

Utjecaj zrakoplova nove generacije na infrastrukturni dizajn aerodroma

Vučić, Karla

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:134824>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**UTJECAJ ZRAKOPLOVA NOVE GENERACIJE NA
INFRASTRUKTURNI DIZAJN AERODROMA**

**IMPACT OF NEW-GENERATION AIRCRAFT ON THE AIRPORT
INFRASTRUCTURE DESIGN**

mentor: doc. dr. sc. Igor Štimac

student: Karla Vučić

JMBAG: 0023115573

Zagreb, kolovoz 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 9. kolovoza 2022.

Zavod: Zavod za zračni promet

Predmet: Tehnologija prihvata i otpreme zrakoplova

ZAVRŠNI ZADATAK br. 6638

Pristupnik: Karla Vučić

Studij: Promet

Smjer: Zračni promet

Zadatak: Utjecaj zrakoplova nove generacije na infrastrukturni dizajn aerodroma

Opis zadatka:

U prvom dijelu rada potrebno je opisati podjelu zrakoplova prema generacijama i navesti specifičnosti svake generacije. U nastavku navode se osnovni postulati razvoja aerodromske infrastrukture prvenstveno one koja ima utjecaj na prihvata i otpremu zrakoplova. Nastavno na navedeno slijedi opis aerodromske infrastrukture koju je potrebno izmijeniti ili nadograditi kako bi ista mogla biti prilagođena potrebama zrakoplova nove generacije kao što je bio slučaj kod zrakoplova A380. Na kraju rada potrebno je na temelju provedenog istraživanja utvrditi koja će to aerodromska infrastruktura biti najizloženija promjenama prilikom operiranja zrakoplova novih generacija u budućnosti te koji će to biti izazovi u operativnom i tehnološkom smislu. Na temelju prethodno navedenog istraživanja potrebno je napisati zaključak.

Zadatak uručen pristupniku: 26. veljače 2022.

Rok za predaju rada:

Mentor:

Presjednik povjerenstva za završni rad:

doc. dr. sc. Igor Štimac

SAŽETAK:

Razvitkom tehnologije i novih poboljšanih tehnoloških sustava, zrakoplovna industrija se trebala razvijati sukladno tome. Zračni prijevoznici i proizvođači zrakoplova teže novim inovativnim idejama i tehnologijama u pogledu razvitka novih generacija zrakoplova koji bi odgovarali standardima vremena u kojim se nalaze i potražnji za zračnim prometom koja konstantno raste. Uz stvaranje novih inovativnih ideja, a samim tim i zrakoplova, pokušava se privući se što veći broj putnika, no uvođenje novih generacija zrakoplova sa sobom povlači i brojne troškove i ulaganja u postojeću aerodromsku infrastrukturu da bi se ista mogla prilagoditi postojećim i budućim generacijama zrakoplova. Budućnost zrakoplovstva imati će koristi od istraživanja dizajna zrakoplova i upravljanja zračnim prijevozom sa ciljem poboljšanja učinkovitosti i smanjenja utjecaja na okoliš. U tijeku su istraživanja koja definiraju promjene kojima nove generacije zrakoplova utječu na infrastrukturu aerodroma kao i koji su potencijalni izazovi u operativnom i tehnološkom smislu zrakoplova novih generacija.

KLJUČNE RIJEČI: nova generacija zrakoplova, razvoj infrastrukture, prihvati i otprema zrakoplova

SUMMARY:

With the development of technology and new improved technological systems, the aviation industry should have developed accordingly. Airlines and aircraft manufacturers strive for new innovative ideas and technologies regarding the development of new generations of aircraft that would meet the standards of the times they are in and the demand for air traffic that is constantly growing. Along with the creation of new innovative ideas, and therefore aircraft, an attempt is made to attract as many passengers as possible, but the introduction of new generations of aircraft entails numerous costs and investments in the existing airport infrastructure so that it can be adapted to existing and future generations of aircraft. The future of aviation will benefit from research into aircraft design and air transport management to improve efficiency and reduce environmental impact. Research is underway that defines the changes that new generations of aircraft affect the airport infrastructure, as well as potential challenges in the operational and technological sense of new generation aircraft.

KEY WORDS: new-generation aircraft, development of infrastructure, receiving and dispatching aircraft

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. PODJELA ZRAKOPLOVA PREMA GENERACIJAMA	3
2.1 Zrakoplovi prve generacije.....	7
2.2 Zrakoplovi druge generacije	10
2.3 Zrakoplovi treće generacije.....	11
2.4 Zrakoplovi četvrte generacije.....	15
3. OSNOVNI POSTULATI RAZVOJA AERODROMSKE INFRASTRUKTURE ZA PRIHVAT I OTPREMU ZRAKOPLOVA	19
3.1 Uzletno-sletna staze	20
3.2 Staza za vožnju	23
3.3 Stajanka	25
3.3.1 Stajanka za dulje parkiranje zrakoplova i izolirana parkirna pozicija.....	27
3.3.2 Stajanka za održavanje zrakoplova i stajanka za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja.....	28
3.4 Putnička zgrada.....	29
4. PRILAGODBA AERODROMSKE INFRASTRUKTURE U FUNKCIJI PRIHVATA I OTPREME ZRAKOPLOVA NOVE GENERACIJE (STUDIJA SLUČAJA)	36
4.1 Zrakoplov A380	36
4.2 Zračna luka Heathrow	42
4.2.1 Projekt Pier 6	44
4.2.2 Projekt Terminal 3.....	45
5. IZAZOVI U BUDUĆEM RAZVOJU INFRASTRUKTURE I OPREME ZA PRIHVAT I OTPREMU ZRAKOPLOVA NOVE GENERACIJE.....	48
5.1 Implementacija hidrogena u zrakoplovstvu.....	49
5.2 Izgradnja solarnih elektrana.....	53
5.3 Zemaljski izvor napajanja zrakoplova	56
5.4 Inovacije u budućem razvoju zrakoplova	57
5.5 Budući razvoj zračnih luka	61
6. ZAKLJUČAK	67
LITERATURA.....	69
POPIS KRATICA	74
POPIS SLIKA.....	76
POPIS TABLICA.....	77

1. UVOD

Kroz povijest, zračni promet je bilježio stalan porast potražnje te je postao jednom od vodećih prometnih grana. Uz to što je jedna od najbržih grana prijevoza, zračni promet se smatra i jednom od najsigurnijih prometnih grana. Upravo zbog toga se u današnjici mnogi ljudi okreću i oslanjaju upravo na prijevoz zračnim putem. Razvoj zračne industrije je krenuo s izumom zrakoplova *Flyer* braće Wright 1903. godine, koji je potaknuo daljnji razvoj motornih zrakoplova. Vrhunac u razvoju zračne industrije bio je netom nakon 2. svjetskog rata kada je krenula masovna proizvodnja mlaznih zrakoplova. Industrija zračnog prometa je prolazila kroz razne prepreke te se mijenjala u skladu s vremenom u kojem se nalazila, a s promjenama je došlo i do razvoja novih modernijih zrakoplova za obavljanje zračne plovidbe.

Kroz godine se usavršava tehnika izrade što boljeg i efikasnijeg zrakoplova koji bi imao što manje negativnog utjecaja na okolinu, a istovremeno omogućio zračnim prijevoznicima što veći broj sjedala/mjesta u istom. Danas u svijetu postoje mnoge kompanije koje se bave izradom mlaznih zrakoplova, no dvije najpoznatije su *Boeing* i *Airbus*, koje su ujedno i međusobni konkurenti. Da bi pokušali nadmašiti konkurenciju proizvođači su morali smišljati nove inovativne ideje kako bi poboljšali motore i ostale sustave u zrakoplovu, te je to dovelo do razvoja nove generacija zrakoplova. Svaka promjena u zračnom prometu treba biti detaljno analizirana te se trebaju utvrditi prednosti i mane koje bi isti imali na porast potražnje u zračnom prijevozu. Uvođenjem zrakoplova nove generacije morala su se provesti brojna istraživanja o utjecaju koji bi isti imali na infrastrukturu aerodroma i kako bi se ista morala mijenjati za primitak tih zrakoplova.

Ovaj završni rad se sastoji 6 poglavlja, segmenti rada su sljedeći:

1. Uvod,
2. Podjela zrakoplova prema generacijama,
3. Osnovni postulati razvoja aerodromske infrastrukture za prihvat i otpremu zrakoplova,
4. Prilagodba aerodromske infrastrukture u funkciji prihvata i otpreme zrakoplova (studija slučaja),
5. Izazovi u budućem razvoju infrastrukture i opreme za prihvat i otpremu zrakoplova i
6. Zaključak.

Cilj svakog poglavlja je detaljnije opisivanje zrakoplova prema generacijama te utjecaj istih na već postojeće infrastrukture aerodroma.

U prvom, uvodnom poglavlju prikazana je struktura završnog rada.

U drugom poglavlju su definirani zrakoplovi prema generacijama i njihove specifikacije, te povijesni razvoj istih. Na temelju razvoja zrakoplova uočene su prednosti i mane svake generacije, kao i postignuća u prošlosti koja se još uvijek primjenjuju pri planiranju izgradnje zrakoplova.

