnim statusom – poslovni razred, nadaljevalni let v poslovnem ali prvem razredu, visoki statusi v prevoznikovem programu zvestobe ali združenju prevoznikov, na nekaterih letih najdražje tarife vozovnic v ekonomskem razredu – in vse potnike, ki potujejo z majhnimi otroki. Če gre tak potnik čez varnostno kontrolno točko brez večje ročne prtljage, naj sistem ustrezno sprost kvoto. Če tak potnik potuje z več ročne prtljage, kot jo za njega dovoljuje prevoznik, naj ga sistem obvesti, da mora presežek oddati.

Komercialni vidik omejevanja ročne prtljage

Na letih, kjer letalski prevoznik vsakemu potniku dovoli le en manjši kos, večjega pa le ob doplačilu, naj sistem pri potnikih, ki za ročno prtljago niso doplačali, preračuna razpoložljivost kvote. Če ta ni še presežena, potnike obvesti, da lahko presežek plačajo na okencu potniških storitev prevoznikov ali pri izhodu. Kadar je kvota zapolnjena, naj jih obvesti, da morajo ročno prtljago oddati. Če gre potnik s pravico do večjega kosa ročne prtljage čez varnostno kontrolno točko brez večjega kosa, naj sistem ustrezno sprost kvoto. Če tak potnik potuje z več ročne prtljage, kot jo za njega dovoljuje prevoznik, naj ga sistem obvesti, da mora presežek oddati.

Razpoložljivost povezav do destinacije ob izgubi prtljage

Do nekaterih destinacij je zaradi slabe razpoložljivosti letov težko priti, zato želimo, da potniki, ki na take destinacije potujejo, ročno prtljago obdržijo. Idealno bi sistem preveril urnik letov in prevoznikovo matriko pospešene dostave prtljage (»rush« prtljaga) ter za oddajo ročne prtljage izbral potnike, ki lahko morebitno izgubljeno prtljago prejmejo v 24 urah (in če to ne gre, v 48 urah). V poenostavljeni alternativni naj sistem da prednost ročni prtljagi potnikov, ki potujejo na neevropske destinacije (ICAO-koda se ne začne z E, L ali B).

Za uspešno vzpostavitev tehnološke rešitve za tako preverjanje ustreznosti ročne prtljage in zavračanje prtljage je ključno razumevanje računalniškega vida v kombinaciji z umetno inteligenco.

Uporaba kombinacije umetne inteligence in računalniškega vida pred varnostnokontrolno točko prepreči težave s preveliko ročno prtljago ob vkrcavanju in zmanjša verjetnost, da bo treba presežek ročne prtljage zaradi omejitev kabine naknadno nalagati v prtljažnik. Ročna prtljaga je tudi varneje pregledana, osebje pri izhodu je deležno manj konfliktnih situacij, letalski prevozniki pa imajo zaradi bolj konsistentnega upoštevanja komercialnih pravil večji prihodek.

Pri preverjanju ustreznosti ročne prtljage umetna inteligenca sistemu zagotavlja “pamet” – to pomeni, da se modeli umetne inteligence učijo iz ogromnih količin podatkov (na primer slik prtljage, ki so že bile preverjene), da prepoznajo pravilnosti in nepravilnosti. Sčasoma postanejo vedno bolj natančni pri ocenjevanju, ali določena prtljaga ustreza predpisanim standardom, brez da bi vsak posamezen kos prtljage moral fizično pregledati človek (Li & Wang, 2020).

Računalniški vid je podpodročje umetne inteligence, ki računalnikom omogoča “videti” in interpretirati vizualne informacije iz slik in videoposnetkov. Pri preverjanju ustreznosti ročne prtljage na letališčih računalniški vid omogoča, da sistem avtomatsko oceni, če prtljaga potnika ustreza dimenzijskim in količinskim pravilom izbranega prevoznika.

Glavna prednost uporabe računalniškega vida pred varnostno kontrolo je zgodnje odkrivanje nepravilnosti, kar omogoča pravočasno obvestilo potniku in razbremeni osebje pri izhodu v letalo. Sistem lahko deluje popolnoma samostojno, brez potrebe po aplikaciji ali interakciji s potnikom, kar je ključno z vidika uporabniške izkušnje in pretočnosti.

2.3.1.3 Tok podatkov (data pipeline)

Sistem za preverjanje prtljage z računalniškim vidom deluje v naslednjih fazah (Li & Wang, 2020):

1. zajem slike: kamere, ki so nameščene pred varnostno kontrolo, zajamejo podobo potnikove prtljage – sistem deluje pasivno, brez potrebe po sodelovanju s potnikom,
2. obdelava slike: zajete slike se obdelajo, odstrani se šum, poveča kontrast, standardizira ločljivost, slike se pretvorijo v ustrezne barve ali globinske kanale,

3. prepoznavanje objektov: s predtrenirano konvolucijsko nevronske mrežo (na primer YOLO, EfficientDet) sistem identificira posamezne kose prtljage na sliki in jih klasificira (nahrbtnik, kovček, torba ipd.),
4. ekstrakcija meritev in primerjava s pravili: sistem oceni dimenzije vsakega kosa na osnovi znane referenčne točke (na primer podlage ali znanega markerja) in preveri, ali presega dovoljene mere – podatki o pravilih se pridobijo iz AODB in DCS,
5. analiza količine: sistem prešteje število kosov in ugotovi, ali potnik presega dovoljeno število glede na svojo vozovnico (informacija iz DCS),
6. odločitev in obvestilo: če prtljaga ni skladna, se sproži avtomatsko obvestilo na zaslonu ob vhodu (naj potnik del prtljage odda ali doplača); če je vse skladno, sistem potnika ne moti,
7. spremljanje kvote: vsaka odločitev vpliva na trenutno kvoto razpoložljive prtljage v kabini in jo posodobi,
8. logiranje in nadzor: sistem zapisuje vse rezultate (s časom in z lokacijo zaznave) za morebitno naknadno analizo ali dokazilo ob reklamacijah.

Tak pristop omogoča popolnoma avtomatizirano preverjanje prtljage brez človeške interakcije in hkrati zagotavlja skladnost s komercialnimi politikami prevoznikov. Uporaba računalniškega vida v tej fazi zmanjša možnost zastojev in konfliktov pri vkrcavanju ter omogoča natančno sledenje dejanski zasedenosti prostora v kabini.

Slika 3: Diagram aktivnosti

Vir: (Lastni vir)

3 RAZVOJ IZDELKA

3.1 *Analiza podatkov*

Analiza podatkov je predstavljala ključni del razvoja prototipa in validacije konceptov uporabe umetne inteligence za optimizacijo potniških tokov na letališču. Namen tega poglavja je predstaviti postopek zbiranja, strukturiranja, priprave in interpretacije podatkov, ki so služili kot osnova simulacijskega okolja.

3.1.1 *Uporaba podatkov za simulacijo*

Pri razvoju simulatorja so bili uporabljeni izmišljeni podatki, ki temeljijo na vzorcih, strukturi in vrednostih, značilnih za realne podatke, in so podobni tem, ki bi jih lahko pridobili iz AODB in DCS. Podatki so ustvarjeni glede na nabor letov z letališča Ljubljana na poljubni ponedeljek v začetku poletne sezone, ko potuje večje število potnikov s prednostnim statusom in je verjetnost zamude zaradi naknadnega nakladanja ročne prtljage v prtljažnik letala večja. Vrste uporabljenih podatkov in njihove povezave so razvidne iz ERD v poglavju 3.2 Načrtovanje modela.

Namen uporabe takšnih podatkov je omogočiti realistično testiranje in prikaz funkcionalnosti razvitega sistema, brez kršenja pravil zasebnosti ali razkrivanja poslovno občutljivih informacij.

3.1.2 *Struktura in obseg podatkov*

Uporabljeni so bili naslednji viri podatkov:

- `departure.csv`: podatki o 20 letih (schengenskih in neschengenskih) s podrobnostmi o časih, omejitvah prtljage in statusih – pripravljeno na osnovi podatkov preteklih letov iz aplikacije Flightradar24 in izmišljenih podatkov,
- `passenger.csv`: podatki o več kot 2000 potnikih z atributi o prtljagi (količina, skladnost), kabinah, statusih zvestobe in destinacijah – generirano v Excelu s funkcijami za naključja,

- `airline.csv`, `airport.csv`, `aircraft.csv`: dodatni metapodatki za interpretacijo komercialnih pravil in regij.

3.1.3 Obdelava in priprava podatkov

Ta faza projekta se je začela pred začetkom razvoja simulacijskega modela in se nadaljevala med iterativnim razvojem prototipa. Pravilno delovanje aplikacije in konsistentnost podatkov so zagotavljali naslednji procesi:

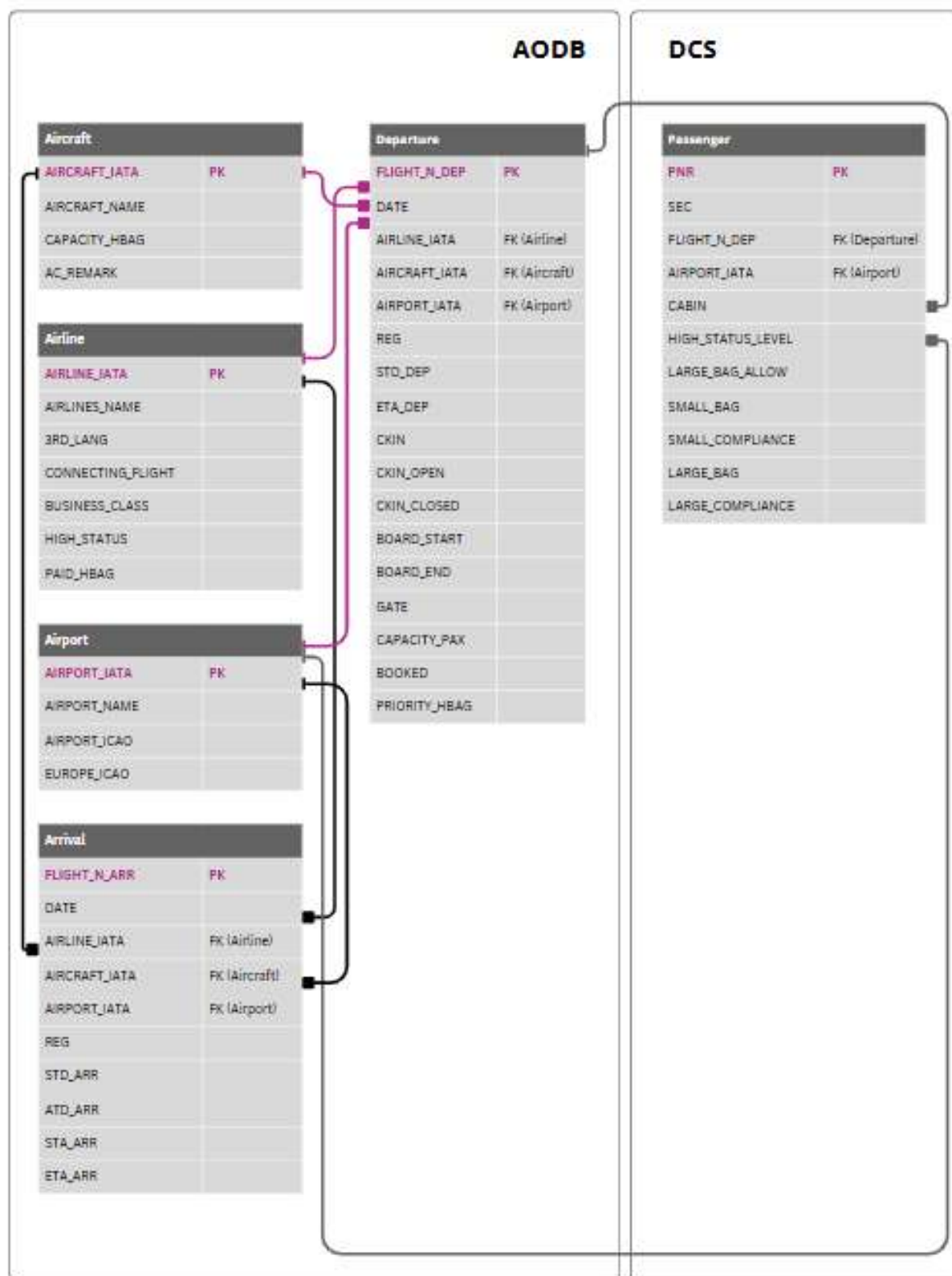
- nalaganje in konverzija tipov: CSV-datoteke so bile naložene z uporabo Pandasa, določeni stolpci so bili pretvorjeni v nize (na primer `FLIGHT_N_DEP`), časovni podatki pa v format `datetime.time` za natančne izračune urnikov in statusov,
- normalizacija logičnih vrednosti: logične vrednosti v `passenger_df` (na primer `SMALL_COMPLIANCE`, `LARGE_COMPLIANCE`) so bile pretvorjene v prave booleanove vrednosti z uporabo funkcije `str_to_bool`, ki zagotavlja robustnost pri manjkajočih podatkih,
- validacija in združevanje relacij: podatki iz različnih datotek so bili združeni na osnovi skupnih atributov (tujih ključev), kot je definirano v ERD-načrtu, kar zagotavlja dostopnost vseh relevantnih informacij za simulacijsko logiko,
- začetna inicializacija stanj: globalne spremenljivke, kot sta `flight_bag_status` in `global_statistics`, so inicializirane ob zagonu aplikacije za zagotovitev ponovljivosti in testiranja scenarijev.

3.2 Načrtovanje modela

Model je zasnovan kot osnovni funkcionalni okvir za simulacijo potniških tokov na manjšem letališču. Njegov namen je omogočiti testiranje učinkov umetne inteligence pri razporejanju potnikov glede na časovne in prostorske parametre, pri preverjanju skladnosti ročne prtljage z dovoljenimi pravili in vizualizaciji toka potnikov skozi terminal. Pri tem model omogoča kombiniranje podatkov iz različnih virov v simuliranem okolju, kar je nujno za letališča, ki nimajo enotne integracije med sistemi.