U trećem poglavlju su detaljnije opisani osnovni postulati infrastrukture aerodroma, posebice oni koji izravno utječu na prihvat i otpremu zrakoplova, a to su redom: uzletno-sletna staza, staza za vožnju, stajanka te putnički terminal, te su opisani elementi koji se trebaju uzeti u obzir prilikom konstruiranja aerodroma te same odluke koji se zrakoplovi mogu primiti na određeni aerodrom.

U četvrtom poglavlju se na temelju primjera zračne luke *Heathrow* i zrakoplova *Airbus A380*, kroz studiju slučaja, su definirane sve modifikacije koje su se trebale napraviti na infrastrukturi aerodroma da bi zračna luka mogla primiti zrakoplov koji do tada nije bila u mogućnosti.

U petom poglavlju se analiziraju izazovi i problemi koji se mogu javiti u budućem razvoju infrastrukture i same opreme za prihvat i otpremu zrakoplova. Posebno je stavljen naglasak na implementaciju hidrogena u zrakoplovstvu i izgradnju solarnih elektrana koji su već u primjeni na manjem broju zračnih luka, ali njihova šira primjena se očekuje u bliskoj budućnosti.

Šesto poglavlje sadržava bitne zaključke koji su doneseni na osnovi svih prethodno obrađenih poglavlja.

2. PODJELA ZRAKOPLOVA PREMA GENERACIJAMA

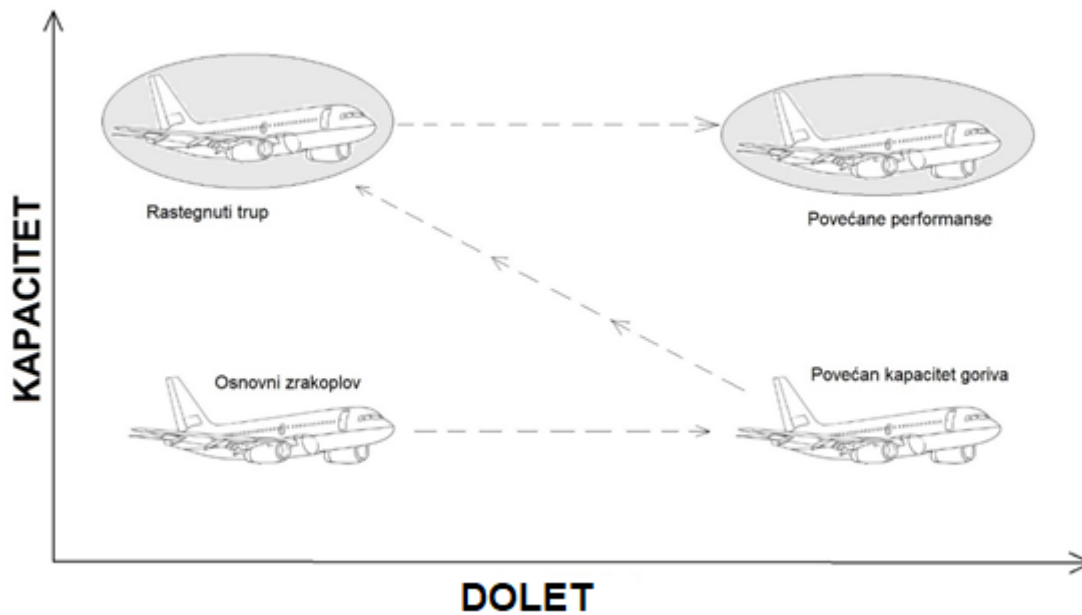
Da bi zračni promet mogao konkurirati ostalim granama prometa, važno je da bude siguran, brz i efikasan način prijevoza. Tijekom povijesti, najviše se težilo smanjivanju stopa nesreća što je danas i postignuto zbog rigoroznih propisa i zakona, poboljšavanjem obuke pilota i postrožavanjem mjera. Tehnološki napredak predstavlja ključan faktor za povećanje sigurnosti u zrakoplovstvu. Tehnologije koje su uvedene u sustave zrakoplova razvijale su se s ciljem poboljšanja sigurnosti.

Prva generacija komercijalnih mlaznih zrakoplova dizajnirana je 1950-ih i 1960-ih godina sa sustavnim tehnologijama, koje su bile ograničene analognom elektronikom tog doba. Ubrzo se i javlja druga generacija zrakoplova s poboljšanim sustavima za automatsko letenje. Treća generacija zrakoplova predstavljena je početkom 1980-ih godina. Ova generacija je iskoristila prednosti digitalnih tehnologija za uvođenje staklenih kokpita sa sustavima upravljanja letom i navigacijskim zaslonima, što je u značajnoj mjeri poboljšalo navigacijske sposobnosti [1].

U kombinaciji sa sustavima svjesnosti o terenu i upozorenja (engl. *Terrain Avoidance and Warning System* - TAWS) ove evolucije su bile ključne za smanjenje nesreća kontroliranog leta na teren (engl. *Controlled Flight Into Terrain* - CFIT). Četvrta generacija komercijalnih mlaznih zrakoplova je prvi put došla u upotrebu 1988. godine sa zrakoplovom *Airbus A320*. Zrakoplovi četvrte generacije koriste *fly-by-wire* - FBW tehnologiju s funkcijama zaštite ovojnice leta. Ove funkcije štite zrakoplov od nesreća s gubitkom kontrole tijekom leta (engl. *Loss Off Control* - LOC-I). *Fly-by-wire* tehnologija sada predstavlja industrijski standard i koristi se na svakom trenutno proizvedenom modelu zrakoplova *Airbusa*, *Boeinga B777* i *B787*, *Embraer-u E-Jets* i *Sukhoi Superjet* [1].

Proizvođači zrakoplova su kroz povijest slijedili programe razvoja zrakoplova vrlo slične prikazanim na slici 1. Proizvođači započinju uvođenjem osnovnog dizajna zrakoplova, kao što je prikazano u donjem lijevom kutu slike, a zatim uvode redizajniranu modificiranu verziju istog zrakoplova koji je sposoban letjeti na dužim rutama što se općenito postiže dodavanjem spremnika goriva i/ili motora veće učinkovitosti. Kada se ovaj korak završi, zrakoplov se tada može ponovno uvesti u uvećanoj verziji koja može prevoziti više putnika. Ovaj model zrakoplova, zbog

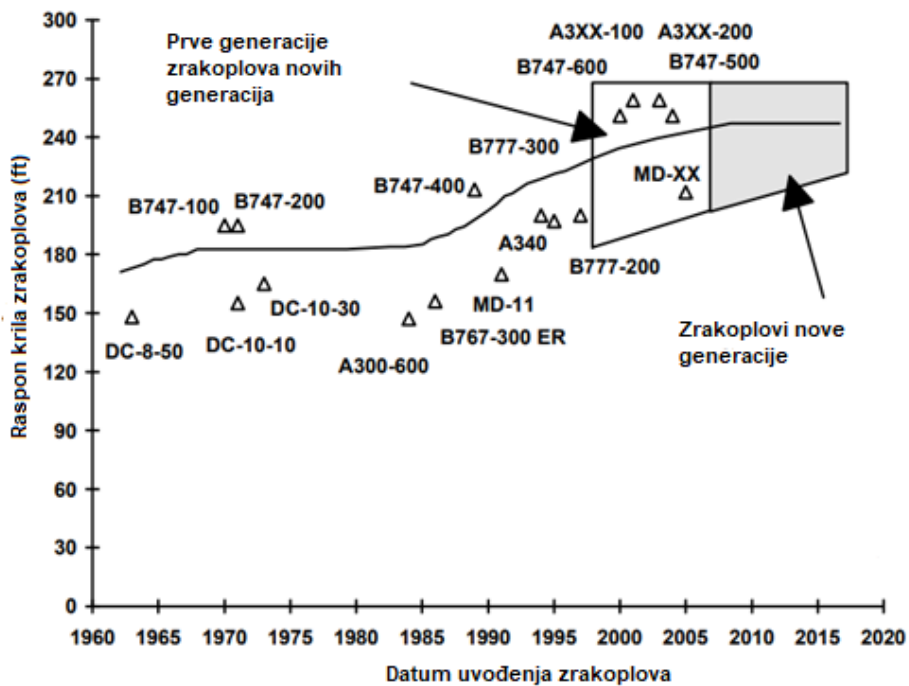
povećanja težine i veličine, gubi na doletu. Rezultat je, u biti, kompromis raspona za kapacitet.



Slika 1. Tipičan prikaz razvoja zrakoplova
Izvor: [1]

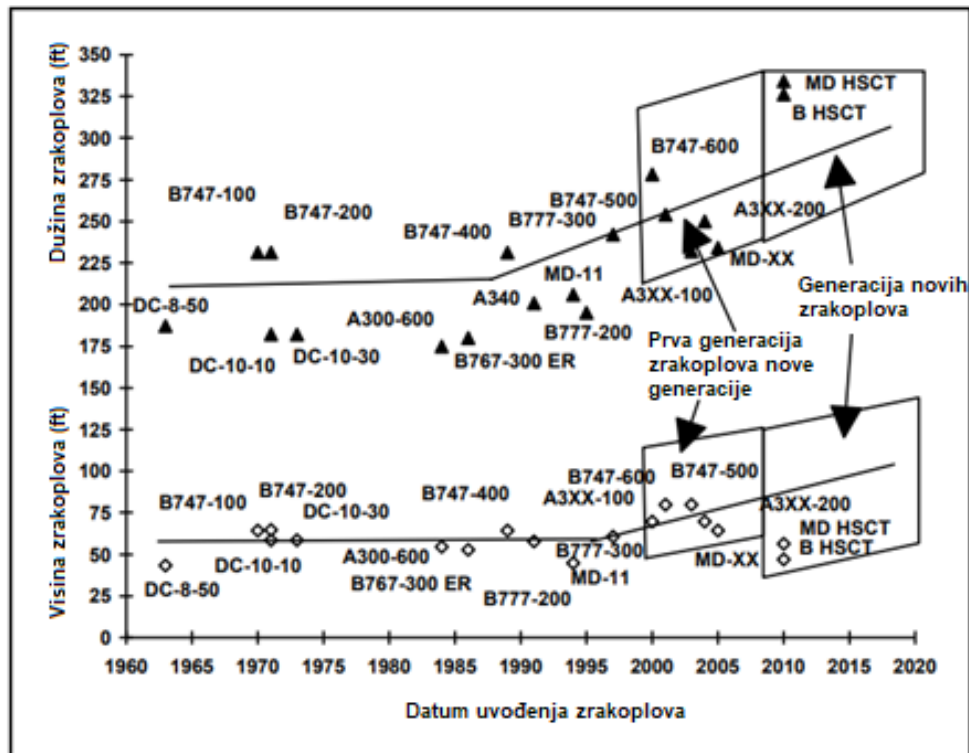
Prosječna težina komercijalnih zrakoplova kontinuirano se povećavala tijekom posljednjih par desetljeća. Slika 2, ilustrira trend u prošlosti u maksimalnim težinama uzlijetanja velikih zrakoplova te pokazuje kakav je bio uzlazni trend težine zrakoplova te da se sukladno tome očekuje nastavak povećanja težine zrakoplova novih generacija. Gornjom linijom su ilustrirane karakteristike težine većih transportnih zrakoplova koje su se koristile tijekom prošlosti za duge međunarodne letove. Donjom linijom, pokazuje se trend u prošlosti težine velikih zrakoplova koji se koristio na kraćim rutama. Ove linije su paralelne te se pretpostavlja da će se nastaviti istim kolosijekom u budućnosti. Osjenčanim područjem na slici 2, vidljivo je da se težina dugih ruta

zrakoplova nove generacije povećala 1.6 milijuna, dok su kraće rute zrakoplova porasle 1 milijun funti tijekom istog vremenskog razdoblja.



Slika 2. Datum uvođenja zrakoplova
Izvor: [2]

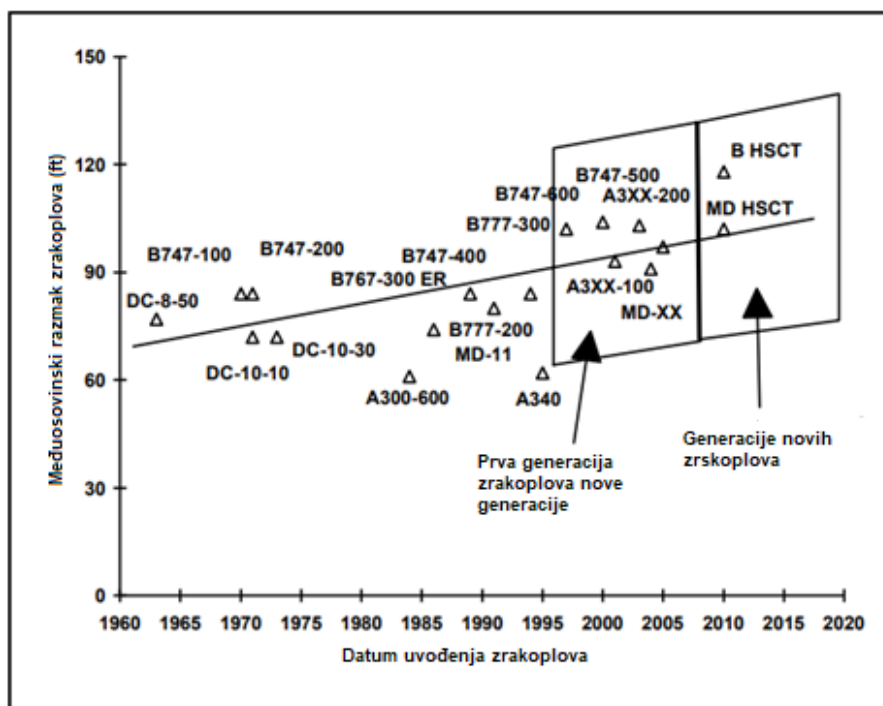
Komercijalni transportni zrakoplovi također su povećali raspon krila tijekom posljednjih nekoliko godina. Trenutačni trendovi raspona krila zrakoplova pokazuju da će trend nastaviti rasti. Slika 3, ilustrira trend tijekom prošlosti, u dizajnu raspona krila zrakoplova za prethodne i buduće zrakoplove nove generacije. Zbog razvoja krila veće učinkovitosti, ostvareno je da zrakoplov nosi veću težinu bez povećanja veličine zrakoplova.



Slika 3. Trendovi dužina i visina zrakoplova
Izvor: [2]

Ostale karakteristike dizajna budućih zrakoplova koje se mogu predvidjeti na temelju povijesnih trendova su duljina trupa, visina repa i razmak između rubnih kotača glavnog podvozja. Ova tri elementa, su povezani jedni s drugim. Razmak između rubnih kotača glavnog podvozja obično je povezan s duljinom trupa; što je dulji trup, to je veći razmak između rubnih kotača glavnog podvozja. Slike 3 i 4, ilustriraju trendove duljine, visine i dimenzija razmaka između rubnih kotača glavnog podvozja koji su

uvedeni u prošlosti. U budućnosti se također predviđa rast koji je predviđen na slici 2 [2].



Slika 4. Trend međuosovinskog razmaka
Izvor: [2]

Fizičke i operativne karakteristike zrakoplova novih generacija će strogo diktirati dizajn budućih zračnih luka i njihovih objekata. Kako se povećavaju karakteristike zrakoplova, zračne luke će se morati povećavati na sljedeću višu razinu.

Na kontinuiranu rastuću potražnju u zračnom prometu se odgovara na više načina:

- Povećanje kapaciteta zračne luke kroz izgradnju i proširenje objekata,
- Povećanje kapaciteta zrakoplova tj. povećanje gabarita zrakoplova i
- Povećanje učestalosti leta [2].

2.1 Zrakoplovi prve generacije

Nakon Hladnog rata između Sovjetskog Saveza i Sjedinjenih Američkih Država, dogodio se razvoj mlaznih aviona. Razvoj se odnosio većinom na vojne zrakoplove koji su se kasnije primjenjivali i u komercijalnom sektoru. Na primjer, tvrtka *Boeing* je za svoje vojne zrakoplove kao što su *Boeing B-47* i *B-52* koristila dizajn krila koja su bila zabačena unatrag kako bi se smanjio otpor i povećala brzina. Taj dizajn je kasnije primijenjen i na komercijalnim avionima, što ih je učinilo bržima te samim tim i privlačnijim putnicima [3]. Prvi zrakoplovi s turbomlaznim pogonom su bili eksperimentalne preinake zrakoplova s klipnim motorom *Avro Lancastrian*, koji su letjeli s nekoliko tipova ranih mlaznih aviona, uključujući *De Havilland Ghost* i *Rolls-Royce Nene*. Zadržali su dva unutarnja klipna motora, a mlaznice su bile smještene u izvanbrodskim gondolama. Prvi zrakoplov sa samo mlaznom snagom bio je *Vickers*

VC. *Viking G-AJPH* na *Nene* pogon, prvi je put poletio 6. travnja 1948. godine. Rani mlazni zrakoplovi imali su mnogo nižu unutarnju razinu buke i vibracija od suvremenih zrakoplova s klipnim motorom. U zrakoplove prve generacije ubrajaju se [4]:

- *Comet*,
- *Caravelle*,
- BAC-111,
- *Trident*,
- VC-10,
- B707,
- B720,
- DC-8 i
- *Convair 880/990*.

Prvi namjenski mlazni zrakoplov bio je britanski *De Havilland Comet* koji je prvi put poletio 1949. godine, u službu ušao 1952. godine, no kasnije je bio povučen iz upotrebe zbog ozbiljnih strukturalnih problema. Također, 1949. godine razvijen je zrakoplov *Avro Canada C102 Jetliner*, koji nikada nije došao u proizvodnju, no međutim izraz *jetliner* ušao je u upotrebu kao generički izraz za putnički mlazni zrakoplov. Ove prve mlazne zrakoplove slijedili su nekoliko godina kasnije zrakoplovi *Sud Aviation Caravelle* iz Francuske, *Tupoljev Tu-104* iz Sovjetskog Saveza, te *Boeing 707*, *Douglas DC-8* i *Convair 880* iz Sjedinjenih Američkih Država. Nacionalni prestiž bio je povezan s razvojem prototipa i dovođenjem ovih ranih dizajna u službu. Zračni prijevoznik *Aeroflot* je koristio sovjetske zrakoplove *Tupoljev*, dok je *Air France* predstavio francuske zrakoplove *Caravelle*. *American Airlines* naručila je zrakoplov *Comet*, ali je kasnije otkazala narudžbu kada je zrakoplov naišao na probleme sa zamorom metala. Kanadske, britanske i europske zračne tvrtke nisu mogle zanemariti bolju ekonomičnost rada zrakoplova *Boeinga 707* i *Douglas DC-8*, dok su neki američki zračni prijevoznici naručili *Caravelle*. *Boeing* je postao najuspješniji zrakoplov od ranih proizvođača. Zrakoplov *KC-135 Stratotanker* i vojne verzije *707* ostaju operativne, uglavnom kao tankeri ili teretnjaci. Osnovna konfiguracija zrakoplova *Boeing*, *Convair* i *Douglas* i samog dizajna, sa široko razmaknutim motorima i zabačenim krilima prema unatrag se pokazala kao najčešći raspored koji je bio kompatibilan sa turboventilatorskim motorima velikog promjera s visokim prenosnikom koji je kasnije doživio uspjeh zbog njegove tišine tijekom rada i učinkovitosti goriva.