3.2.1 ERD-načrt podatkovne baze

Za razvoj prototipne simulacijske aplikacije za optimizacijo potniških tokov na manjšem letališču je bil zasnovan podatkovni model, ki temelji na realistično zastavljeni strukturi letaliških operacij. Entitete *Departure*, *Arrival*, *Aircraft*, *Airline* in *Airport* temeljijo na strukturi AODB, ki predstavlja osrednji sistem za upravljanje operativnih podatkov o letih, tipih letal, prevoznikih in letališčih. Entiteta *Passenger* pa je vsebinsko vezana na DCS, ki skrbi za prijavo potnikov na let in upravljanje podatkov o prtljagi. Celoten model omogoča sledenje potniku od prijave do vkrcanja, ob tem pa vključuje ključne informacije o statusu leta, količini in tipu prtljage ter pravilih posameznega prevoznika.



Slika 4: ERD-načrt podatkovne baze

Vir: (Lastni vir)

3.2.1.1 Opis entitet, povzetek atributov ter veljavnostna pravila

Entiteta Airline vsebuje podatke o letalskih prevoznikih in specifične lastnosti njihovih letov.

Tabela 1: Atributi entitete Airline

AIRLINE_IATA	IATA-oznaka letalskega prevoznika	primarni ključ; VARCHAR(3)
3RD_LANG	jezik prevoznika, za izpis pojasnila in navodila potniku (poleg SL in EN)	VARCHAR(2)
CONNECTING_FLIGHT	povezovalni leti (da/ne)	BOOLEAN
BUSINESS_CLASS	poslovni razred (da/ne)	BOOLEAN
HIGH_STATUS	visok status (da/ne)	BOOLEAN
PAID_HBAG	plačana kabinska prtljaga (da/ne)	BOOLEAN

Vir: (Lastni vir)

Entiteta Airport vsebuje podatke o letališčih in ICAO-območju.

Tabela 2: Atributi entitete Airport

AIRPORT_IATA	IATA-oznaka letališča	primarni ključ; VARCHAR(3)
AIRPORT_NAME	ime letališča	VARCHAR(100)
AIRPORT_ICAO	ICAO-oznaka letališča	VARCHAR(4)
EUROPE_ICAO	ICAO-oznaka se začne z E, L ali B (da/ne)	BOOLEAN

Vir: (Lastni vir)

Entiteta Aircraft vsebuje podatke o tipu letala, ki je vezan na posamezen let, ter omejitvi ročne prtljage.

Tabela 3: Atributi entitete Aircraft

AIRCRAFT_IATA	IATA-oznaka tipa letala	primarni ključ; VARCHAR(3)
AIRCRAFT_NAME	ime letala	VARCHAR(100)
CAPACITY_HBAG	omejitev števila večjih kosov ročne prtljage v kabini	INTEGER

AC_REMARK	opomba k ročni prtljagi	VARCHAR(100)
-----------	-------------------------	--------------

Vir: (Lastni vir)

Entiteta Arrival vsebuje podatke o prihodih letal.

Tabela 4: Atributi entitete Arrival

FLIGHT_N_ARR	številka leta v prihodu	primarni ključ; VARCHAR(7)
DATE	datum	DATE
AIRLINE_IATA	IATA-oznaka letalskega prevoznika	tuji ključ (povezuje Arrival z Airline); VARCHAR(3)
AIRCRAFT_IATA	IATA-oznaka tipa letala	tuji ključ (povezuje Arrival z Aircraft); VARCHAR(3)
AIRPORT_IATA	IATA-oznaka letališča	tuji ključ (povezuje Arrival z Airport); VARCHAR(3)
REG	registracija letala	VARCHAR(5)
STD_ARR	načrtovani čas vzleta	TIME
ATD_ARR	dejanski čas vzleta	TIME
STA_ARR	načrtovani čas pristanka	TIME
ETA_ARR	pričakovani čas pristanka	TIME

Vir: (Lastni vir)

Entiteta Departure vsebuje podatke o odhodi letal.

Tabela 5: Atributi entitete Departure

FLIGHT_N_DEP	številka leta v odhodu	primarni ključ; VARCHAR(7)
DATE	datum	DATE
AIRLINE_IATA	IATA-oznaka letalskega prevoznika	tuji ključ (povezuje Departure z Airline); VARCHAR(3)

AIRCRAFT_IATA	IATA-oznaka tipa letala	tuji ključ (povezuje Departure z Aircraft); VARCHAR(3)
AIRPORT_IATA	IATA-oznaka letališča	tuji ključ (povezuje Departure z Airport); VARCHAR(3)
REG	registracija letala	VARCHAR(5)
STD_DEP	načrtovani čas vzleta	TIME
ETA_DEP	pričakovani čas vzleta	TIME
CKIN	okence za prijavo na let (CKIN 1–CKIN 8)	VARCHAR(5)
CKIN_OPEN	čas začetka prijave na let	TIME
CKIN_CLOSED	čas zaključka prijave na let	TIME
BOARD_START	čas začetka vkrcavanja	TIME
BOARD_END	čas zaključka vkrcavanja	TIME
GATE	številka izhoda (GATE 1–GATE 6)	VARCHAR(5)
CAPACITY_PAX	število razpoložljivih sedežev na letu	INTEGER
BOOKED	število zasedenih sedežev	INTEGER
PRIORITY_HBAG	število zagotovljenih večjih ročnih prtljag v kabini	INTEGER

Vir: (Lastni vir)

Entiteta Passenger vsebuje podatke o potniku.

Tabela 6: Atributi entitete Passenger

PNR	PNR oz. referenčna koda	primarni ključ ; VARCHAR(6)
SEC	zaporedna številka potnika	INTEGER
FLIGHT_N_DEP	številka leta v odhodu	tuji ključ (povezuje Passenger z Departure); VARCHAR(7)
AIRPORT_IATA	IATA-koda letališča na končni destinaciji	tuji ključ (povezuje Departure z Airport); VARCHAR(3)

CABIN	kabina, v kateri potuje potnik	VARCHAR(8)
HIGH_STATUS_LEVEL	status, ki ga ima potnik pri letalski družbi ali združenju prevoznikov	VARCHAR(20)
LARGE_BAG_ALLOW	vozovnica vključuje veliko ročno prtljago oz. je bila ta dokupljena (da/ne)	BOOLEAN
SMALL_BAG	število kosov manjše ročne prtljage	INTEGER
SMALL_COMPLIANCE	ustreznost dimenzij manjše ročne prtljage (da/ne)	BOOLEAN
LARGE_BAG	število kosov večje ročne prtljage	INTEGER
LARGE_COMPLIANCE	ustreznost dimenzij večje ročne prtljage (da/ne)	BOOLEAN

Vir: (Lastni vir)

3.2.1.2 Opis relacij med entitetami

V podatkovnem modelu simulatorja, ki je bil razvit kot prototipna aplikacija za optimizacijo potniških tokov na letališču, so vzpostavljene relacije med ključnimi entitetami. Te predstavljajo realne objekte, kot so leti, potniki, letala, letalske družbe in letališča, relacije med njimi pa so definirane z uporabo primarnih in tujih ključev.

1. Passenger–Departure

- Razmerje: $M : 1$
- Opis: več potnikov je lahko povezanih z istim odhodnim letom
- FK: `Passenger.FLIGHT_N_DEP` → `Departure.FLIGHT_N_DEP`

2. Passenger–Airport

- Razmerje: $M : 1$
- Opis: vsak potnik je povezan z enim letališčem (odhodno točko v sistemu)
- FK: `Passenger.AIRPORT_IATA` → `Airport.AIRPORT_IATA`

- *Opomba:* destinacije povezovalnih letov v tej relaciji niso modelirane, saj zanjo niso relevantne

3. Departure–Airline

- Razmerje: $M : 1$
- Opis: vsak odhodni let opravlja ena letalska družba, ki lahko opravlja več letov
- FK: `Departure.AIRLINE_IATA → Aircraft.AIRLINE_IATA`

4. Departure–Aircraft

- Razmerje: $M : 1$
- Opis: vsak odhodni let uporablja eno letalo, ki je lahko uporabljeno za več letov
- FK: `Departure.AIRCRAFT_IATA → Aircraft.AIRCRAFT_IATA`

5. Departure–Airport

- Razmerje: $M : 1$
- Opis: vsak odhodni let se začne na enem letališču
- FK: `Departure.AIRPORT_IATA → Airport.AIRPORT_IATA`

6. Arrival–Airline

- Razmerje: $M : 1$
- Opis: vsak prihodni let je povezan z eno letalsko družbo
- FK: `Arrival.AIRLINE_IATA → Airline.AIRLINE_IATA`

7. Arrival–Aircraft

- Razmerje: $M : 1$
- Opis: vsak prihodni let uporablja eno letalo
- FK: `Arrival.AIRCRAFT_IATA → Aircraft.AIRCRAFT_IATA`

8. Arrival–Airport

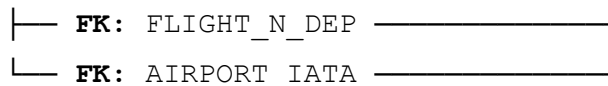
- Razmerje: $M : 1$
- Opis: vsak prihodni let pristane na enem letališču

- FK: Arrival.AIRPORT_IATA → Airport.AIRPORT_IATA

3.2.1.3 Shematičen prikaz relacij

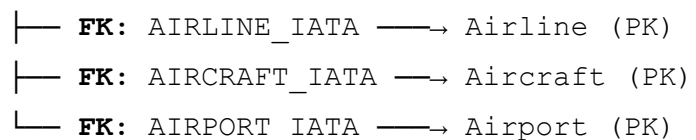
Spodnja shema prikazuje relacije med vsemi entitetami v podatkovnem modelu. Uporabljeni so označevalci PK (primarni ključ), FK (tuji ključ), M : 1 (mnogo proti ena).

Passenger (PK: PSGR_ID)

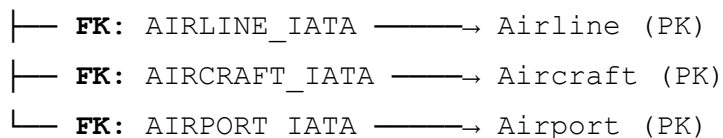


↓

Departure (PK: FLIGHT_N_DEP)



Arrival (PK: FLIGHT_N_ARR)



Relacijski model temelji na jasnih povezavah med letališkimi procesi, kar omogoča učinkovito integracijo različnih funkcionalnosti v prototipni aplikaciji. Podatkovna baza vključuje simulirane podatke za izbrani delovni dan (naključni ponedeljek), na osnovi katerih je mogoče testirati potek potniških tokov, analize obremenjenosti in odzive sistema na izmišljene scenarije.

Aplikacija sicer ne deluje v realnem času, vendar omogoča prikaz vedenja potnikov v simuliranem okolju, s poudarkom na naključnem prehodu potnikov skozi varnostno kontrolo. Takšen pristop je primeren za modeliranje in testiranje konceptov ter demonstracijo uporabnosti aplikacije v zgodnji fazi razvoja.

3.2.2 Diagrami primerov uporabe

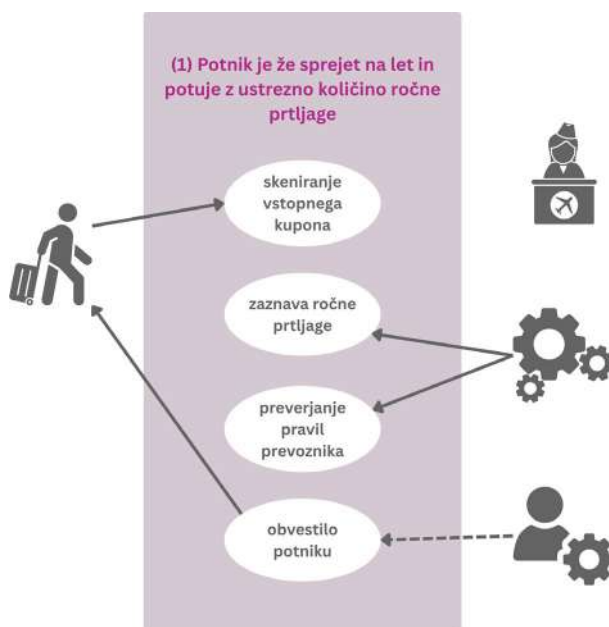
Pri načrtovanju funkcionalnosti prototipne aplikacije so bili izdelani diagrami primerov uporabe oziroma *UML Use Case Diagrams*, ki prikazujejo interakcije med uporabniki (akterji) in sistemom – uporabimo jih za identifikacijo glavnih funkcionalnosti z vidika uporabnika.

3.2.2.1 Skupina scenarijev glede na ustreznost ročne prtljage pred varnostno kontrolno točko

Ta skupina scenarijev prikazuje različne primere, ki se pojavijo pri preverjanju ročne prtljage potnikov z umetno inteligenco in računalniškim vidom, še preden potnik prestopi varnostno kontrolno točko.