Turbomlazni motor *Pratt & Whitney JT3* pokretao je originalne modele zrakoplova *Boeinga 707* i *Douglas DC-8*. U ranim 1960-tim JT3 je modificiran u JT3D turboventilator s niskom obilaznicom za dalekometne zrakoplove B707 i DC-8 varijante. Dizajni *De Havillanda* i *Tupoljeva* imali su motore ugrađene u krila pored trupa, koncept koji je postojao samo unutar vojnih dizajna, dok je *Caravelle* bio primjer zrakoplova čiji je motor bio montiran s obje strane stražnjeg trupa [4].

Prvi putnički mlazni zrakoplov bio je *Havilland Comet*, prikazan na slici 5, koji je ušao u promet 1952. godine. Unatoč činjenici što je ovaj zrakoplov označio značajan korak u zrakoplovstvu, ovaj zrakoplov je imao niz ozbiljnih problema kao što su

problemi s trupom, prozorima i tlakom. Tek u četvrtoj iteraciji, *Cometu 4*, problemi su bili riješeni te se prodaja povećala. No, do tada su drugi proizvođači zrakoplova naučili iz njihovih pogrešaka te su ponudili konkurentne alternative [5].



Slika 5. Zrakoplov Havilland Comet
Izvor: [5]

Postojalo je nekoliko nasljednika i konkurenata zrakoplovu *Cometu*, uključujući zrakoplove *Douglas DC-8*, *Vickers VC-10*, *Tupoljev Tu-104* i *Boeing B707*. Od navedenih, zrakoplov *Boeing B707* se ističe kao najuspješniji. Zrakoplov *Boeing KC-135*, doživio je veliki uspjeh kao vojni avion, ali je postao još uspješniji kada je preuređen i predstavljen 1958. godine kao prvi putnički zrakoplov u SAD-u – *Boeing 707*. Zrakoplov je bio duljine 38.1 metar (125 stopa) te je imao četiri motora sa kojim je mogao prevoziti do 181 putnika te je mogao putovati brzinom do oko 885,14 km/h. Prvi je put poletio u prosincu 1958. godine i ostao je u proizvodnji do 1978. godine, sa 856 izgrađenih i isporučenih zrakoplova zračnim prijevoznicima. Njegovi su se motori pokazali pouzdanijima od motora sa klipnim pogonom jer su proizvodili manju količinu vibracija, stavljajući time manje opterećenje na okvir zrakoplova te smanjujući troškove održavanja [3]. Iako to nije bio prvi komercijalni mlazni zrakoplov, bio je prvi koji je postao vrlo uspješan te se smatrao početkom mlaznog doba. Također, ovaj zrakoplov je postavio tvrtku *Boeing* kao dominantnog civilnog proizvođača, s uspješnim serijama proizvodnje zrakoplova koja se nastavlja sve do danas. *Boeing* je ugradio mnoge elemente dizajna na temelju problema sa ranijim mlaznim zrakoplovima na temelju povratnih informacija kupaca. Ovi elementi uključuju [6]:

- širi trup, koji omogućuje pet sjedećih mjesta uzastopno i bolju nosivost tereta,
- premještanje motora na podkrilne čaure što se smatralo sigurnijim u slučaju požara,
- promjene u dizajnu zakrilca i
- jačanje trupa.

2.2 Zrakoplovi druge generacije

Od 1950-ih godina, dogodilo se par manjih promjena u dizajnu zrakoplova. Mlazni motori su ostali, ali su se poboljšali u snazi i učinkovitosti. Nakon uspjeha sa zrakoplovima *Boeing* B707 i B727, dizajniran je novi zrakoplov B737 u cilju da se pobijedi konkurencija i da se osvoje kupci. Mlazni zrakoplovi iz 1960-ih godina bili su poznati po napretku tehnologije turboventilatora, kao i po pojavi trijet dizajna koji predstavlja mlazne zrakoplove koje pokreću tri motora. Mlazni zrakoplovi koji su ušli u upotrebu su bili pokretani tankim turboventilatorskim motorima s niskom obilaznicom. Zamijenjeni su ostali razvoji kao što su uzlijetanje uz pomoć rakete (engl. *Rocket Assisted Take Off* - RATO), ubrizgavanje vode i naknadno izgaranje (također poznato kao ponovno zagrijavanje) koje se koristilo na nadzvučnim zrakoplovima kao što su *Concorde* i *Tupoljev* Tu-144. Mlazni zrakoplovi iz 1970.-ih godina uveli su širokotrupne zrakoplove s dva prolaza i turboventilatorske motore s visokom obilaznicom. 1970-te godine zrakoplov B747 je ušao u upotrebu kao prvi zrakoplov s turboventilatorom koji je imao visoki prenosnik koji je snizio operativne troškove, te u početnom modelu su bila sjedišta za do 400 putnika zbog čega je dobio naziv "*Jumbo jet*". Ostali dizajni širokotrupnih zrakoplova uključivali su trijetove *McDonnell Douglas* DC-10 i *Lockheed* L-1011 *TriStar* koji su bili sposobni letjeti dugim rutama iz zračnih luka s kraćim uzletno-sletnim stazama. Na tržištu je nastupio europski konzorcij *Airbus*, čiji je prvi zrakoplov bio *Airbus* A300 [7]. Iz zrakoplova druge generacije ističu se sljedeći zrakoplovi [4]:

- *Concorde*,
- A300,
- *Mercure*,
- F28,
- Bae146,
- VFW 614,
- B727,
- B737-100/-200,
- B747-100/-200/-300/SP,
- L-1011,
- DC-9 i
- DC-10.

Zrakoplov *Boeing* B737, prikazan na slici 6, stavljen je u primjenu 1967. godine te je nudio nekoliko dizajnerskih razlika u odnosu na konkurenciju:

- Dva postavljena motora u zrakoplovu umjesto četiri s ciljem da privuče kupce koji žele niže troškove.
- Motori su postavljani ispod krila čime se nudi lakši pristup te se je omogućena šira kabina.
- Širi trup koji nudi šest sjedećih mjesta u nizu i rukovanje standardnim teretnim kontejnerima.



Slika 6. Zrakoplov Boeing B737
Izvor: [7]

Zrakoplov B737 je ostao u distribuciji do 1967. godine te je prolazio kroz mnoge inačice. Svaka od inačica je nudila nova ažuriranja kako bi se zadovoljile preferencije i zahtjevi zrakoplovnih prijevoznika. To bi uključivalo, na primjer, opcije kao što su kombinirani modeli tereta i prilagodbe za šljunčano slijetanje, te razvojni fokus na novu tehnologiju motora i poboljšanja učinkovitosti. Osnovni dizajn, struktura trupa i dizajn krila, su uglavnom ostali isti jer nema potrebe mijenjati nešto što već funkcionira, ako se umjesto toga može poboljšati.

Jedna od značajnijih promjena od razvoja ranih mlaznih zrakoplova je razvoj većih zrakoplova, na primjer, zrakoplov *Boeing* B747 koji je pušten u promet 1970. godine. Za veći, teži okvir zrakoplova bio je potreban novi dizajn turboventilatorskog motora s visokom obilaznicom. *Pratt & Whitney* su dizajnirali motor JT9D posebno za ovaj zrakoplov. Zrakoplov B747 je bio jednako značajan s tehničkog gledišta kao i s ekonomskog jer je omogućio zračnim prijevoznicima da ponude niže cijene karata i duže rute. Dodatni raspoloživi prostor je omogućio zrakoplovnim tvrtkama nove mogućnosti za objekte i kabine na brodu uključujući prostrane kabine prve klase i salone. Također je iskorišten dodatni prostor za stvaranje novih kabina. To je počelo 1970-ih godina s nekim zračnim prijevoznicima koji su stvorili "*premium*" ponudu unutar svojih ekonomskih kabina, a do 1980-ih je dovelo do stvaranja poslovne klase kao treće kabine [3].