1. Potnik je že sprejet na let in potuje z ustrezno količino ročne prtljage

- Potnik: brez preusmeritev nadaljuje pot
- Letališko osebje: *nima stika s potnikom*
- Sistem: zazna, da količina in velikost prtljage ustrežata pravilom
- Sistemski upravljavalec: *nima aktivne vloge, nadzor je pasiven*

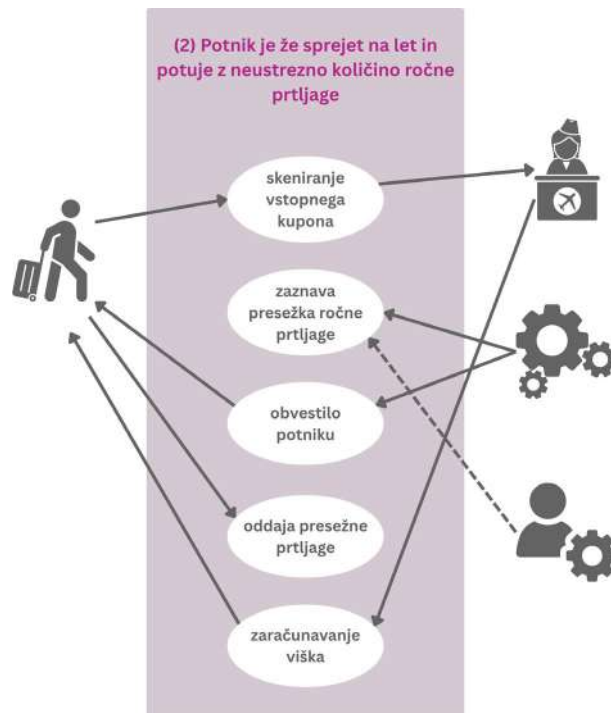


Slika 5: Diagram primera uporabe 1

Vir: (Lastni vir)

2. Potnik je že sprejet na let in potuje z neustrezno količino ročne prtljage

- Potnik: prejme obvestilo, da mora neustrezno ročno prtljago oddati
- Letališko osebje: sprejme prtljago in jo po potrebi zaračuna
- Sistem: zazna presežek in sproži ustrezno obvestilo
- Sistemski upravitelj: *nima aktivne vloge*, definira pa pravila in tolerance za zaznavo prekoračitve



Slika 6: Diagram primera uporabe 2

Vir: (Lastni vir)

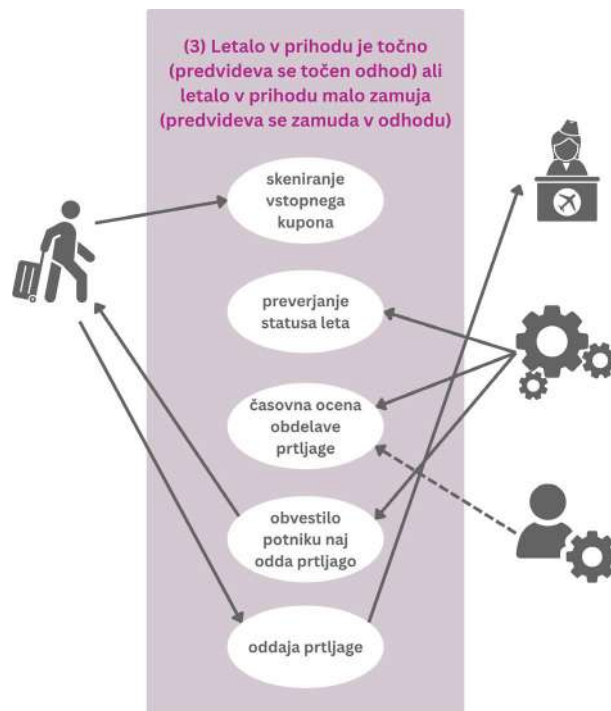
3.2.2.2 Skupina scenarijev za zavračanje ročne prtljage glede na točnost odhoda letala

Ta skupina scenarijev obravnava, kako sistem ravna z odločitvami o sprejemanju ali zavračanju dodatne ročne prtljage glede na napovedano točnost ali zamudo prihajajočega letala. Sistem mora oceniti, ali je časovno še mogoče ustrezno obdelati dodatno prtljago, brez da bi to vplivalo na pravočasen odhod.

Predpostavljamo, da potnik v ekonomskem razredu potuje na evropsko destinacijo in do vhoda v območje varnostne kontrole pride 15 minut pred zaprtjem okenca za prijavo na let in/ali oddajo prtljage.

1. Letalo v prihodu je točno (predvideva se točen odhod) ali letalo v prihodu malo zamuja (predvideva se zamuda v odhodu)

- Potnik: prejme informacijo, ali naj del ročne prtljage odda
- Letališko osebje: po potrebi sprejme prtljago
- Sistem: oceni, da je dovolj časa za obdelavo prtljage, in sproži obvestilo, da je prtljago treba oddati
- Sistemski upravitelj: določi časovno mejo za obdelavo prtljage



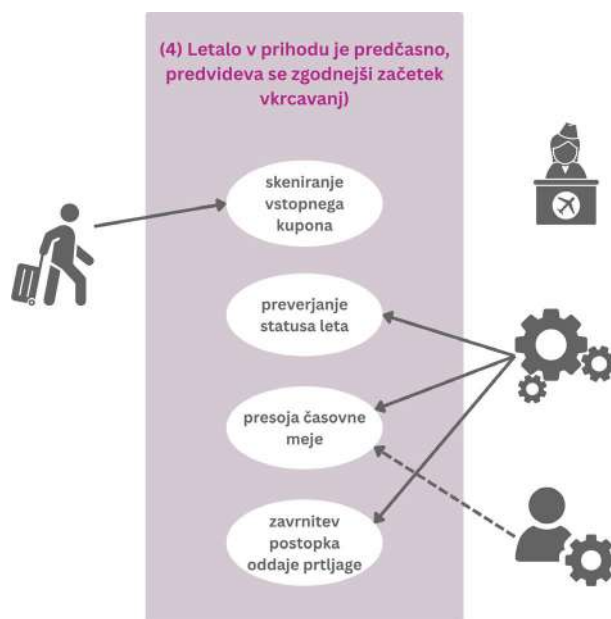
Slika 7: Diagram primera uporabe 3

Vir: (Lastni vir)

2. Letalo v prihodu je predčasno, predvideva se zgodnejši začetek vkrcavanja

- Potnik: ne prejme opozorila glede ročne prtljage
- Letališko osebje: *nima stika s potnikom*

- Sistem: na osnovi časovnih podatkov zavrne postopek oddaje
- Sistemski upravljavalec: definira logiko, kdaj naj sistem prepreči dodatne zamude

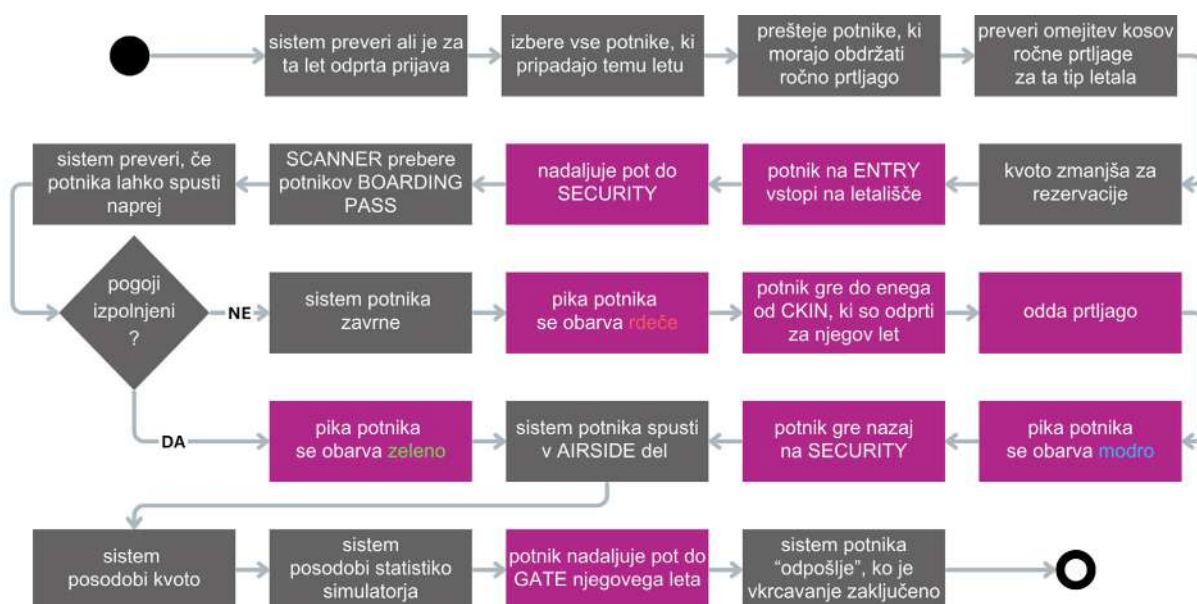


Slika 8: Diagram primera uporabe 4

Vir: (Lastni vir)

3.2.3 Diagram aktivnosti

Za prikaz zaporedja dejanj v scenariju preverjanja ročne prtljage pred varnostno kontrolo je bil izdelan diagram aktivnosti. Ta prikazuje, kako se od trenutka, ko sistem zazna prisotnost potnika, sproži niz obdelav, ki vodi do odločitve o nadaljnjem postopku, bodisi brez dodatnih obvestil bodisi z obvestilom o potrebi po oddaji ročne prtljage.



Slika 9: Diagram aktivnosti za simulator

Vir: (Lastni vir)

3.2.4 Logika simulacije

Logika simulacije temelji na predpostavki, da delovanje letališča in potniških tokov lahko simuliramo z dovolj natančno izdelanim modelom, ki vključuje ključne entitete, procese in časovne točke iz resničnega okolja. Simulacija je zasnovana kot izoliran sistem (sandbox), ki temelji na realističnih, vendar izmišljenih podatkih, ter omogoča preverjanje delovanja različnih scenarijev brez neposredne povezave z realnimi informacijskimi sistemi letališča (AODB, DCS, FIDS).

Glavni principi logike:

- potniki se prikažejo le v času njihovih letov (od začetka prijave na let do zaključka vkrčanja),
- sistem pred varnostno kontrolo zavrne potnika z neskladno prtljago,
- sistem rezervira prostor za ročno prtljago določenih potnikov ter ustrezno sprošča rezervacije in posodablja razpoložljivost kvote,
- status leta iz `departure.csv` se izračuna na osnovi simuliranega časa in prisotnosti enake registracije letala iz `arrival.csv`.

3.2.4.1 Tabelarni prikaz pogojev

Naslednja resničnostna tabela (truth table) prikazuje preverjanje ustreznosti ročne prtljage potnika. Pogoj za »HBAG OK« je vedno ustrezna manjša prtljaga in, kadar je dovoljena večja prtljaga, potem tudi ta ustrezna.

Tabela 7: Resničnostna tabela za pogoj »HBAG OK«

	SMALL_BAG	SMALL_COMPLIANCE	LARGE_BAG_ALLOW	LARGE_BAG	LARGE_COMPLIANCE	HBAG status
1	0	-	FALSE	0	-	-
2	0	-	FALSE	1	FALSE	HBAG NOT OK
3	0	-	FALSE	1	TRUE	HBAG NOT OK
4	0	-	TRUE	0	-	-
5	0	-	TRUE	1	FALSE	HBAG NOT OK
6	0	-	TRUE	1	TRUE	HBAG OK
7	0	-	FALSE	1	FALSE	HBAG NOT OK
8	0	-	FALSE	1	TRUE	HBAG NOT OK
9	0	-	TRUE	1	FALSE	HBAG NOT OK
10	0	-	TRUE	1	TRUE	HBAG OK
11	1	FALSE	FALSE	0	-	HBAG NOT OK
12	1	FALSE	FALSE	1	FALSE	HBAG NOT OK
13	1	FALSE	FALSE	1	TRUE	HBAG NOT OK
14	1	FALSE	TRUE	0	-	HBAG NOT OK
15	1	FALSE	TRUE	1	FALSE	HBAG NOT OK
16	1	FALSE	TRUE	1	TRUE	HBAG NOT OK
17	1	TRUE	FALSE	0	-	HBAG OK
18	1	TRUE	FALSE	1	FALSE	HBAG NOT OK
19	1	TRUE	FALSE	1	TRUE	HBAG NOT OK
20	1	TRUE	TRUE	0	-	HBAG OK
21	1	TRUE	TRUE	1	FALSE	HBAG NOT OK
22	1	TRUE	TRUE	1	TRUE	HBAG OK

Vir: (Lastni vir)

Pravila, ki določajo »HBAG OK«:

1. `SMALL_BAG == 1` in `SMALL_COMPLIANCE == TRUE`

in

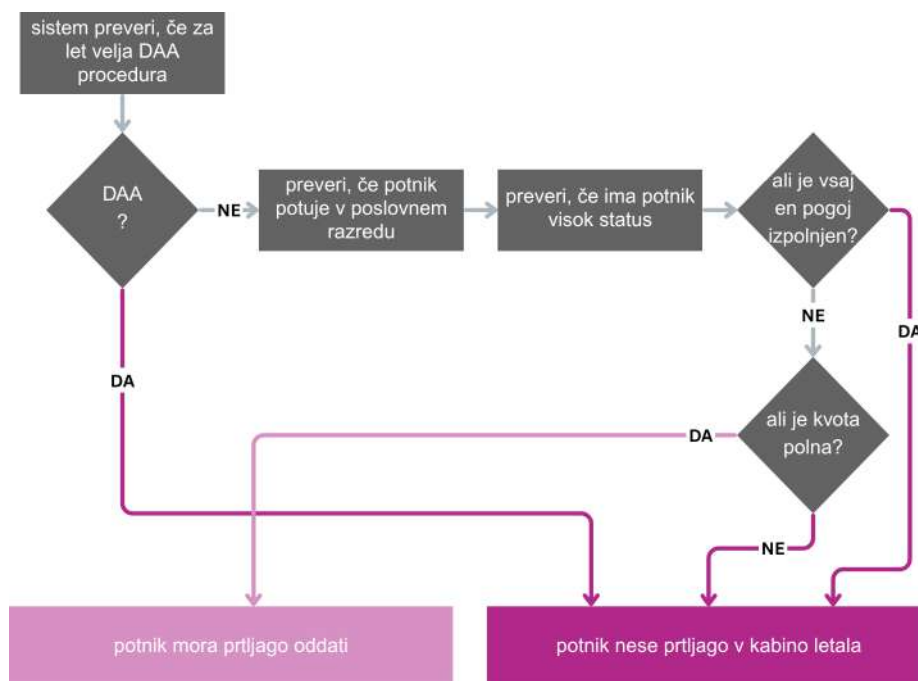
2. če `LARGE_BAG == 1`, potem mora biti:

- `LARGE_BAG_ALLOW == TRUE`
- `LARGE_COMPLIANCE == TRUE`

Sivo pobarvane celice tabele indicirajo, da potnik nadaljuje pot, brez da bi ga sistem zavrnil.

3.2.4.2 Diagram razvejanja za dodeljevanje pravice do prostora za večjo ročno prtljago v kabini letala

Naslednji diagram prikazuje, ob kakšnih pogojih sistem zavrača večji kos ročne prtljage potnikov, ki imajo `LARGE_BAG == 1` in izpolnjujejo pravilo »HBAG OK«.



Slika 10: Diagram razvejanja za dodeljevanje pravice do prostora za večjo ročno prtljago v kabini letala

Vir: (Lastni vir)

3.2.5 Omejitve modela

Prototip deluje kot samostojen simulator, ki ne pridobiva podatkov iz drugih informacijskih sistemov ali aplikacij. To izhaja iz dejstva, da so sedanji letališki sistemi pogosto delno integrirani ali popolnoma nepovezani, zaradi česar ni omogočen enoten pretok podatkov med različnimi funkcionalnimi enotami (npr. med rezervacijskim sistemom za prodajo vozovnic, različnimi sistemi za upravljanje odhodov (DCS), varnostno kontrolo, obveščanjem potnikov). Posledično mora aplikacija temeljiti na vnaprej pripravljenih ali ročno vnesenih podatkih, kar omejuje njeno uporabo v realnem okolju, a omogoča varno testiranje konceptov v izoliranem simulacijskem okvirju.