2.3 Zrakoplovi treće generacije

Godine 1978. tvrtka *Boeing* je predstavila dvomotorni *Boeing* 757 kao zamjenu za B727 i dvomotorni B767 kao konkurenciju *Airbusu* A300. Zrakoplovi B757 i B767 lansirani su do tržišnog uspjeha, djelomično zbog propisa iz 1980-ih o standardima

operativnih performansi sa dvostrukim motorom proširenog raspona (engl. *Extended-range Twin-engine Operational Performance Standards* - ETOPS) koji reguliraju prekooceanske *TwinJet* operacije. Ovi propisi dopuštali su zrakoplovima da prelaze oceane na udaljenosti do tri sata od zračnih luka za hitne slučajeve. Prema pravilima ETOPS-a, zrakoplovne tvrtke počele su koristiti B767 na dugim inozemnim linijama koje nisu zahtijevale kapacitet većih zrakoplovnih prijevoznika. Do kasnih 1980-ih, modeli zrakoplova DC-10 i L-1011 približavali su se dobi za umirovljavanje, što je potaknulo proizvođače da razviju zamjenske dizajne. *Mc Donnell Douglas* počeo je raditi na zrakoplovu MD-11, proširenom i nadograđenom nasljedniku zrakoplova DC-10. *Airbus*, zahvaljujući uspjehu svoje obitelji A320, razvio je *TwinJet* srednjeg dometa i s njim povezan četveromlazni zrakoplov *Airbus A340* dugog doleta. Godine 1988. *Boeing* je počeo razvijati ono što bi bilo zrakoplov *Boeing B777 TwinJet*, koristeći konfiguraciju s dva motora. Osim toga, *Boeing* je također objavio veliko ažuriranje za njihov 747, 747-400 [7].

U teoriji se uzima da treća generacija zrakoplova započinje od 1980. godina. U zrakoplove treće generacije spadaju [4]:

- A300-600,
- A310,
- Avro RJ,
- F70,
- F100,
- B717,
- B737 *Classic*,
- B737 NG,
- B737 MAX,
- B757,
- B767,
- B747-400/-8,
- *Bombardier* CRJ,
- *Embraer* ERJ,
- MD-10 i
- MD-90.

Jedna od značajnijih promjena koja je utjecala na zrakoplove iz 1970-ih je bilo poboljšanje performansi i sigurnosti u radu zrakoplova sa dva motora. Rani mlazni zrakoplovi (kao što su zrakoplovi *Comet* i B707) imali su četiri motora. U to vrijeme, dvostruki motori su bili u velikoj mjeri ograničeni na mjesta na koja su mogli letjeti, jer nisu mogli biti udaljeni više od 60 minuta od zračne luke za preusmjeravanje. Prekooceanski letovi ostali su u domeni četveromotornih zrakoplova, a kasnije i tromotornih zrakoplova što se promijenilo od 1980-ih uvođenjem standardnih operativnijih performansi s dva motora proširenog raspona. S ETOPS-om je omogućeno da zrakoplovi s dva motora budu odobreni za letenje dalje od zračne luke za preusmjeravanje.

U razdoblju zrakoplova treće generacije došlo je do revolucije “staklenog kokpita”. Promjenu u izgledu i rasporedu kokpita potaknula su dva ključna tehnička poboljšanja: dostupnost dovoljno sposobnih i pouzdanih elektroničkih sustava za digitalizaciju i obradu informacija i razvoj katodnih cijevi (engl. *Cathode Ray Tubes* - CRT), poput onih koji se koriste u računalnim monitorima, ali koje su se sposobne prilagoditi iznimno promjenjivim uvjetima ambijentalnog osvjetljenja u pilotskoj kabini zrakoplova. Ove dvije inovacije dovele su do zamjene glavnih elektromehaničkih instrumenata za letenje zaslonima računalnog tipa, a posljedično i do promjene načina prikazivanja informacija o statusu zrakoplovnih sustava i alarmnih signala, kombinacija ovog tehnološkog razvoja dovela je do pojave prve generacije onoga što se danas naziva “stakleni kokpit”.

Početak 1980.-ih, ovaj novi koncept usvojen je za zrakoplove *Airbus A310* i *Boeing B757* i *B767*. U kombinaciji s drugim inovacijama kao što su sustav upravljanja letom (engl. *Flight Management System* - FMS), uvođenje staklenog kokpita omogućio je da velikim zrakoplovima upravlja posada od dva člana. Zrakoplov *Airbus A310* prikazan na slici 7, bio je opremljen sustavom elektroničkih letnih instrumenata (engl. *Electronic Flight Instrument System* - EFIS) koji se sastojao od šest CRT zaslona, tri računala i pripadajućih kontrolnih stanica koje su kopilotu pružale bitne informacije o kontroli leta i navigaciji, kao i sintetičke podatke o statusu zrakoplovnih sustava i alarma. Sučelje čovjek-stroj je također značajno poboljšano, s novim funkcijama koje su postale dostupne, kao što su prikaz jednostavnih grafičkih grafikona i pojednostavljenih dijagrama sustava na zrakoplovu. S ovom novom tehnologijom, ploča s instrumentima zrakoplova A310 mogla bi biti znatno jednostavnija od analognih kokpita prijašnjih generacija zrakoplova iako su indikatori podataka motora u središnjem dijelu i dalje koristili elektromehaničku tehnologiju [8].



Slika 7. Zrakoplov Airbus A310
Izvor: [9]

Od 1980-ih godina počinje upotreba elektroničkog sustava instrumenata za letenje - EFIS koji predstavlja sustav prikaza instrumenata u pilotskoj kabini u kojem je korištena tehnologija elektronička, a ne elektromehanička kao do tada. Rani EFIS sustavi prikazuju informacije pomoću tehnologije katodne cijevi. Kasniji prikazi instrumenata predstavljeni su na višebojnim zaslonima s tekućim kristalima (engl. *Liquid Crystal Display* - LCD) koji zamjenjuju neke ili sve konvencionalne instrumente za letenje za oba pilota u kokpitu. Tipični EFIS sustav sastoji se od primarnog prikaza leta, elektroničkog pokazivača smjera (engl. *Electronic Attitude Director Indicator* - EADI) i elektroničkog vodoravnog indikatora situacije (engl. *The Electronic Horizontal Situation Indicator* - EHSI), navigacijskog zaslona. U nekim dizajnima dva su zaslona integrirana u jedan [10].

Sustav upravljanja letom (*Flight Management System* - FMS) je višenamjensko računalo za navigaciju, performanse i operacije zrakoplova dizajnirane za pružanje virtualnih podataka i operativne harmonije između zatvorenih i otvorenih elemenata povezanih s letom od pokretanja motora i polijetanja, do slijetanja i gašenja motora. Većina modernih komercijalnih i poslovnih zrakoplova opremljena je elektroničkim sustavom instrumenata letenja, koji zamjenjuju konvencionalne sustave i zaslone u pilotskoj kabini. FMS se sastoji od četiri glavne komponente [11]:

- računala za upravljanje letom (engl. *Flight management system* - FMC),
- automatske kontrole leta ili sustava automatskog navođenja leta,
- navigacijskog sustava zrakoplova i
- sustava elektroničkih instrumenata za letenje (EFIS) ili ekvivalentne elektromehaničke instrumentacija.

FMC je računalni sustav koji koristi veliku bazu podataka kako bi omogućio unaprijed programiranje ruta i unos u sustav pomoću učitavanja podataka. Sustav se stalno ažurira s položajem zrakoplova prema dostupnim navigacijskim pomagalima. Najprikladnija pomagala se automatski odabiru tijekom ažuriranja informacija. Automatski sustav kontrole leta (engl. *Automatic Flight Control System* - AFCS) ili Automatski sustav navođenja leta (engl. *Automatic Flight Guidance System* - AFGS) primaju informacije senzora od drugih sustava zrakoplova. Ovisno o tome je li zrakoplov pod autopilotom ili ručnom kontrolom, odabiri AFCS načina rada koje je izvršila posada ili će se automatski pomicati i kontrolirati kontrolne površine leta zrakoplova ili će prikazati naredbe direktora leta koje pilot treba slijediti kako bi postigao željeni status.

Navigacijski sustav je integrirani paket koji kontinuirano izračunava položaj zrakoplova. Može uključivati ulaze inercijalnog referentnog sustava (engl. *Inertial Reference System* - IRS) i sustave globalnog pozicioniranja (engl. *Global Positioning System* - GPS) uz prijarnike za zemaljska pomagala. U slučaju EFIS-a, prikaz ovih navigacijskih ulaza temelje se na referentnom sustavu za položaj i smjer (engl. *Attitude and heading reference system* - AHRS). Prikaz statusa zrakoplova pruža se ili na EFIS-u ili na konvencionalnim instrumentima i na njemu je uglavnom vidljiv učinak FMS kontrole zrakoplova [11].

Sustav svjesnosti o terenu i upozorenja (engl. *Attitude and heading reference system* - AHRS) predstavlja sustav koji letačkoj posadi pruža dovoljno informacija i upozorenja za otkrivanje potencijalno opasnih situacija na terenu i na taj način posada može poduzeti učinkovite mjere kako bi spriječila CFIT nesreće [12].

2.4 Zrakoplovi četvrte generacije

Najmodernije zrakoplove karakterizira povećana upotreba kompozitnih materijala, turboventilacijskih motora sa visokim omjerom zaobilaženja i naprednijim digitalnim sustavima letenja. Zrakoplovi četvrte generacije su od 1988. godine pa do danas, te je omogućena zaštita omotača leta tehnologijom *fly-by-wire* čime su smanjene nesreće zbog gubitka kontrole u letu (engl. *Loss of Control In-Flight* – LOC-I). *Fly-by-Wire* – FBW predstavlja poluautomatske sustave kontrole leta koji koriste računala za obradu ulaza kontrole leta koje je napravio pilot ili autopilot i šalju odgovarajuće električne signale aktuatorima površine kontrole leta. Ovaj raspored zamjenjuje mehaničku vezu i označuje da pilot ne pomiče izravno kontrolne površine.

Umjesto toga, ulaze čita računalo koje određuje način pomicanja kontrolne površine kako bi se najlakše postiglo ono što pilot želi u skladu od dostupnih zakona kontrole leta. Prednosti smanjene težine, poboljšane pouzdanosti, tolerancije na oštećenja i učinkovitijeg upravljanja manevarskim zrakoplovom, prvi su prepoznate u projektiranju vojnih zrakoplova. Prvi zrakoplov koji ima FBW tehnologiju za sve svoje kontrole leta umjesto izravnog mehaničkog ili hidraulički potpomognutog rada, bio je zrakoplov F-16 1973. godine. FBW omogućava da se nenamjerno povećanje napadnog kuta ili bočnog klizanja otkrije brzo, te da se problem riješi marginalnim skretanjem kontrolnih površina. FBW omogućuje vrlo pouzdane sustave zaštite omotača leta, koji pod uvjetom da FBW sustav funkcionira na normalnoj razini, značajno povećava sigurnost. Budući da je *fly-by-wire* elektronički, mnogo je lakši i manje glomazan od mehaničkih kontrola, što omogućuje povećanje učinkovitosti goriva i fleksibilnosti dizajna zrakoplova. Kako bi se spriječio kvar koji je kritičan za let, većina *fly-by-wire* sustava također ima ugrađenu trostruku ili četverostruku rezervu. Daljnje inovacije sustava su također u razvoju, uključujući *fly-by-wireless*, *fly-by-optics*, *power-by-wire* i još mnogo toga [13].

U zrakoplove četvrte generacije se ubrajaju [4]:

- A320,
- A318/A319/A320/A321,
- A330,
- A340,
- A350,
- A380,
- B777,

- B787,
- *Embraer E-Jets* i
- *Sukhoi Superjet*.

Primjeri najnovijih širokotrupnih zrakoplova su *Airbus A380* (prvi let 2005.), *Boeing 787*, slika 8 (prvi let 2013.). Ova poboljšanja omogućila su veće domete i niže troškove prijevoza po putniku. *Sukhoi Superjet 100* i *Airbus A220* (bivši *Bombardier CSeries*) primjeri su uskotrupnih zrakoplova sa sličnom razinom tehnološkog napretka. Pomalo su se dometi znatno povećali. A350, na primjer, može letjeti 370 minuta od zračne luke za preusmjeravanje što je bio glavni čimbenik u padu proizvodnje zrakoplova s četiri motora, stvarajući mjesto za značajnija poboljšanja sa mnogo učinkovitijim i isplativijim zrakoplovima sa dva motora. Četiri motora su sada potrebna samo za teške zrakoplove (primjerice A380). Jedina mjesta sada koja zahtijevaju četiri motora su letovi iznad Antarktika.



Slika 8. Zrakoplov Boeing 737
Izvor: [14]

Stalno se teži poboljšavanju učinkovitosti rada zrakoplova. Promjene uključuju učinkovitije motore, promjene u aerodinamici i dizajnu krila te sve veću upotrebu kompozitnih materijala u konstrukciji zrakoplova što je bila jedna od glavnih promjena u seriji zrakoplova B737 i A320. Na primjer, svaka nova serija modela 737 je uvodila neka poboljšanja. Serija *Classic* poboljšala je motore i aerodinamiku u odnosu na originalnu seriju; serija *Next Generation* učinila je isto kako bi se natjecala s novim zrakoplovom A320; a serija zrakoplova B737 MAX to je učinila još više kako bi se natjecala sa zrakoplovom A320 NEO. Prema *The 737 Information Site*, postoji poboljšanje učinkovitosti od 14% između serije *Next Generation* i 737 MAX. Isti izvor navodi smanjenje izgaranja goriva od 20% prelaskom sa serije *Original* na seriju *Classic* i daljnjih 7% poboljšanja u seriji *Next Generation*.

Slična evolucija se dogodila sa širokotrupnim zrakoplovima. Serija 777 doživjela je mnoga poboljšanja od svog lansiranja 1989., uključujući poboljšanja učinkovitosti, a novi 777X to će još više postići. Ograničenje veličine zrakoplova neće se tako daleko pomicati do razvoja *Airbusa A380*. Airbus je proučavao razne inačice velikih zrakoplova, uključujući dizajn kombiniranja dva velika trupa zrakoplova jedan pored drugog (temeljen na zrakoplovu A340) što je na kraju dovelo do koncepta zrakoplova

s dvije palube. A380 je službeno najavljen na zračnom sajmu u *Farnboroughu* 1990. godine, s ciljem 15% nižih operativnih troškova od modela 747. Predloženo je nekoliko drugih velikih zrakoplova, koji nikada nisu bili izgrađeni, uključujući:

- *McDonnell Douglas MD-12* s dvije palube, predložen 1993. godine, ali otkazan zbog nedostatka interesa zračnih prijevoznika.
- *Lockheed Martin* je 1996. godine planirao veliki podzvučni transportni zrakoplov s više od 900 mjesta, ali se suočio sa raznim tehničkim problemima.
- Rusija je predložila do 1.000 kapaciteta sjedala, *Sukhoi KR-860*.
- *Boeing* je dvaput predložio da se 747 produži, ali je odustao od toga kako bi slijedio modele od točke do točke s 777.

Zrakoplov A380 predstavlja izniman zrakoplov, ali nije doživio isti uspjeh kao zrakoplov B747 unatoč činjenici da je konačno projektiran zrakoplov sa dvije palube te je doživio samo 251 narudžbu. U vrijeme lansiranja zrakoplova ideja je bila da će ga zračni prijevoznici koristiti za rute velikog kapaciteta, od čvorišta do čvorišta. Kasnije su se preference promijenile, jer su mnogi zračni prijevoznici prešli na model od točke do točke, u čemu su bili učinkovitiji zrakoplovi manjeg kapaciteta. Zbog dizajna su nastala razna ograničenja, zbog velike veličine i velikog raspona krila ograničile su se zračne luke na kojima može raditi. *Boeing* je doskočio problemu A380-tke sa svojim novim 777X, razvijajući sklopive vrhove krila kako bi zaobišao ovaj problem. *Boeing 777X* je bio jedan od najočekivanijih novih zrakoplova, koji je u promet ušao 2021. godine. 777X je najavljivao nevjerojatnu učinkovitost goriva uz inovacije koje su uključivale:

- Najveće motore ikad na civilnom zrakoplovu (iako su također lakši s kompozitnom tehnologijom ventilatora).
- Sklopive vrhove krila kako bi veća krila poboljšala učinkovitost, ali ne i ograničavala operacije u zračnoj luci.
- Kompozitna konstrukcija krila i zaobljeni vrhovi krila.

Uz *Boeing*, zrakoplov A350 je također vrlo štedljiv zrakoplov, s 53% kompozitne konstrukcije i sa "prilagodljivim" krilima koja se pomiču u letu kako bi se smanjio otpor i naprednim aerodinamičkim poboljšanjima oblika krila. Postoji težnja za radikalnom promjenom načina na koji se zrakoplovi pokreću. Korištenje kerozina sve se više predstavlja kao problem u svijetu zbog prevelike proizvodnje ugljika. Opcije koje se trenutno istražuju i razvijaju uključuju baterijsku tehnologiju i energiju vodika. Obje ove tehnologije doživjele su manji razvoj protipa, ali su vjerojatno daleko od usvajanja u dizajnu velikih zrakoplova. Tehnologija baterija mora se poboljšati kako bi se isporučila dovoljna snaga uz prihvatljivu veličinu i težinu baterije. Vodikova energija zahtjeva opsežna ažuriranja motora i tehnologije, kao i velike promjene u infrastrukturi skladištenja i isporuke goriva na globalnoj razini. To su značajni izazovi koji će zahtijevati promjenu fokusa kako bi se omogućilo potrebno ulaganje, ali to se počinje događati tek u nekim područjima [5].

Sljedeća generacija komercijalnih zrakoplova izgledat će znatno drugačije od ovih današnjih. *Boeing* je predstavio koncept dizajna za budući zrakoplov Boeing TTBW (slika 9), koji je napravljen u suradnji s NASA-om (engl. *The National Aeronautics and Space Administration*) i preispituje dizajn krila. Zrakoplov ima transsonično krilo s nosačima (*Transonic Truss-Braced Wing - TTBW*), koje je aerodinamičnije, lakše i tanje od bilo kojeg trenutnog zrakoplova u upotrebi. Najupečatljivija značajka ovog zrakoplova je dizajn i duljina krila. Sa 170 stopa (51 metar), daleko je duži od bilo kojeg uskotrupnog zrakoplova na tržištu. Kako bi kompenzirao raspon krila, krila također imaju sposobnost presavijanja na pola, uz potporu koju pruža rešetka. Sveukupno, zrakoplov bi mogao smanjiti potrošnju goriva za 9% na letu do 3.500 nautičkih milja. Zrakoplov bi mogao ući u upotrebu 2030. godine, te će se možda predstaviti kao rješenje za rasuće tržište uskotrupnih zrakoplova i zamjenu za zrakoplov *Boeinga* B737. *Airbus* predstavlja potpuno novu ideju komercijalnih zrakoplova, s nultom emisijom i novim dizajnom krila na cijeloj liniji [13].