3.2.6 Razširitve modela

Model je zasnovan modularno in ga je mogoče v prihodnosti nadgraditi. Ena izmed ključnih možnosti je integracija z dejanskimi informacijskimi sistemi letališča, kot je Skyport, preko standardiziranih vmesnikov (API), kar bi omogočilo uporabo realnočasovnih podatkov. Nadaljnje razširitve vključujejo uporabo računalniškega vida za zajem vizualnih podatkov iz kamer, s čimer bi bilo mogoče preverjati skladnost prtljage v realnem okolju in ne zgolj v simulaciji. Poleg tega bi vključitev tehnologije BLE beacon omogočila natančnejše modeliranje gibanja potnikov skozi terminal in s tem izboljšala navigacijske poti ter usmerjanje s pomočjo kontekstualnih obvestil.

V začetni fazi lahko sistem deluje kot digitalni dvojček, torej kot navidezna kopija letališkega okolja, ki uporablja simulirane ali posnetke realnih podatkov za analizo operativne učinkovitosti. Tak digitalni dvojček omogoča primerjavo scenarijev z implementacijo in brez implementacije umetne inteligence, pri čemer lahko spremljamo in kvantitativno ovrednotimo razlike v skupnem številu zamujenih minut pri vkrcavanju zaradi razlogov, ki so povezani z oskrbo potnikov, s številom pobranih ročnih prtljag pri izhodu in stopnjo obremenjenosti osebja. Tako simulacijsko okolje ni le razvojno okolje, temveč služi tudi kot analitična osnova za pripravo poslovnega primera (business case) ob morebitni implementaciji rešitev v produkcijsko okolje.

3.3 Razvoj prototipa simulatorja

Prototip simulatorja je bil razvit z namenom prikaza praktične uporabe umetne inteligence v simuliranem letališkem okolju, pri čemer se osredotoča na preverjanje skladnosti in razpoložljivosti kvote ročne prtljage ter na prikaz informacij o letih.

Razvoj je temeljil na iterativnem pristopu z ločenim razvojem logike in prikaznega vmesnika. Končni rezultat je sistem, ki samodejno filtrira potnike glede na realnočasovne pogoje ter jih ustrezno vizualizira v simuliranem terminalu.

Gre za minimalno delujočo rešitev (MVP, minimum viable product), ki simulira delovanje realnih operativnih procesov in omogoča testiranje različnih scenarijev. Simulator omogoča:

- prikaz potnikov v realnem času glede na fazo leta (CKIN_OPEN – BOARD_END),
- preverjanje skladnosti prtljage (»HBAG OK«, »HBAG NOT OK«),
- simulacijo prikaza informacij o potniku (PNR, FLIGHT, GATE, FROM, TO, status kvote),
- izračun statusa leta glede na prihode, zamude in fazo vkrcavanja.

3.3.1 Uporabljene tehnologije

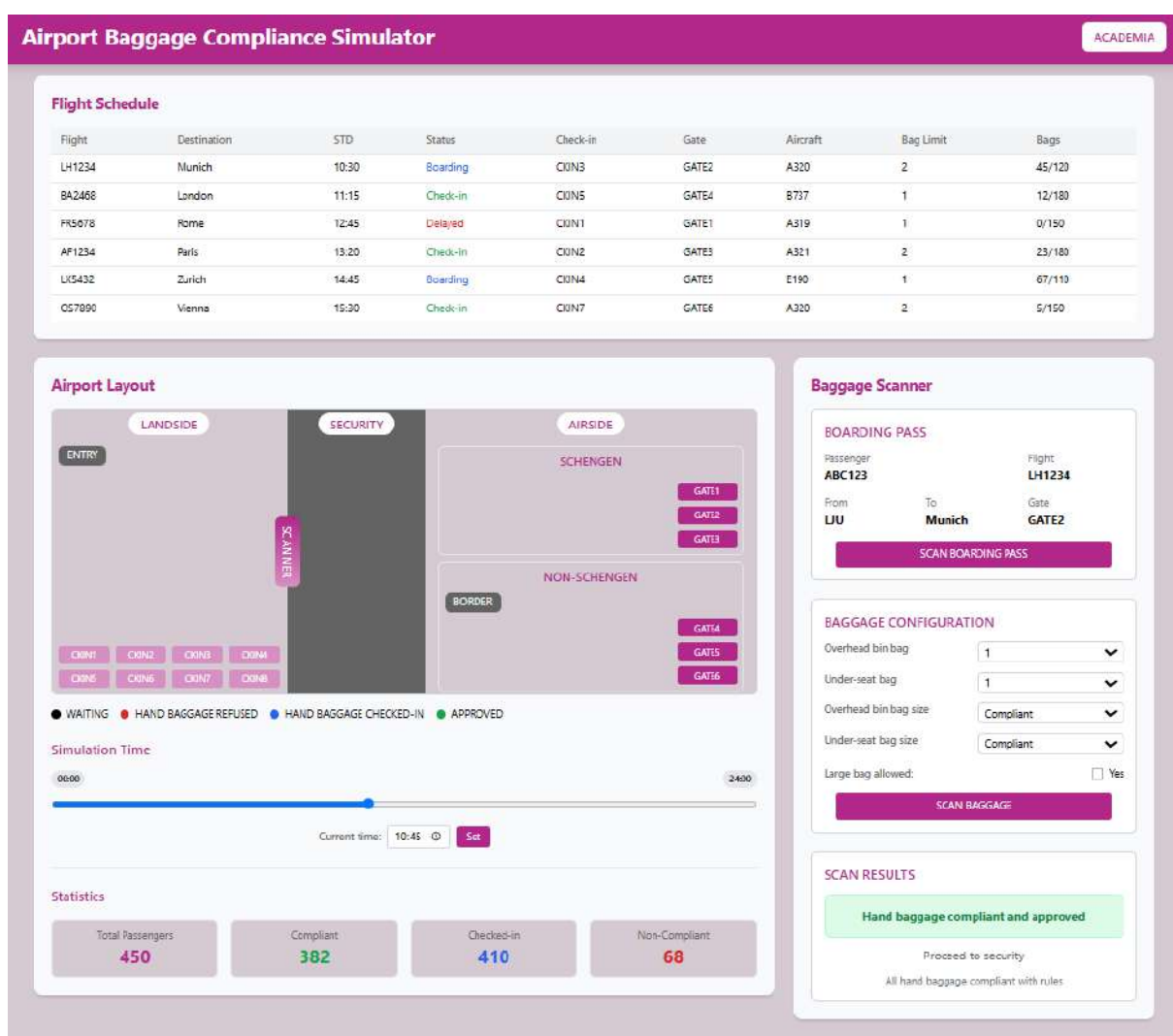
Za razvoj prototipa simulatorja so bile uporabljene sodobne spletne tehnologije, ki omogočajo modularno zasnovo, enostavno interaktivnost in vizualno preglednost. Izbira tehnologij je temeljila na potrebah projekta, ki zahteva učinkovito obdelavo podatkov, dinamičen prikaz in enostavno razširljivost.

3.3.1.1 Programski jezik in ogrodje (python in Flask)

Jedro logike simulatorja je implementirano v programskem jeziku python z uporabo mikro okvirja Flask. Python je bil izbran zaradi obsežne podpore za delo s podatki (na primer knjižnica Pandas za obdelavo CSV-datotek) in enostavne integracije z različnimi moduli. Flask omogoča enostavno izgradnjo spletnih API, ki služijo kot most med frontendom oziroma uporabniškim vmesnikom in backendom oziroma logiko obdelave podatkov. To omogoča dinamično posodabljanje informacij in interakcijo z uporabniškim vmesnikom.

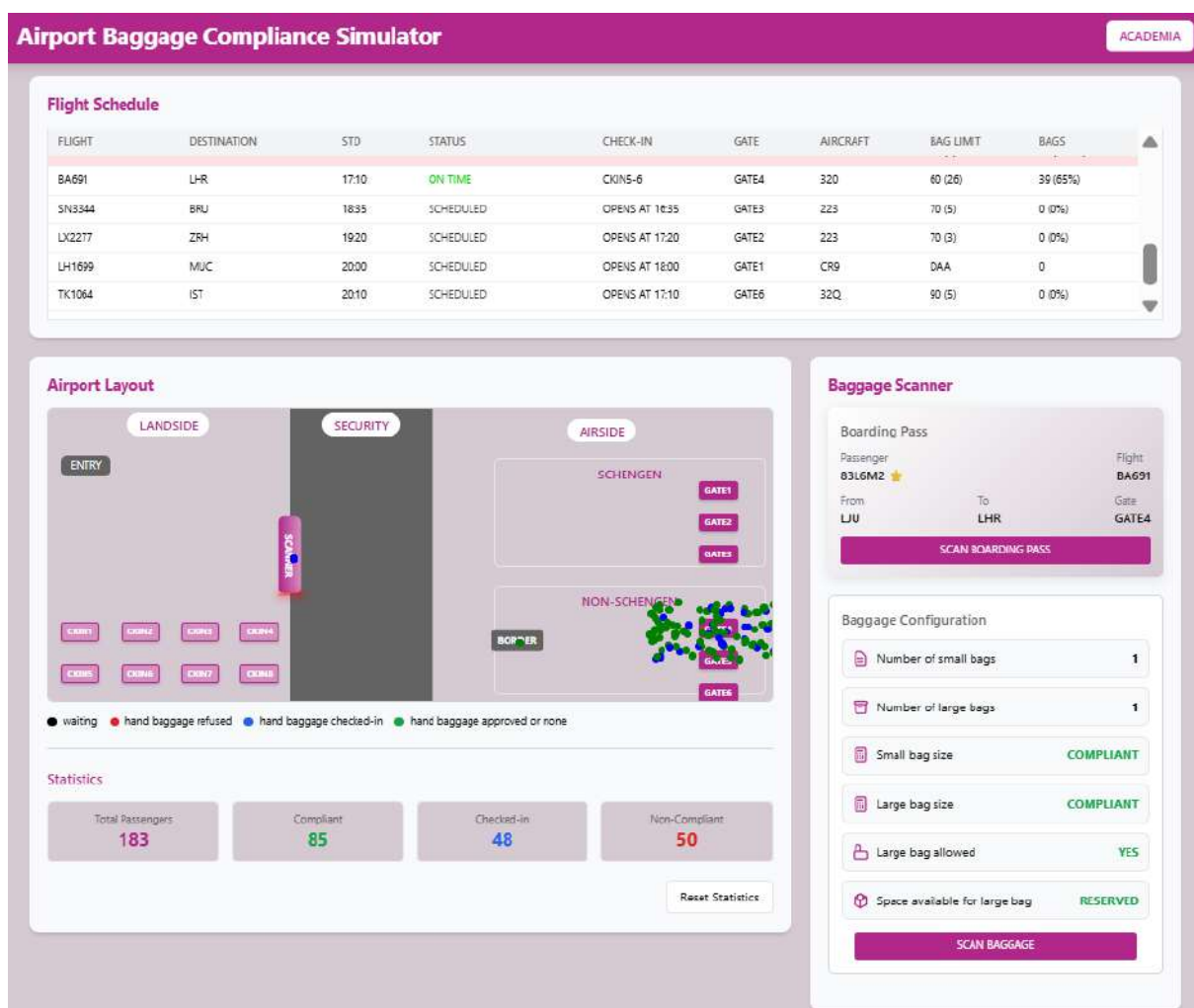
3.3.1.2 Uporabniški vmesnik (HTML, CSS in javascript)

Uporabniški vmesnik simulatorja je razvit z uporabo standardnih spletnih tehnologij: HTML za strukturo vsebine, CSS za stiliziranje in javascript za interaktivnost in dinamično posodabljanje. Za hitro in učinkovito oblikovanje je bilo uporabljeno ogrodje Tailwind CSS, ki omogoča prilagodljiv in odziven dizajn z uporabo preddefiniranih razredov. Osnovna struktura in postavitev vmesnika sta bili prototipirani z orodjem Canva AI, kar je bistveno pospešilo fazo oblikovanja in zagotovilo vizualno skladen in estetski videz. Ta pristop je omogočil osredotočenje na implementacijo kompleksne simulacijske logike, medtem ko je oblikovanje uporabniškega vmesnika potekalo hitro in učinkovito.



Slika 11: Končna iteracija prototipa v Canva AI

Vir: (Lastni vir)



Slika 12: Končna vizualna postavitev

Vir: (Lastni vir)

3.3.1.3 Podatkovne datoteke (CSV)

Vsi vhodni podatki za simulacijo so shranjeni v datotekah CSV (na primer `departure.csv`, `passenger.csv`, `aircraft.csv`, `arrival.csv`, `airline.csv`, `airport.csv`). Ta format omogoča enostavno manipulacijo in branje podatkov z uporabo knjižnice Pandas v pythonu. Izmišljeni podatki v datotekah CSV posnemajo strukturo in obseg realnih letaliških operativnih baz (AODB in DCS), kar zagotavlja realistično simulacijsko okolje brez uporabe občutljivih podatkov.

3.3.1.4 Druge knjižnice in orodja

Poleg zgoraj naštetih so bile uporabljene tudi druge pythonove knjižnice za specifične naloge, kot so obdelava datumov in časa ter orodja za razvoj in testiranje. Excel je bil uporabljen za generiranje, urejanje in pregled simulacijskih podatkov, kar je omogočilo enostavno pripravo in validacijo vhodnih podatkov brez potrebe po programiranju.

3.3.2 *Struktura prototipa*

Prototip je razdeljen na dva glavna dela – logični modul ter grafični prikaz in izpis informacij.

Logični del (`app.py`):

- bere podatke iz datotek `.csv` in jih pretvori v interni model potnikov,
- izračuna pot posameznega potnika na osnovi atributov, kot so ciljna destinacija, skladnost prtljage in status leta,
- spremlja čas in glede na časovne meje (`CKIN_OPEN`, `BOARD_START`) določi prikaz in skrivanje potnikov.