Slika 9. Zrakoplov Boeing TTBW
Izvor: [15]

3. OSNOVNI POSTULATI RAZVOJA AERODROMSKE INFRASTRUKTURE ZA PRIHVAT I OTPREMU ZRAKOPLOVA

Da bi zračni promet mogao napredovati, zračni prijevoznici, putnici i teret trebaju funkcionalnu, sigurnu i pristupačnu infrastrukturu zračne luke. Zračne luke se trebaju neprestano prilagođavati kako bi pružile dovoljno funkcionalne i sigurne infrastrukture za zračne prijevoznike i putnike. Također, važno je kontinuirano razvijati viziju zračnih luka budućnosti koje će se temeljiti na novim tehnologijama čiji je cilj učiniti zračni promet još učinkovitijim [16]. Infrastruktura zračne luke pokriva ogromno područje. Od odmah vidljivih uzletno-sletnih staza i kontrolnih tornjeva do skrivenijih, ali važnih sustava prtljage, operacija na gate-u i sustava rasvjete [17].

Savezna uprava za zrakoplovstvo (engl. *Federal Aviation Administration – FAA*) bavi se standardima dizajna zračnih luka koje pružaju reference i smjernice za projektante zračnih luka i prognostičare koji se baze izradom konstrukcije i konfiguracije svih uzletno-sletnih staza, staza za vožnju, putničkih zgrada i stajanki.

Dizajn ovih površina se temelji na veličini, brzini pristupa i broju zrakoplova za koji se očekuje da će zračna luka opsluživati. FAA je uspostavila Referentni kod zračne luke (engl. *Airworthiness Review Certificate - ARC*), sustav za pomoć dizajnerima u pravilnom određivanju veličine uzletno-sletne staze, staze za vožnju ili stajanke koji je potreban u zračnoj luci. Savjetodavni circular, AC 150/5300-13, Projekt zračne luke, definira ARC kao “sustav kodiranja koji se koristi za povezivanje kriterija dizajna zračne luke s operativnim i fizičkim karakteristikama zrakoplova namijenjenih za letove u zračnoj luci.” Geometrija svih površina zračne luke je dizajnirana posebno za najveći zrakoplov ili grupu zrakoplova koji će letjeti u zračnoj luci. Ovo osigurava da će sve letjelice imati odgovarajuću visinu od prepreka i zahtjeve za razdvajanje tijekom manevriranja na asfaltnim površinama zračne luke [2].

Zračne luke možemo podijeliti prema potrebnoj dužini uzletno-sletne staze na [18]:

- CTOL (engl. *Conventional Take Off and Landing*), za uobičajeno uzlijetanje i slijetanje sa 1.800 m referentnom dužinom uzletno-sletne staze.
- RTOL (engl. *Reduced Take Off and Landing*), za skraćeno uzlijetanje i slijetanje s oko 1.200 m referentnom dužinom uzletno-sletne staze.
- STOL (engl. *Short Take Off and Landing*), za kratko uzlijetanje i slijetanje do 800 m referentnom dužinom uzletno-sletne staze.
- VTOL (engl. *Vertical Take Off and Landing*), za vertikalno uzlijetanje i slijetanje.

Zračne luke koje bi trebale opsluživati zrakoplove nove generacije trebat će proširiti i nadograditi svoje objekte kako bi zadovoljili kriterije. Međutim, kod mnogih zračnih luka, neće biti moguće u potpunosti postići mnoge od potrebnih kriterija projektiranja. Također, u zračnom prometu postoji potreba za povezivanjem s multimodalnim transportnim granama. Za rast zračnog prometa potreban je dovoljan kapacitet zračne luke. Trenutno, 43 europske središnje zračne luke koje još uvijek

pokrivaju 85% europskog prometa su zagušene, a neke dostižu granice svojih kapaciteta. Postoji oko 2.200 drugih zračnih luka u Europi (uključujući 450 glavnih regionalnih zračnih luka) koje su trenutno nedovoljno iskorištene. Ali ove zračne luke često nisu smještene u blizini glavnih naseljenih područja Europe gdje su prometni tokovi najgušći.

3.1 Uzletno-sletna staze

Uzletno-sletna staza predstavlja pravokutnu površinu na aerodromu na zemlji te služi za polijetanje, slijetanje, let i kretanje zrakoplova. Jedna je od najvažnijih aerodromskih površina jer omogućuje zrakoplovu da sigurno uzleti i sleti. Uzletno-sletna staza predstavlja značajan dio cjelokupnog aerodromskog kompleksa. Prilikom određivanja duljine uzletno-sletne staze, za svaku zračnu luku u obzir se uzimaju karakteristike mjerodavnog zrakoplova koji se očekuje na određenoj zračnoj luci. Mjerodavni zrakoplov je onaj koji je dovoljno čest na određenoj zračnoj luci, a čije su karakteristike takve da uz planirani plaćeni teret i gorivo za put zahtjeva najdulju uzletno sletnu stazu. Da bi se odredila ukupna težina zrakoplova u polijetanju, o čemu u konačnici i ovisi sama duljina uzletno-sletne staze, u obzir se uzimaju sljedeći parametric [18]:

- operativna težina praznog zrakoplova,
- plaćeni teret,
- gorivo za put i
- rezervno gorivo.

Gorivo za put ovisi o:

- duljini puta,
- visini leta,
- vjetrovima na putu,
- temperature na putu..

Da bi se odredila težina zrakoplova u slijetanju, dovoljno je da se od težine zrakoplova u uzlijetanju umanji težina goriva za put. Također, pri utvrđivanju potrebne duljine uzletno-sletne staze u obzir se uzimaju sljedeća tri slučajeve:

- slijetanje zrakoplova,
- uzlijetanje zrakoplova u uvjetima rada svih motora i
- uzlijetanje u uvjetima otkaza jednog motora na zrakoplovu.

Od ova tri slučajeve, najdulju uzletno-sletnu stazu zahtjeva uzlijetanje u uvjetima otkaza jednog motora zrakoplova.

Međunarodna organizacija civilnog zrakoplovstva (engl. *International Civil Aviation Organization* - ICAO) dijeli zračne luke, odnosno uzletno-sletne staze, prema

opremljenosti za prilaz i slijetanje na kategorije prema fizičkim karakteristikama zrakoplova (raspon krila) i referentnoj dužini uzletno-sletne staze na razrede, odnosno referentne kodove zračnih luka. U tablici 1 su prikazane minimalne visine odluke i vidljivosti za staze za precizni prilaz.

Tablica 1. Minimalne visine odluke i vidljivosti za staze za precizni prilaz

Kategorija	Visina odluke (m)	Vidljivost uzduž uzletno-sletne staze (m)	Horizontalna vidljivost (m)
I.	≥ 60	≥ 550	≥ 800
II.	≥ 30	≥ 300	-
III. A	< 30 ili 0	≥ 175	-
III. B	< 15 ili 0	≥ 50	-
III. C	0	0	-

Izvor: [19]

Referentni kod zračne luke je prikazan na tablici 2 na kojem je vidljivo da se sastoji od kodnog elementa 1, koji je predstavljen kodnim brojem i kodnim elementom dva, koji je predstavljen kodnim slovom.

Tablica 2. Referentni kod zračne luke

Kodni element 1		Kodni element 2	
Kodni broj	Referentna dužina staze za avion – d (m)	Kodno slovo	Raspon krila – r(m)
1	$d < 800$	A	$r < 15$
2	$800 < d < 1.200$	B	$15 \leq r < 24$
3	$1.200 \leq d < 1.800$	C	$24 \leq r < 36$
4	$d \geq 1.800$	D	$36 \leq r < 52$
		E	$52 \leq r < 65$
		F	$65 \leq r < 80$

Izvor: [19]

Ovisno o kodnom broju i kodnom slovu određuje se sama širina uzletno-sletne staze. Širine staza prikazane su na tablici 3.

Tablica 3. Širina uzletno-sletne staze

Kodni broj	Razmak između vanjskih rubova glavnog podvozja			
	$\check{s} < 4,5$	$4,5 \leq \check{s} < 9$	$6 \leq \check{s} < 9$	$9 \leq \check{s} < 15$
1	18 m	18 m	23 m	-
2	23 m	23 m	30 m	-
3	30 m	30 m	30 m	45 m
4	-	-	45 m	45 m

Izvor: [19]

Pravac pružanja staze je postavljen u odnosu na vjetar kako bi se omogućilo polijetanje i slijetanje u što većem postotku vremena. Prema ICAO-u, koeficijent iskorištenosti staze u odnosu na vjetar trebao bi biti veći ili jednak 95%. U slučaju da jedna uzletno-sletna staza ne zadovolji propisani koeficijent iskoristivosti, potrebna je druga staza ili eventualno treća, sve dok taj uvjet ne postane zadovoljen. Nagib uzletno-sletne staze ili gradijent predstavlja broj koji je dobiven dijeljenjem razlike najviše i najniže točke uzduž središnjice s njenom duljinom. Piloti koriste nagib, zajedno sa čeonim i stražnjim vjetrom, kako bi odredili brzinu koja je potrebna za uspješno polijetanje i slijetanje. Uzdužni nagib uzletno-sletne staze ne bi trebao prelaziti [16]:

- 1% za staze kodnog broja 3 ili 4 i
- 2% za staze kodnog broja 1 ili 2.