Vizualni del (`index.html`):

- prikazuje simuliran terminal, kjer se potniki prikazujejo kot barvne točke,
- prikazuje tabelo letov s primeri zajemanja podatkov,
- prikazuje podatke o potniku ter ustreznosti njegove prtljage,
- animacije fade-in in fade-out ponazarjajo prihod in vkrcavanje.

3.3.2.1 Paketna in mapna organizacija

Mapa projekta je organizirana na naslednji način:

- `app.py`: glavna datoteka, ki vsebuje aplikacijo Flask z vso backend logiko, obdelavo podatkov iz CSV-datotek in definicijo API-poti za komunikacijo s frontendom,
- `index.html`: datoteka, ki definira strukturo in vsebino uporabniškega vmesnika (frontenda), to je glavna HTML-stran, ki jo aplikacija Flask servira uporabniku,

- `templates/`: mapa, kjer so predloge HTML, ki jih Flask uporablja za prikazovanje spletnih strani (v tem primeru je to `index.html`),
- `*.csv` datoteke: vsebujejo simulacijske podatke (npr. `departure.csv`, `passenger.csv`), ki jih `app.py` prebere ob zagonu.

Ta organizacija omogoča jasno ločitev med strežniško logiko in kodo uporabniškega vmesnika, kar sledi dobrim praksam spletnega razvoja.

3.3.2.2 Povezanost komponent (backend in frontend)

Komunikacija med komponentami poteka na naslednji način:

1. **zagon aplikacije:** ko uporabnik zažene aplikacijo Flask (`app.py`), se ta zažene na lokalnem strežniku (na primer `http://127.0.0.1:5000`),
2. **prikaz uporabniškega vmesnika:** Flask servira `index.html` v spletni brskalnik uporabnika,
3. **obdelava podatkov na backendu:** Flask sprejme zahteve, obdela podatke (npr. filtrira potnike glede na čas, izračuna status letov, preveri skladnost prtljage) in pripravi odgovor,
4. **posodabljanje vmesnika:** backend vrne podatke v formatu JSON – javascript na frontendu prejme te podatke in dinamično posodobi prikaz na strani (na primer premakne potnike, osveži status letov, prikaže podrobnosti skeniranja prtljage).

Ta arhitektura omogoča realnočasovno simulacijo in interakcijo, saj se podatki neprestano izmenjujejo med strežnikom in odjemalcem.

3.3.3 Logika delovanja simulatorja

Simulator je zasnovan za simulacijo potniških tokov in upravljanja prtljage na manjšem letališču v realnem času in temelji na vnaprej definiranih podatkih in logičnih pravilih. Njegova glavna funkcionalnost je vizualizacija premikanja potnikov ter prikaz statusov letov in prtljage glede na simulirani čas.

3.3.3.1 Arhitektura in tok podatkov

Centralna komponenta simulatorja je aplikacija Flask (app.py), ki služi kot backend. Ta aplikacija ob zagonu prebere vse potrebne podatke iz datotek CSV:

- `departure.csv`: podatki o odhodnih letih, vključno z načrtovanimi časi, dodeljenimi okenci za prijavo (CKIN) in izhodi (GATE) ter informacijami o odprtju in zaprtju prijave ter vkrcavanja,
- `passenger.csv`: podatki o posameznih potnikih, vključno z njihovimi identifikatorji (PNR), številkami letov, informacijami o ročni prtljagi (število kosov, skladnost z merami), kabini in statusu zvestobe,
- `aircraft.csv`: metapodatki o letalih, predvsem o zmogljivosti kabine za ročno prtljago (CAPACITY_HBAG),
- `arrival.csv`: podatki o prihodih letal, ki se uporabijo za določanje statusa odhodnih letov (na primer zamude, ki so posledica poznega prihoda letala),
- `airline.csv`, `airport.csv`: dodatni metapodatki o letalskih prevoznikih in letališčih.

Po branju se podatki shranijo v Pandas DataFrames znotraj aplikacije Flask, kar omogoča učinkovito obdelavo in filtriranje. Uporabniški vmesnik (index.html) komunicira s to backend logiko preko Flask API-poti (/flights_now, /data, /set_time itd.).

3.3.3.2 Osnovni cikel delovanja

1. Prikaz statusa letov (/flights_now):

- Flask aplikacija periodično (vsakih 5 sekund) pridobi trenutne podatke o letih,
- za vsak let se na osnovi trenutnega simulacijskega časa in podatkov iz `departure.csv` in `arrival.csv` izračuna njegov status (npr. "SCHEDULED", "ON TIME", "DELAYED", "BOARDING", "DEPARTED", "CLOSED"),
- izračunata se tudi število skeniranih velikih torb v kabini letala (`bags_scanned`) in odstotek zasedenosti glede na zmogljivost letala (`aircraft_quota`) posebna logika

velja za lete s postopkom DAA (Delivery At Aircraft), ki imajo praktično neomejeno zmogljivost,

- podatki se vrnejo v frontend in posodobijo tabelo "Flight Schedule".

2. Prikaz potnikov (/data):

- backend filtrira potnike iz `passenger_df`, ki pripadajo letom, katerih prijava na let (check-in) je trenutno odprta ali je let v fazi vkrcavanja,
- za vsakega aktivnega potnika se izračuna njegova pot skozi letališče (npr. ENTRY -> SECURITY -> BORDER_CONTROL -> GATE) – ta pot se določi glede na to, ali gre za schengenski ali neschengenski let,
- izračuna se tudi status ročne prtljage (HBAG_STATUS), ki upošteva velikost, težo, dovoljenja letalske družbe in razpoložljivost prostora v kabini – vključen je tudi status SPACE_AVAILABLE_STATUS, ki sporoča, ali je za potnikovo veliko torbo prostor v kabini (YES, NO, RESERVED, NO BAG) – pri tem se upošteva tudi prednostni status potnikov (poslovni razred, visok status zvestobe), za katere je prostor v kabini "RESERVED",
- frontend prejme te podatke in prikaže potnike kot animirane kroge na tlorisu letališča – barva kroga (črna, rdeča, modra, zelena) označuje njihov trenutni status (čakajo, prtljaga zavrnjena, prtljaga oddana/odobrena, odobren prehod varnostne kontrole).

3. Simulacija skeniranja prtljage:

- potniki se premikajo proti "SCANNER" – ko potnik doseže to točko, se ustavi in vstopi v "čakalno vrsto" za skeniranje,
- sistem preveri status prtljage potnika (HBAG_STATUS),
- če prtljaga ni skladna (»HBAG NOT OK« ali »HBAG OK *but* no cabin space«) in potnik še ni bil preusmerjen, se ga preusmeri na prijavno okence (CKIN pulti), kjer odda prtljago – potnik postane "modra pika" (simulacija oddane prtljage) in se vrne na varnostno kontrolo,
- če je prtljaga skladna (»HBAG OK« ali »NO BAG«) ali če je potnik že oddal prtljago, se mu omogoči prehod naprej in števec skeniranih torb za določen let se poveča (če ima potnik veliko torbo, ki je sedaj oddana/pregledana) – potnik nato nadaljuje pot proti izhodu.

4. Animacije in statistika:

- potniki se premikajo po določeni poti (na primer ENTRY → SECURITY → BORDER → GATE) z animacijami, ki posnemajo hojo,
- ko se čas vkrcavanja zaključi, se potniki postopoma umaknejo iz simulacije (fade-out animacija),
- statistika o skupnem številu potnikov, skladnih in neskladnih prtljagah ter oddanih torbah se posodablja v realnem času.

Ta logika omogoča celovito simulacijo letaliških procesov, s poudarkom na interakciji potnikov s sistemi za upravljanje prtljage in z vizualizacijo posledic različnih scenarijev.

3.3.4 Povezava s podatkovnim modelom

Simulator neposredno bere strukturirane podatke iz:

- `passenger.csv` (PNR, compliance, flight, IATA),
- `departure.csv` (časovnice, GATE, PRIORITY_HBAG),
- `arrival.csv` (čas prihoda, ATD),
- `airline.csv`, `airport.csv`, `aircraft.csv` (atributi, relacije, metapodatki).

Povezave med entitetami sledijo relacijskemu modelu, kar omogoča povezano logiko delovanja, podobno kot v realnih sistemih AODB/DCS. Sistem zagotavlja, da se vsak potnik obravnava v kontekstu letalske družbe, letališkega območja, razpoložljive kvote in trenutnega statusa.

3.4 Testiranje

Testiranje je ključen korak v življenjskem ciklu razvoja programske opreme, saj zagotavlja, da sistem deluje v skladu z zastavljenimi zahtevami in s pričakovanji. Pri testiranju prototipa simulatorja smo se osredotočili na preverjanje funkcionalnosti vseh ključnih modulov in interakcij s poudarkom na natančnosti prikaza podatkov in logiki obnašanja sistema v različnih scenarijih.

Testiranje je potekalo interaktivno, vzporedno z razvojem prototipa, kar je omogočilo hitro odkrivanje in odpravljanje napak. Osredotočilo se je na preverjanje treh glavnih območij uporabniškega vmesnika in njihove interakcije z backendom:

- v območju *Flight Schedule* smo preverjali pravilno prikazovanje informacij o letu, vključno s statusi leta, prijave na let in vkrcavanja ter z omejitvami in zasedenostjo prostora za ročno prtljago,
- v območju *Airport Layout* smo preverjali vizualne simulacije premikanja potnikov skozi terminal, vključno z njihovim pojavljanjem, s spreminjanjem barv glede na status prtljage, preusmeritvami na oddajo prtljage in postopnim izginjanjem ob zaključku vkrcavanja,
- v območju *Baggage Scanner* smo preverjali funkcionalnosti skenerja prtljage, vključno s pravilnim prikazom podatkov o potniku in prtljagi ter z logiko odločanja o skladnosti ročne prtljage in razpoložljivosti prostora v kabini.

3.4.1.1 Testiranje v območju *Flight Schedule*

Tabela 8: Testiranje območja *Flight Schedule* z dodanim pojasnilom obnašanja sistema

TESTIRANJE	DA/NE
Podatki o letu se pravilno prenesejo iz <code>departure.csv</code> (za stolpce FLIGHT iz FLIGHT_N_DEP, DESTINATION iz AIRPORT_IATA, STD iz STD_DEP, CHECK-IN iz CKIN, GATE iz GATE, AIRCRAFT iz AIRCRAFT_IATA).	DA
Če letalo v prihodu še ni poletelo, se v stolpcu STATUS izpiše SCHEDULED. <i>Sistem v <code>departure.csv</code> preveri registrsko številko letala (REG), jo poišče v <code>arrival.csv</code> in preveri, če je <code>ARD_ARR</code> (dejanski čas odhoda) prihodnega leta že mimo. Če še ni, odhodni let dobi status SCHEDULED.</i>	DA
Če je letalo v prihodu poletelo in se predvideva točen odhod, se v stolpcu STATUS izpiše ON TIME, besedilo se obarva zeleno. <i>Če ima let v <code>arrival.csv</code> <code>ATD_ARR</code> pred trenutnim časom in je <code>ETA_DEP</code> v <code>departure.csv</code> enak <code>STD_DEP</code>, odhodni let dobi status ON TIME.</i>	DA
Če je letalo v prihodu poletelo in se predvideva zamuda, se v stolpcu STATUS izpiše DELAYED TO HH:MM, besedilo se obarva oranžno.	DA

Če ima let v <code>arrival.csv</code> <code>ATD_ARR</code> pred trenutnim časom in je <code>ETA_DEP</code> v <code>departure.csv</code> poznejši od <code>STD_DEP</code> , odhodni let dobi status <i>DELAYED TO HH:MM</i> .	
Če poteka vkrcavanje, se v stolpcu <code>STATUS</code> izpiše <code>BOARDING</code> , besedilo se obarva modro. Če je trenutni čas med <code>BOARD_START</code> in <code>BOARD_END</code> v <code>departure.csv</code> , let dobi status <i>BOARDING</i> .	DA
Če je letalo odletelo, se v stolpcu <code>STATUS</code> izpiše <code>DEPARTED</code> , besedilo se obarva sivo. Če je trenutni čas enak ali poznejši od <code>ETD_DEP</code> (ali <code>STD_DEP</code> , če <code>ETD_DEP</code> ni definiran) v <code>departure.csv</code> , let dobi status <i>DEPARTED</i> .	DA
Če poteka prijava na let, se v stolpcu <code>CHECK-IN</code> izpišejo številke okenc. Če je trenutni čas med <code>CKIN_OPEN</code> in <code>CKIN_CLOSED</code> v <code>departure.csv</code> , se prikaže oznaka območja prijave na let (na primer <i>CKIN1</i> ali <i>CKIN1-2</i>).	DA
Če je prijava na let zaključena, se v stolpcu <code>CHECK-IN</code> izpiše <code>CLOSED</code> . Če je trenutni čas po <code>CKIN_CLOSED</code> v <code>departure.csv</code> , bo status <i>CLOSED</i> .	DA
Če se prijava na let še ni začela, se v stolpcu <code>CHECK-IN</code> izpiše <code>OPENS AT HH:MM</code> . Če je trenutni čas pred <code>CKIN_OPEN</code> v <code>departure.csv</code> , bo status <i>OPENS AT HH:MM</i> (kjer <i>HH:MM</i> predstavlja <code>CKIN_OPEN</code>).	DA
Če se vkrcavanje še ni začelo ali trenutno poteka, se v stolpcu <code>GATE</code> izpiše številka izhoda. Če je trenutni čas pred <code>BOARD_END</code> v <code>departure.csv</code> , bo prikazana številka izhoda (na primer <i>GATE1</i>).	DA
Če je vkrcavanje zaključeno, se v stolpcu <code>GATE</code> izpiše <code>CLOSED</code> . Če je trenutni čas enak ali poznejši od <code>BOARD_END</code> v <code>departure.csv</code> , bo status vkrcavanja <i>CLOSED</i> .	DA
V stolpcu <code>BAG LIMIT</code> se podatek o kvoti pravilno prenese iz <code>aircraft.csv</code> . Vrednost <code>CAPACITY_HBAG</code> iz <code>aircraft.csv</code> za ustrezno <code>AIRCRAFT_IATA</code> .	DA
V stolpcu <code>BAG LIMIT</code> se v oklepaju izpiše število potnikov, za katere je prostor za večji kos ročne prtljage v kabini rezerviran.	DA

<i>Seštevek potnikov, ki imajo v passenger.csv CABIN=BUSINESS in/ali HIGH_STATUS=TRUE.</i>	
V stolpcu BAG LIMIT se pri postopku DAA namesto številke izpiše DAA. <i>Če je CAPACITY_HBAG za določeno letalo 1000, se namesto številke izpiše »DAA«.</i>	DA
V stolpcu BAGS se izpisuje število ustreznih velikih ročnih prtljag, ki jih je SCANNER odobril. Če je kvota dosežena, se vrstica leta obarva rdeče. <i>Tekoče število velikih kosov ročne prtljage, ki jih je skener odobril – potnik mora v passenger.csv imeti LARGE_BAG=1 in LARGE_COMPLIANCE=TRUE, obenem pa kvota ne sme biti zapolnjena.</i> <i>Če je status leta DEPARTED, se izpiše skupno število velikih ročnih prtljag, ki so skladne in dovoljene. To število je omejeno s CAPACITY_HBAG letala (če ni DAA) in predstavlja teoretično maksimalno število, ki bi šlo v kabino.</i>	DA
V stolpcu BAGS se v oklepaju izpisuje odstotek zasedenosti kvote. <i>Odstotek zasedenosti se preračuna glede na CAPACITY_HBAG, zaokroženo na celo število.</i>	DA

Vir: (Lastni vir)

3.4.1.2 Testiranje v območju *Airport Layout*

Tabela 8: Testiranje območja *Airport Layout* z dodanim pojasnilom obnašanja sistema

TESTIRANJE	DA/NE
Črna pika (potnik) se na ENTRY pojavi, ko je odprta prijava na let za njegov let. <i>Če je za potnikov let trenutni čas v departure.csv med CKIN_OPEN in CKIN_CLOSED, se potnik pojavi na točki ENTRY.</i>	DA
Če je potnikova prtljaga skladna in dovoljena, se pika na SCANNER prebarva v zeleno, potnik nadaljuje pot do GATE, kjer počaka v bližini. <i>Sistem preveri HBAG_STATUS potnika – če je »HBAG OK« (torej velja SMALL_COMPLIANCE=TRUE, LARGE_COMPLIANCE=TRUE, LARGE_BAG_ALLOW=TRUE in SPACE_AVAILABLE_STATUS za velike kose ročne</i>	DA

<i>prtljage je »YES« ali »RESERVED«). Če je, se pika prebarva v zeleno in tako ostane celo pot naprej.</i>	
Če potnikova prtljaga ni skladna in/ali dovoljena, se pika na SCANNER prebarva v rdečo. Potnik mora na CKIN oddati prtljago, kjer se pika prebarva v modro. Nato se vrne na SCANNER in nadaljuje pot do GATE, kjer počaka v bližini. <i>Sistem preveri HBAG_STATUS potnika – če je »HBAG NOT OK« ali »HBAG OK *but* no cabin space«, se pika prebarva v rdečo. Preusmeri se na ustrezno CKIN območje, kot je določeno v CKIN_AREA za njegov let. Po »oddaji prtljage« se pika prebarva v modro in tako ostane celo pot naprej.</i>	DA
Potnik, ki potuje na schengensko destinacijo, gre lahko samo do izhodov, ki so v schengenskem območju. <i>Če v številki leta FLIGHT_N_DEP prvi dve črki, ki označujeta prevoznika, nista med nonschengen_airlines, se let šteje za schengenski let.</i>	DA
Potnik, ki potuje na neschengensko destinacijo, mora čez BORDER (mejno kontrolo) do izhodov, ki so v neschengenskem območju. <i>Če v številki leta FLIGHT_N_DEP prvi dve črki, ki označujeta prevoznika, sta med nonschengen_airlines, se let šteje za neschengenski let.</i>	DA
Pike (potniki) iz izhodov izginjajo, ko poteka vkrcavanje. <i>Če je trenutni čas med BOARD_START in BOARD_END, zelene in modre pike, ki predstavljajo potnike na tem letu, postopoma bledijo (fade-out). Do BOARD_END se vse pike »vkrcajo«.</i>	DA

Vir: (Lastni vir)

3.4.1.3 Testiranje v območju *Baggage Scanner*

Tabela 9: Testiranje območja *Baggage Scanner* z dodanim pojasnilom obnašanja sistema

TESTIRANJE	DA/NE
Podatki o potniku se pravilno prenesejo iz <i>passenger.csv</i> : izpiše se PNR (namesto priimka in imena) in, če ima potnik nadaljevalni let, končna destinacija (v oklepaju poleg destinacije leta).	DA

<i>V polju »Passenger« (id="bp-pnr") se ob prihodu na SCANNER prikaže vrednost PNR iz passenger.csv (na primer "P001").</i> <i>Če ima potnik v passenger.csv določeno FINAL_DESTINATION_IATA, se bo ta prikazala v oklepaju poleg destinacije glavnega leta v polju »To« (id="bp-destination").</i>	
Podatki o potniku se pravilno povežejo s podatki iz departure.csv: izpišejo se FLIGHT [...] iz FLIGHT_N_DEP, TO [destinacija leta] iz AIRPORT_IATA, GATE [...] iz GATE. <i>V polju "Flight" (id="bp-flight") se bo prikazala številka leta (FLIGHT_N_DEP) iz departure.csv, ki je povezana s potnikom.</i> <i>V polju "To" (id="bp-destination") se bo prikazala destinacija leta (AIRPORT_IATA) iz departure.csv, ki je povezana s potnikom.</i> <i>V polju "Gate" (id="bp-gate") se bo prikazala številka izhoda (GATE) iz departure.csv, ki je povezana s potnikom.</i>	DA
Če mora biti prostor za potnikovo veliko ročno prtljago rezerviran, se poleg PNR izpiše zvezdica. <i>Če je potnik STAR_PASSENGER, torej velja CABIN=BUSINESS ali HIGH_STATUS=TRUE, se izpiše zvezdica.</i>	DA
V poljih »Number of small bags« in »Number of large bags« se štejejo kosi ročne prtljage, ki jo ima potnik s seboj. <i>V polju »Number of small bags« se prikaže »1«, če ima potnik SMALL_BAG=1 v passenger.csv. Sicer se izpiše »0«.</i> <i>V polju »Number of large bags« se prikaže »1«, če ima potnik LARGE_BAG=1 v passenger.csv. Sicer se izpiše »0«.</i>	DA
V poljih »Large bag size« in »Small bag size« se preverja ustreznost ročne prtljage. <i>V polju »Small bag size« se prikaže zeleno besedilo »COMPLIANT«, če ima potnik SMALL_COMPLIANCE=TRUE v passenger.csv. Če je SMALL_COMPLIANCE=FALSE, se prikaže rdeče besedilo »OVERSIZED«. Če potnik nima male ročne prtljage, se prikaže črno besedilo »NO BAG«</i>	DA

V polju »Large bag size« se prikaže zeleno besedilo »COMPLIANT«, če ima potnik <code>LARGE_COMPLIANCE=TRUE</code> v <code>passenger.csv</code>. Če je <code>LARGE_COMPLIANCE=FALSE</code>, se prikaže rdeče besedilo »OVERSIZED«. Če potnik nima velike ročne prtljage, se prikaže črno besedilo »NO BAG«	
V polju »Large bag allowed« se preverja, ali potnikova vozovnica dovoljuje večji kos ročne prtljage. Če je <code>LARGE_BAG_ALLOW=TRUE</code> v <code>passenger.csv</code>, se v polju »Large bag allowed« prikaže zeleno besedilo »YES«. Če je <code>LARGE_BAG_ALLOW=FALSE</code>, se prikaže rdeče besedilo »NO«.	DA
V polju »Space available for large bag« se preverja, ali za potnikovo veliko ročno prtljago je prostor v letalu. Ob upoštevanju <code>CAPACITY_HBAG</code> iz <code>aircraft.csv</code> in števila že skeniranih velikih prtljag (<code>bags_scanned</code>) se prikaže: zeleno besedilo »RESERVED«, če je potnik <code>STAR_PASSENGER</code> in je prostor zanj rezerviran; zeleno besedilo »YES«, če je prostor na voljo za ostale potnike; rdeče besedilo »NO«, če prostora v kabini ni več (kvota je zapolnjena); črno besedilo »DAA«, če za ta let velja postopek DAA in ni omejitve prtljage; črno besedilo »NO BAG«, če potnik nima velike ročne prtljage. Ta status se dinamično posodablja glede na število že skeniranih prtljag na letu.	DA

Vir: (Lastni vir)

3.4.1.4 Testiranje v območju *Statistics*

Tabela 10: Testiranje območja *Statistics* z dodanim pojasnilom obnašanja sistema

TESTIRANJE	DA/NE
Polje »Total passengers« šteje vse potnike, ki so uspešno prešli skener. Števec se poveča ob uspešnem prehodu potnika skozi <code>processScannerQueue</code> kot zelena ali modra pika.	DA
Polje »Compliant« šteje vse potnike s »HBAG OK« in potnike, ki ročne prtljage nimajo. Števec se poveča, ko potnik, ki ni bil preusmerjen na oddajo prtljage, uspešno preide skener in postane zelena pika.	DA

Polje »Checked-in« šteje vse male in velike ročne prtljage, ki so morale biti oddane zaradi statusa »HBAG NOT OK« ali »HBAG OK *but* no space in cabin«. <i>Števec se poveča, ko potnik uspešno zaključi proces na CKIN in postane modra pika.</i> <i>Števec se poveča, ko potnik na skenerju postane rdeča pika in je preusmerjen na oddajo prtljage.</i> <i>Števec se poveča za +1 za vsak kos manjše ročne prtljage, če velja <code>has_small_bag = TRUE</code> in <code>small_compliant = false</code>.</i> <i>Števec se poveča za +1 za vsak kos večje ročne prtljage, če je njegova prtljaga neskladna (<code>has_large_bag = TRUE</code> in <code>large_compliant = false</code>) ali ni bila dovoljena (<code>large_bag_allowed = FALSE</code>) ali ni bilo prostora v kabini (<code>space_available_status</code> je »NO«).</i>	DA
Polje »Non-Compliant« šteje vse male in velike ročne prtljage, ki so povzročile status »HBAG NOT OK«. <i>Števec se poveča, ko potnik na skenerju postane rdeča pika in je preusmerjen na oddajo prtljage.</i> <i>Števec se poveča za +1 za vsak kos manjše ročne prtljage, če velja <code>has_small_bag = TRUE</code> in <code>small_compliant = false</code>.</i> <i>Števec se poveča za +1 za vsak kos večje ročne prtljage, če je njegova prtljaga neskladna (<code>has_large_bag = TRUE</code> in <code>large_compliant = false</code>) ali ni bila dovoljena (<code>large_bag_allowed = FALSE</code>).</i>	DA
Število v polju »Checked-in« mora biti enako ali večje od števila »Non-Compliant«.	DA

Vir: (Lastni vir)

3.4.2 Testiranje mejnih primerov

Preverili smo obnašanje sistema v ekstremnih in manj pogostih, a možnih scenarijih.

Ustvarili smo tri testne lete – DD001, DD002, DD003.

Flight Schedule								
FLIGHT	DESTINATION	STD	STATUS	CHECK-IN	GATE	AIRCRAFT	BAG LIMIT	BAGS
LH1099	MUC	20:00	SCHEDULED	CKIN 7-8	GATE1	CRJ	100	0
TK1064	IST	20:10	ON TIME	CKIN1-2	GATE6	32Q	90 (5)	1 (1%)
JU625	BEG	21:45	ON TIME	OPENS AT 19:45	GATE5	AT7	20 (0)	0 (0%)
DD001	AAA	21:00	ON TIME	CKIN1-2	GATE2	TEST	15 (0)	0 (0%)
DD002	BBB	22:00	SCHEDULED	CKIN3-4	GATE4	TEST	15 (0)	1 (7%)
DD003	CCC	23:00	SCHEDULED	CKIN5-6	GATE6	TEST	15 (0)	0 (0%)

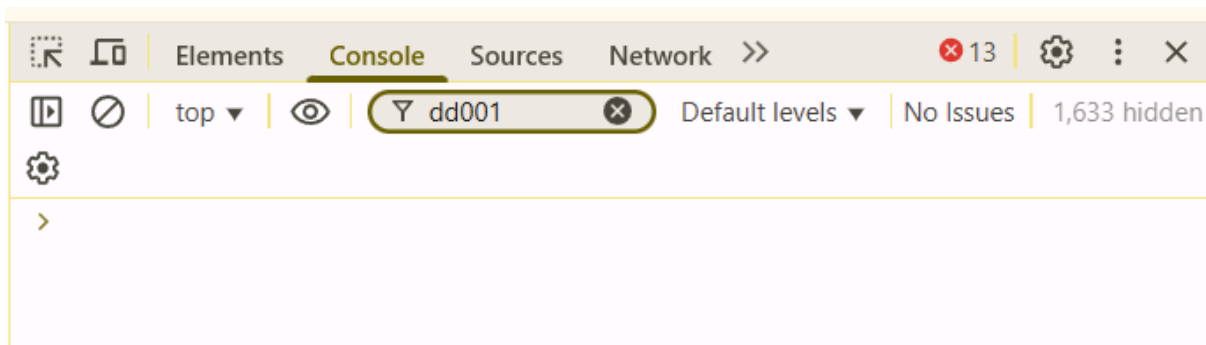
Slika 13: Prikaz testnih letov DD001, DD002 in DD003

Vir: (Lastni vir)

Test 1: let brez potnikov

Podatki o letu: let DD001, tip letala TEST, sedežev v letalu 30, potnikov na letu 0.

Rezultat: V razvijalski konzoli (»F12 console«) ni izpisov tipa "Potnik [PNR] za let [FLIGHT] se je pojavil ..." ali kakršnih koli drugih izpisov – test je uspešen.



Slika 14: Rezultat mejnega testa 1 za let DD001

Vir: (Lastni vir)

Test 2: popolnoma zaseden let, na katerem imajo vsi potniki skladno prtljago

Podatki o letu: let DD002, tip letala TEST, sedežev v letalu 30, potnikov na letu 30.

Rezultat: 15 ročnih prtljag gre uspešno čez skener, ostalih 15 je oddanih – test je uspešen.

Flight Schedule								
FLIGHT	DESTINATION	STD	STATUS	CHECK-IN	GATE	AIRCRAFT	BAG LIMIT	BAGS
LH1699	MUC	20:00	SCHEDULED	CKIN/-8	GATE1	CRJ	DAA	40
TK1064	IST	20:10	ON TIME	CKIN1-2	GATE6	32Q	90 (5)	23 (26%)
JU625	BEG	21:45	ON TIME	OPENS AT 19:45	GATE5	AT7	20 (0)	0 (0%)
DD001	AAA	21:00	ON TIME	CKIN1-2	GATE2	TEST	15 (0)	0 (0%)
DD002	BBB	22:00	SCHEDULED	CKIN3-4	GATE4	TEST	15 (0)	15 (100%)
DD003	CCC	23:00	SCHEDULED	CKIN5-6	GATE6	TEST	15 (0)	0 (0%)

Slika 15: Dosežena kvota pri mejnem testu 2 za let DD002

Vir: (Lastni vir)

```

DEBUG: Backend: Povečanje števila velikih torb za let DD002 (.index):1004
(odobreno skeniranje):
  {message: 'Število velikih torb povečano.', status: 'success'}

DEBUG: Backend: Povečanje števila velikih torb za let DD002 (.index):1004
(odobreno skeniranje):
  {message: 'Letalo je polno, ni več prostora za ročno prtljago.', statu
s: 'error'}

DEBUG: Backend: Zmanjšanje števila velikih torb za let DD002 (.index):945
(preusmeritev):
  {message: 'Število velikih torb zmanjšano.', status: 'success'}

```

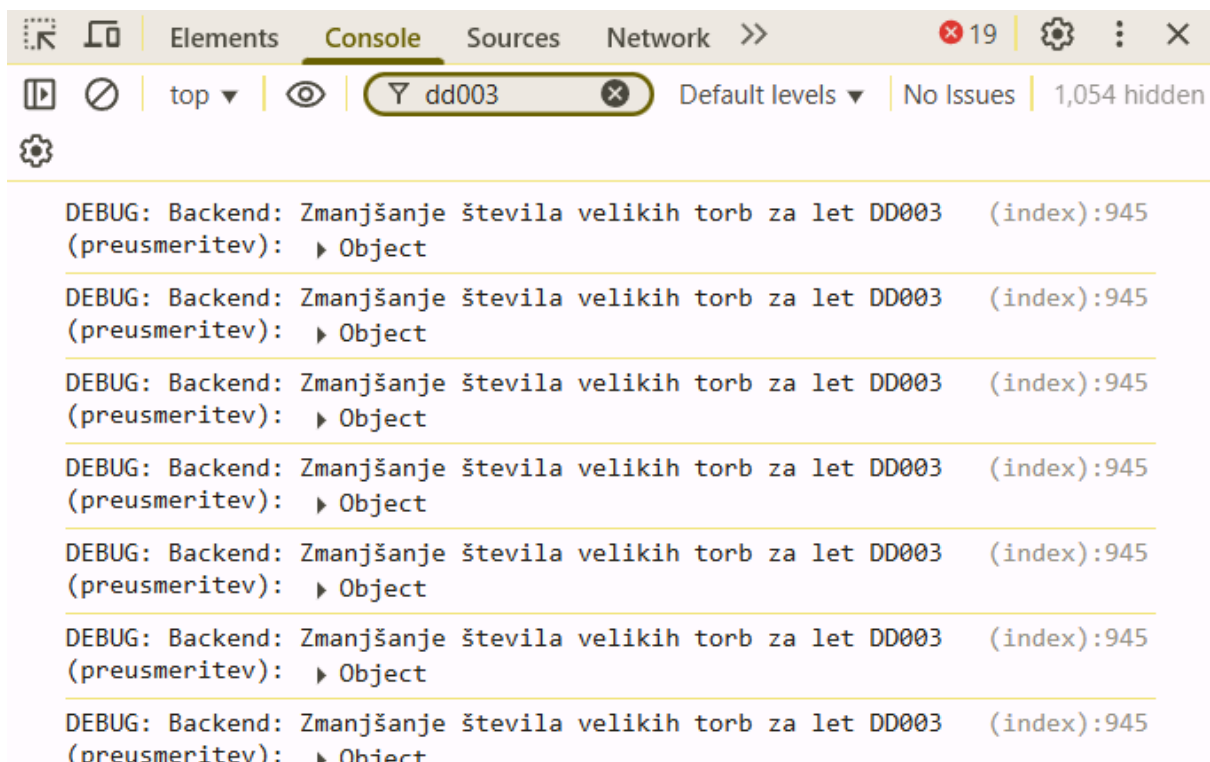
Slika 16: Skeniranje zadnje odobrene in prve neodobrene ročne prtljage na testnem letu DD002

Vir: (Lastni vir)

Test 3: popolnoma zaseden let, na katerem imajo vsi potniki neskladno prtljago

Podatki o letu: let DD003, tip letala TEST, sedežev v letalu 30, potnikov na letu 30.

Rezultat: Nobena neskladna prtljaga ne gre čez skener, vse prtljage so oddane – test je uspešen.



Slika 17: Zavračanje neustrezne ročne prtljage na testnem letu DD003

Vir: (Lastni vir)

3.4.3 Odstranjene funkcionalnosti zaradi neuspešnega testiranja

Med razvojem in testiranjem simulatorja so bile nekatere funkcionalnosti in elementi, ki so bili sprva predvideni, bodisi odstranjeni bodisi poenostavljeni, saj niso delovali pravilno ali so povzročali prekomerne težave pri implementaciji in stabilnosti.

Glavna odstranjena funkcionalnost je bila napredna časovna kontrola in simulacija pretoka časa. Prvotna zasnova je vključevala drsnik in gumbe za pospeševanje, upočasnjevanje, zaustavitev ali nastavljanje specifičnega časa simulacije. To bi omogočalo opazovanje delovanja simulatorja v različnih časovnih obdobjih brez čakanja na realni čas. Implementacija te funkcionalnosti je povzročala pogoste napake, neskladja med stanjem frontenda in backenda ter težave pri usklajevanju dogodkov z dinamično spreminjajočim se simulacijskim časom. Poleg tega bi zahtevala kompleksnejšo logiko za shranjevanje in ponastavitev vseh časovno odvisnih stanj.

Poleg tega je bila prvotna ideja vključiti tudi selektivno obravnavo ročne prtljage za potnike brez rezervacije za prostor za večjo ročno prtljago v kabini – na osnovi destinacije njihovega

nadaljevalnega leta. Želeli smo dati prednost potnikom z nadaljevalnimi leti zunaj Evrope (ICAO-koda letališča se začne z E, L ali B), saj bi morebitna izguba prtljage pri takih potnikih povzročila večje logistične težave in stroške. Vendar se je izkazalo, da je implementacija te logike preveč kompleksna – je pa pri prikazu informacij o potniku ostal prikaz letališča končne destinacije v oklepaju poleg destinacije prvega leta.

Zato je bila funkcionalnost zamenjana z enostavnejšim pristopom, kjer simulator vedno deluje v realnem času glede na sistemski čas strežnika, z rednimi petsekundnimi osvežitvami podatkov. Kompromis je šel v smer zagotovitve stabilnosti in zanesljivosti simulacije ter zaključka diplomskega dela do roka. Da smo lahko zagotovili, da je v vsakem trenutku vsaj en let aktiven, so bili prilagojeni časi letov.

4 SKLEP

Povzetek ključnih ugotovitev

V diplomski raziskavi smo preučili in preverili hipoteze glede uporabe umetne inteligence za optimizacijo potniških tokov in hitrejšo vkrcavanje na mednarodnih letališčih. Ključne ugotovitve sledijo v nadaljevanju.

H1: Uporaba kombinacije umetne inteligence in beaconov za optimizacijo potniških tokov s potnikom prijazno navigacijo ter smiselnimi in pametnimi vizualnimi in glasovnimi obvestili izboljša verjetnost, da bodo potniki za vkrcanje ob pravem času na pravem mestu in bo vkrcavanje lahko potekalo v skladu z metodo, ki je za določen let predvidena kot najbolj optimalna.

Ugotovili smo, da ta hipoteza drži. Raziskava je pokazala, da je ključnega pomena zagotavljanje točnih, pravočasnih in kontekstualno relevantnih informacij potnikom prek digitalnih zaslonov. Z uporabo Dijkstrovega algoritma za izračun razdalje in časa hoje do izhodov ter integracijo beaconov za anonimno sledenje gibanju potnikov je mogoče potnikom v realnem času prikazati predvideno trajanje poti in razdaljo. To potnikom omogoča boljšo orientacijo, zmanjšuje njihov stres in zmedo ter jim pomaga pri odločitvi, ali resnično potrebujejo asistenco. Avtomatiziran prikaz statusov vkrcavanja, kot je zadnji poziv, na osnovi realnočasovnih podatkov iz DCS in AODB, prav tako prispeva k bolj gladkemu in manj stresnemu vkrcavanju, saj potnike vodi skozi realna pričakovanja glede časa. Implementacija teh rešitev zmanjšuje odvisnost od osebja in zagotavlja dosledno obveščanje.

H2: Uporaba kombinacije umetne inteligence in računalniškega vida pred varnostno kontrolo prepreči težave zaradi prevelike ročne prtljage ob vkrcavanju in zmanjša verjetnost, da bo treba presežek ročne prtljage zaradi omejitev kabine naknadno nalagati v prtljažnik. Ročna prtljaga je tudi varneje pregledana, osebje pri izhodu je deležno manj konfliktnih situacij, letalski prevozniki pa imajo zaradi bolj konsistentnega upoštevanja komercialnih pravil večji prihodek.

Tudi ta hipoteza drži. Razvoj prototipa simulatorja je potrdil, da lahko sistem z uporabo umetne inteligence in računalniškega vida učinkovito preverja skladnost ročne prtljage pred varnostnokontrolno točko. Sposobnost prepoznavanja dimenzij in količin prtljage ter primerjava s pravili prevoznika in podatki, ki se pridobijo iz AODB in DCS, omogočata

avtomatsko odločanje o tem, ali potnik lahko nadaljuje pot z ročno prtljago ali jo mora oddati. Avtomatiziran proces zmanjšuje tveganje za človeške napake, razbremenjuje osebe pri izhodu in zagotavlja bolj konsistentno upoštevanje komercialnih politik prevoznikov, kar posledično povečuje prihodke. Funkcionalnost prototipa, ki omogoča preusmeritev potnikov z neskladno prtljago do okenca za oddajo prtljage, prikazuje operativne učinkovitosti in zmanjšanje konfliktnih situacij pri izhodih.

H3: Implementacija umetne inteligence na majhnem letališču za napovedovanje čakalnih vrst pri prijavi na let, varnostni kontroli in (za neschengenske lete) mejni kontroli ter za napovedovanje predvidenega časa in razdalje med prijavo na let in izhodom v letalo zmanjša obremenitev zaposlenih v oskrbi potnikov (predvsem pri delu s starejšimi, ki želijo asistenco zaradi nerealnih pričakovanj o velikih razdaljah in dolgih čakalnih vrstah).

Ta hipoteza je bila prav tako potrjena. Kot je že bilo omenjeno pri H1, zmožnost sistema, da na osnovi Dijkstrovega algoritma in napovednega modela z umetno inteligenco izračuna in prikaže razdaljo ter predviden čas hoje do izhodov in skozi varnostne kontrole, znatno prispeva k zmanjšanju obremenitve zaposlenih. Posebej je to pomembno za manjša letališča, kjer lahko neracionalna raba kadra, ki izhaja iz prošenj za asistenco s strani potnikov, ki je dejansko ne potrebujejo, neposredno vpliva na tekoče izvajanje osnovnih procesov. Z natančnim obveščanjem o razdalji in času lahko potniki, vključno s starejšimi, sami bolje presodijo, ali asistenco resnično potrebujejo, to pa tudi sprosti vire za tiste, ki pomoč zares potrebujejo.

H4 – dodatna hipoteza – BTEC 2024 »Umetna inteligenca«: Uporaba umetne inteligence za optimizacijo in upravljanje potniških tokov na letališčih prispeva k povečanju zmogljivosti letališča za obdelavo potnikov, razbremenitvi osebja v oskrbi potnikov in bolj točnemu vkrcavanju, posledično pa tudi k večjemu zadovoljstvu potnikov.

Ugotovili smo, da hipoteza drži, vendar z določenimi omejitvami in poudarki. Celotna raziskava je pokazala, da umetna inteligenca na letališčih transformira reaktivno odpravljanje težav v proaktivno. Z analizo ogromnih količin realnočasovnih in preteklih podatkov umetna inteligenca omogoča prediktivne vpoglede in avtomatizirane odločitve, kar pripomore k boljšemu upravljanju potniških tokov, optimizaciji čakalnih vest, učinkovitejšim varnostnim pregledom in boljšemu upravljanju prtljage. Vsi ti elementi prispevajo k povečanju zmogljivosti letališč za obdelavo potnikov, brez potrebe po dragi fizični širitvi. Razbremenitev osebja je evidentna skozi avtomatizacijo obveščanja in preverjanja prtljage. Vendar pa je ključno poudariti, da je za polno uresničitev potenciala umetne inteligence nujna ustrezna

integracija sistemov, kar je na manjših letališčih še vedno izziv. Kljub temu simulacijski prototip dokazuje, da je mogoče tudi z omejenimi integracijami doseči merljive izboljšave, ki vodijo k večjemu zadovoljstvu potnikov in učinkovitejšim operacijam.

Na splošno uporaba umetne inteligence v kombinaciji z drugimi pametnimi tehnologijami, kot sta računalniški vid in BLE beacons, prinaša pomembne izboljšave v operativni učinkovitosti letališč, zmanjšanju zamud pri vkrcanju in poveča zadovoljstvo potnikov. Ključna sta premišljeno načrtovanje in implementacija rešitev, ki upoštevata specifične omejitve in potrebe posameznega letališča.

Prispevek raziskave

Raziskava prispeva k razumevanju, kako lahko sodobne rešitve umetne inteligence podprejo optimizacijo potniških tokov v kompleksnih okoljih, kot so letališča. Na splošni ravni diplomsko delo trenutno literaturo dopolnjuje z analizo možnosti integracije tehnologij računalniškega vida, sistemov beacon in napovednih modelov v realnočasovni obdelavi podatkov, s ciljem izboljšati uporabniško izkušnjo in operativno učinkovitost.

V praktičnem smislu raziskava predstavlja konkretno analizo potreb in izzivov manjšega evropskega letališča ter podaja smernice za učinkovito uvedbo tehnologij umetne inteligence znotraj infrastrukturnih omejitev. Poudarek je na izboljšanju pretočnosti potnikov pri vkrcavanju, zmanjšanju operativnih zamud, razbremenitvi osebja ter večji predvidljivosti procesov. Raziskava nakaže, kako lahko tudi manjša letališča s premišljeno uvedbo naprednih tehnologij dosežejo merljive izboljšave brez radikalnih investicij v fizično infrastrukturo.

Raziskava prispeva k boljšemu razumevanju digitalne preobrazbe v letalstvu, hkrati pa nudi konkretne usmeritve za nadaljnje raziskave in razvoj rešitev, usmerjenih v povečevanje učinkovitosti, razbremenitve osebja in zadovoljstva potnikov.

Priporočila za nadaljnje raziskave

Na osnovi izvedene raziskave se odpirajo številne možnosti za nadaljnjo poglobitev tematike na področju uporabe umetne inteligence v letaliških okoljih.

Raziskava dolgoročnega vpliva umetne inteligence na delovne procese osebja: Smiselno bi bilo analizirati, kako avtomatizacija in inteligentni sistemi vplivajo na strukturo delovnih mest ter kompetenčne potrebe v oskrbi potnikov.

Natančnejše modeliranje gibalnih vzorcev potnikov: Nadaljnje raziskave bi lahko vključile senzoriko in simulacije v realnem času za izboljšanje napovedi zastojev in boljše personalizacijo informacij za potnike.

Vpliv umetne inteligence na uporabniško izkušnjo različnih ciljnih skupin: Posebna pozornost bi lahko bila namenjena starejšim potnikom, osebam z omejeno mobilnostjo in potnikom, ki so prvič na določenem letališču, kjer lahko rešitve umetne inteligence bistveno izboljšajo orientacijo in občutek varnosti.

Raziskava razmerja med stroški uvedbe umetne inteligence in operativnimi prihranki: Nadaljnja analiza stroškovno-optimizacijskih učinkov je ključna za strateške odločitve manjših letališč z omejenimi sredstvi.

Povezanost umetne inteligence z obstoječimi sistemi in interoperabilnost: Predlagamo nadaljnje raziskave o poveztljivosti rešitev umetne inteligence z letališkimi informacijskimi sistemi (AODB, DCS, FIDS ...), pri čemer je ključno vprašanje standardizacija podatkov in varnosti.

Z nadaljnjimi raziskavami v teh smereh bi bilo mogoče še dodatno izkoristiti potencial umetne inteligence za povečanje učinkovitosti, prilagodljivosti in uporabnosti v različnih letaliških kontekstih –na velikih mednarodnih in na manjših regionalnih letališčih.

Misel za konec:

“Pri razvoju programske opreme se je treba zavedati, da ne ustvarjamo le produkta, ampak spreminjamo politiko, družbo in kulturo, kar pomeni, da je bolje, da politiko, družbo in kulturo tudi razumemo, obenem pa se zavedamo odgovornosti za to, kar počnemo.” (Harari, 2024, pogl. 6)

5 VIRI IN LITERATURA

- ACI Europe. (2023). *Guidelines for Passenger Services at European Airports*. Pridobljeno iz <https://www.aci-europe.org/downloads/resources/ACI%20EUROPE%20GUIDELINES%20FOR%20PASSENGER%20SERVICES%20AT%20EUROPEAN%20AIRPORTS.PDF>
- Aena. (2023). *5G Connectivity and IoT at Madrid-Barajas Airport*. Aena Innovation Report.
- AirHelp. (2023). *The economic impact of flight disruptions*. Pridobljeno iz <https://www.airhelp.com/en/blog/in-numbers-the-economic-impact-of-flight-disruptions/>
- AiRISTA Flow. (2025). *What is a Beacon? Understanding BLE Beacons*. Pridobljeno iz <https://www.airistaflow.com/resources/what-is-a-ble-beacon/>
- Airport Cooperative Research Program. (2015). *ACRP Report 128: Alternative IT Delivery Methods and Best Practices for Small Airports*. Transportation Research Board. Pridobljeno iz https://crp.trd.org/acrp0715/wp-content/themes/acrp-child/documents/016/original/acrp_128_alternative_it_delivery_methods_and_best_practices_for_small_airports.pdf
- AIScreen. (2023). *The Basics of FIDS: Features, Capabilities, and Uses*. Pridobljeno iz AIScreen Blog: <https://www.aiscreen.io/airport/the-basics-of-fids-features-capabilities-and-uses/>
- Avinor. (2022). *AI-driven passenger flow optimization at Oslo Airport*. Avinor Airport Report.
- BagsID Network. (2022). *Tech Talk: Departure Control Systems*. Pridobljeno iz International Airport Review: <https://www.internationalairportreview.com/whitepaper/176745/tech-talk-departure-control-systems/>
- Carstens, D., & Pattison, L. (2016). *Human Factors in Aviation: Automation and Information Management*. Ashgate Publishing.
- Copenhagen Airport. (2022). *AI-powered Carry-on Luggage Compliance System*. Copenhagen Airport Press Release.
- Copenhagen Optimization. (2024). *What is an Airport Operational Database (AODB)?* Pridobljeno iz Copenhagen Optimization Blog:

<https://copenhagenoptimization.com/blog/what-is-an-airport-operational-database-aodb/>

Deutsche Telekom. (2023). *5G Network Deployment at Munich Airport*. Telekom Innovation Report.

Dublin Airport Authority. (2023). *Real-Time Passenger Flow Monitoring at Dublin Airport*. DAA Airport Operations Report.

Durgut, M. (15. april 2023). *Artificial Intelligence and Airport Management*. Pridobljeno iz aviationfile.com: <https://www.aviationfile.com/artificial-intelligence-and-airport-management/>

Eurocontrol. (2024a). *Cost of delay per minute - latest guidance*. Pridobljeno iz https://ansperformance.eu/economics/cba/standard-inputs/latest/chapters/cost_of_delay.html

Eurocontrol. (2024b). *Data Snapshot #44: Causes of flight delays*. Pridobljeno iz <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-data-snapshot-44-causes-flight-delays>

Eurocontrol. (23. 1 2025). *European Aviation Overview: 2024 Review*. Pridobljeno iz <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2025-01/eurocontrol-european-aviation-overview-20250123-2024-review.pdf>

Eurocontrol. (n. d.). *Airport collaborative decision-making (A-CDM)*. Pridobljeno iz <https://www.eurocontrol.int/concept/airport-collaborative-decision-making>

Eurocontrol Network Manager. (n. d.). *Cost of delay - EUROCONTROL standard inputs for economic assesment*. Pridobljeno iz https://ansperformance.eu/economics/cba/standard-inputs/latest/chapters/cost_of_delay.html

FBB. (2023). *Smart Boarding Notifications at Berlin Brandenburg Airport*. FBB Airport Operations Report.

Finavia. (2023). *Autonomous Robot Assistants at Helsinki-Vantaa Airport*. Finavia Innovation Review.

Fraport AG. (2023a). *AI-powered Passenger Chatbot at Frankfurt Airport*. Fraport Technology Report.

- Fraport AG. (2023b). *Smart Terminal Optimization at Frankfurt Airport*. Fraport Technology Review.
- Fulton, J., Frederick, G., Paul, P., Omura, J., Carlson, S., & Dorn, J. (2017). Increasing walking in the Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport. The Walk to Fly Study. *American Journal of Public Health*, 1143-1149. Pridobljeno iz <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5463209/>
- Geneva Airport. (2023). *Automated Border Control with AI and Blockchain at Geneva Airport*. Geneva Security Report.
- Gresham Smith. (2025). Designing for accessibility: Creating inclusive airport experiences. Pridobljeno iz <https://www.greshamsmith.com/news-and-insights/designing-for-accessibility-creating-inclusive-airport-experiences/>
- Groupe ADP. (2023). *Intelligent Light Paths for Passenger Guidance at Paris-Orly Airport*. Groupe ADP Innovation Report.
- Harari, Y. (2024). *Nexus: A Brief History of Information Networks from the Stone Age to AI [Audiobook]*. Fern Press.
- Haynes, D. (2022). *Hear The Thinking Behind All The New Digital At The Just Opened Delta Airlines Terminal At LAX [Podcast]*. Pridobljeno iz Sixteen:Nine: <https://www.sixteen-nine.net/2022/04/20/hear-the-thinking-behind-all-the-new-digital-at-the-just-opened-delta-airlines-terminal-at-lax-with-ryan-taylor>
- Heathrow Airport. (2023). *Holographic Information Assistants at LHR*. Heathrow Innovation Report.
- IATA. (2020). *Digital Transformation of Ground Operations*. Pridobljeno iz <https://www.iata.org/en/publications/store/digital-transformation-ground-operations/>
- IATA. (2020). *Digital Transformation of Ground Operations*. Pridobljeno iz <https://www.iata.org/en/publications/store/digital-transformation-ground-operations/>
- IATA. (2021a). *Bar Coded Boarding Pass (BCBP) implementation guide (Resolution 792)*. IATA. Pridobljeno iz https://www.iata.org/contentassets/1dccc9ed041b4f3bbdcf8ee8682e75c4/2021_03_02-bcbp-implementation-guide-version-7-.pdf

- IATA. (2021b). Fulfilment with Orders (ONE Order) Pilots. Pridobljeno iz https://www.iata.org/contentassets/72cbd60393ff42b5975d90ce9e049a7d/fulfilment-with-orders-one-order-pilots_final.pdf
- IATA. (2021c). *Future of the Airline Industry 2035*. Pridobljeno iz <https://www.iata.org/en/publications/store/future-airline-industry-2035>
- IATA. (n. d.). *Aviation Information Data Exchange (AIDX)*. Pridobljeno iz <https://www.iata.org/en/publications/info-data-exchange/>
- IATA. (n. d.). *IATA A-CDM recommendations*. Pridobljeno iz <https://www.iata.org/contentassets/5c1a116a6120415f87f3dadfa38859d2/iata-acdm-recommendations-v1.pdf>
- Jansen, R., & Van der Meer, S. (2023). Predictive Analytics for Queue Management in Transportation Hubs. *International Journal of Operations & Production Management*, 987-1002.
- Li, Y., & Wang, X. (2020). Real-time detection of oversized carry-on luggage using deep learning algorithms. *Computers & Security*, 93.
- Liao, T., & Goh, C. (2021). Smart Airport Operations: Artificial Intelligence and Big Data. *Journal of Transport & Health*, 22.
- Lufthansa Group. (n. d.). *Detect hand luggage using computer vision*. Innovation Runway. Pridobljeno iz <https://innovation-runway.lufthansagroup.com/en/focus-areas-projects/use-cases/detect-hand-luggage-using-computer-vision.html>
- Lufthansa Systems. (n. d.). *The new IATA distribution standard with booking information in one place (NDC & ONE Order)*. Pridobljeno iz <https://lhsystems.com/solutions/commercial-financial/ndc-one-order/>
- Navitaire. (2020). *Navitaire receives IATA ONE Order Capable status as an Order Management System*. Pridobljeno iz <https://www.navitaire.com/Navitaire-IATA-ONE-order-capable.aspx>
- NSELED. (2024). *A Comprehensive Guide to Flight Information Display Systems (FIDS)*. Pridobljeno iz <https://www.nseled.com/flight-information-display-systems/>

- Pickcel. (2021). *6 Reasons Why Lack of FIDS at Airports is Bad for Business*. Pridobljeno iz Pickcel Blog: <https://www.pickcel.com/blog/what-is-flight-information-display-system/>
- Procter, S. (19. marec 2025). *Copenhagen Optimization*. Pridobljeno 2025 iz Copenhagen Optimization: <https://copenhagenooptimization.com/blog/the-role-of-ai-and-machine-learning-in-airport-resource-optimization/>
- Royal Schiphol Group. (2022). *Intelligent Lighting and Smart Displays at Schiphol Airport*. Schiphol Press Release.
- Royal Schiphol Group. (2023). *AI-driven Passenger Navigation App at AMS*. Schiphol Tech Review.
- SEA Milan Airports. (2023). *Biometric Security Screening at Milan Malpensa Airport*. SEA Milan Technology Report.
- SITA. (2023). *2023 Air Transport IT Insights*. Pridobljeno iz <https://www.sita.aero/resources/type/surveys-reports/air-transport-it-insights-2023/>
- SITA. (2024). *SITA Type B Distribution Service overview*. Pridobljeno iz <https://www.sita.aero/solutions/sita-communications-and-data-exchange/sita-messaging/sita-type-b-distribution-service/>
- SITA. (2025). *SITA Beacon Registry API*. Pridobljeno iz <https://www.developer.aero/api-catalog/beacons-overview>
- Smith, R., Brown, C., & Davis, E. (2022). Enhancing Passenger Experience through AI-Powered Navigation and Information Systems. *Airport Management Review*, 45-58.
- Swedavia. (2023). *AI-powered Queue Management at Stockholm Arlanda Airport*. Stockholm: Swedavia Operations Report.
- Štancar, S. (2020). Optimizacija potniških tokov na letališčih z uporabo umetne inteligence. *Journal of Air Transport Management*, 89.
- UK Civil Aviation Authority. (2009). *The through airport passenger experience*. Pridobljeno iz <https://www.caa.co.uk/media/ajlkbbbm/through-airport-passenger-experience-2009.pdf>
- Wada, K., & Ishioka, Y. (2017). Development of a Passenger Guidance System Using Visual and Auditory Information. *Procedia Computer Science*, 1785-1794.

Wada, K., & Ishioka, Y. (2017). Journal of Transport & Health. *Journal of Transport & Health*, 1785-1794.

PRILOGE

Priloga 1: Prototip simulatorja za prikaz potniških tokov na letališču

Priloga je priložena v obliki ZIP-arhiva in vsebuje:

- delujoč prototip simulatorja, pripravljen na lokalni zagon,
- pythonovo izvorno kodo (`app.py`),
- spletni uporabniški vmesnik (`index.html`),
- pripadajoče simulacijske podatkovne datoteke (`passenger.csv`, `departure.csv`, `arrival.csv`, `airline.csv`, `airport.csv`, `aircraft.csv`),
- navodila za zagon v datoteki `README.md`.