Preporuka je da na bilo kojem dijelu staze, uzdužni nagib ne bi trebao prelaziti:

- 1,25% za staze kodnog broja 4, dok za prvu i zadnju četvrtinu staze ne bi trebao prijeći 0,8%.
- 1,5% za staze kodnog broja 3, dok za prvu i zadnju četvrtinu uzletno-sletne staze za precizni prilaz II. i III. kategorije nagib ne bi trebao prelaziti 0,8%.
- 2% za staze kodnog broja 1 ili 2.

Prijelaz između nagiba postiže se zakrivljenom površinom s postotkom promjene do:

- za staze kodnog broja 4 na 30 m iznosi 0,1%,
- za staze kodnog broja 3 na 30 m iznosi 0,2% i
- za staze kodnog broja 1 ili 2 iznosi 0,4%.

Poprečni nagib je od iznimne važnosti kod odvodnje vode s uzletno-sletne staze. Preporuka je da se koristi površina staze s dvostranim nagibom, osim jednostranog nagiba u smjeru vjetra u slučajevima kada je vjetar praćen kišom. U idealnim uvjetima poprečni nagib bi trebao iznositi [18]:

- za staze kodnog broja C, D, E ili F 1,5% i
- za staze kodnog broja A ili B 2%.

Nagibi na uzletno-sletnoj stazi ne bi trebali prelaziti gore navedene postotke osim u slučaju križanja uzletno-sletne staze s drugom stazom ili pak stazom za vožnju gdje su manji nagibi nužni. Poprečni nagibi pri dvostranom nagibu moraju biti simetrični na svaku stranu od središnjice.

Ramena uzletno-sletne staze predstavljaju bitan element staze, jer sprječavaju da se izbjegne oštećenje zrakoplova u slučaju kada izleti sa staze, te da spriječe usisavanje slobodnih predmeta u mlazne motore zrakoplova, koje je izraženije kod

širokotrupnih zrakoplova. Ramena uzletno-sletne staze su sagrađena od kolničke konstrukcije koja je jednake ili malo manje nosivosti kao pripadna uzletno-sletna staza te se prostiru simetrično s obje strane staze. Preporuka je da su ramena uzletno-sletne staze izgrađena na stazama kodnog broja D ili E, a staza manja od 60 m. Ukoliko je širina staze kodnog broja 3 ili 4 manja od 60 m, ukupna širina staze i ramena ne bi trebala biti manja od 60 m, dok širina staze kodnog broja F zajedno sa pripadajućim ramenima ne bi trebala biti manja od 75 m. Sama površina ramena trebala bi biti poravnata s duljinom uzletno sletne staze, dok poprečni nagib ne bi trebao prelaziti 2,5%. Prilikom izletavanja zrakoplova s uzletno-sletne staze nosivost ramena bi trebala biti takva da izdrže opterećenje zrakoplova bez ikakvih strukturnih oštećenja. Također, ramena bi trebala izdržati promet servisnih vozila kao što su vatrogasne, spasilačke ili vozila za održavanje koja se kreću po njima.

Okretnica na uzletno-sletnoj stazi se gradi u slučaju kada sam kraj staze nije povezan sa stazom za vožnju. U tom slučaju se osigurava proširenje kolnika na stazi koji će omogućiti zakretanje zrakoplova za 180 stupnjeva. Veličina i izgled okretnice ovisi o samoj veličini zrakoplova koji se očekuje na njom, odnosno o manevarskim sposobnostima zrakoplova u koje spadaju veličina podvozja i kut zakretanja prednjeg/prednjih kotača [18].

3.2 Staza za vožnju

Za sigurno i brzo kretanja zrakoplova na aerodromu, posebice između uzletno-sletne staze i stajanke koriste se staze za vožnju (engl. *taxiways*). Osnovna podjela staza za vožnju je u dvije skupine:

- one koje spajaju uzletno-sletnu stazu sa stajankom (izlazne, ulazne, ulazno-izlazne, brze izlazne vozne staze,...) i
- one koje služe za vožnju na stajanci (staze za vožnju, staze za vožnju do pozicije).

U ovisnosti o prometu koji se očekuje na aerodromu, određuje se broj, tip i konfiguracija vozni staza. Ako promet na zračnoj luci iznosi manje od 10 operacija na sat, potrebna je jedna do eventualno dvije vozne staze. U slučaju da kraj uzletno-sletne staze nije spojen sa stazom za vožnju, može se osigurati dodatno proširenje kolnika za okretanje zrakoplova. U ovisnosti o kapacitetu manevarske površine, određuje se broj, dispozicija i tip staze za vožnju. Potrebno je osigurati dovoljan broj ulaznih i izlaznih vozni staza da bi se osiguralo brzo kretanje zrakoplova prema uzletno-sletnoj stazi i od nje. Na mjestima na kojima se očekuje velik obujam prometa, trebale bi biti izgrađene brze vozne staze.

Pri izgradnji vozne staze, gleda se da položaj kabine pilota za koji je određena vozna staza bude iznad središnjice staze, te pri tome, udaljenost između ruba vozne staze i vanjskog ruba kotača glavnog podvozja bude minimalno (tablica 4):

Tablica 4. Sigurnosni razmak

Vanjski rub kotača glavnog podvozja	Sigurnosni razmak
$\check{s} < 4,5$	1,5 m
$4,5 \leq \check{s} < 6$	2,25 m
$6 \leq \check{s} < 9$	3 m na ravnim dijelovima i u krivinama za zrakoplove kod kojih je razmak između nosnog kotača i geometrijskog centra glavnog podvozja manji od 18 m 4 m u krivinama za zrakoplove kod kojih je razmak između nosnog kotača i geometrijskog centra glavnog podvozja veći od 18 m
$9 \leq \check{s} < 15$	4 m

Izvor: [19]

Kada se zbroji najveća širina između vanjskih rubova kotača glavnog podvozja zrakoplova i dvostrukog sigurnosnog razmaka od ruba staze za vožnju do ruba kotača glavnog podvozja, dobije se širina staze za vožnju. Na primjer, širina vozne staze za kodno slovo F iznosi $16 \text{ m} + 2 \times 4,5 \text{ m} = 25 \text{ m}$. Širina na dijelu vozne staze koja je ravna, trebala bi biti minimalno (Tablica 5):

Tablica 5. Širina staze za vožnju

Vanjski rub kotača glavnog podvozja	Širina staze za vožnju
$\check{s} < 4,5$	7,5 m
$4,5 \leq \check{s} < 6$	10,5 m
$6 \leq \check{s} < 9$	15 m
$9 \leq \check{s} < 15$	23 m

Izvor: [19]

Uzdužni nagib kod vozne staze bi trebao biti [16]:

- za staze kodnog broja C, D, E ili F do 1,5%
- za staze kodnog slova A ili B do 3%.

Svrha poprečnog nagiba je da bude dovoljan da spriječi nakupljanje vode na površinama staze za vožnju, te iznosi:

- za vozne staze kodnog broja C, D, E ili F do 1,5%
- za vozne staze kodnog broja A ili B, do 2%.

Kada se nastoji postići što brže napuštanje uzletno-sletne staze zrakoplova koji je u slijetanju, umjesto običnih vozniha staza, koriste se brze izlazne vozne staze da se

ostvari što veći broj operacija na uzletno-sletnoj stazi. Preporuka je da polumjer skretanja kod projektiranja brze izlazne vozne staze bude [18]:

- za staze kodnog broja 3 ili 4, 550 m,
- za staze kodnog broja 1 ili 2, 275 m,

te da se ostvari brzina u uvjetima mokrog kolnika:

- za staze kodnog broja 3 ili 4, 93 km/h i
- za staze kodnog broja 1 ili 2, 65 km/h.

Za određivanja lokacije i broja brzih izlaznih vozni staza u obzir da kut pod kojim se križa središnjica brze izlazne vozne staze i uzletno-sletne staze bude od 25 do 45 stupnjeva, a preporuka je 30 stupnjeva.

3.3 Stajanka

Stajanka predstavlja površinu na aerodromu koja se koristi za prihvat i otpremu zrakoplova, odnosno ulazak i izlazak putnika, ukrcaj i iskrcaj robe ili pošte. Veličina zrakoplova utječe na izgled stajanke i opremu za manipulaciju zrakoplovom. Duljina i raspon krila zrakoplova, kao i minimalni radijus okretanja, odrediti će udaljenost između pozicija na stajanci i potrebnom zaštitnom razmaku. U svakom trenutku, neovisno od aerodromskog prometa mora osiguravati parkiranje i održavanje zrakoplova. Također, veličina stajanke na određenom aerodromu ovisi i o intenzitetu prometa koji se očekuje. Ovisno o namjeni, odnosno o svrsi za koju će se koristiti stajanka, dijeli se [18]:

- stajanka za prihvat i otpremu zrakoplova u putničkom prometu,
- stajanka za prihvat i otpremu zrakoplova u robnom prometu,
- stajanka za održavanje zrakoplova ispred hangara i radionica i
- stajanka za izolirani zrakoplov itd.

Stajanka se sastoji od [18]:

- pozicija za zrakoplove,
- vozne staze, dijelova vozni staza koje su namijenjene za vožnju zrakoplova po stajanci,
- vozne staze kojom se dolazi/izlazi s pozicije,
- servisne ceste,
- sigurnosnih razmaka između zrakoplova bilo u stajanju ili kretanju i
- raznih površina za odlaganje opreme.

Da bi se osigurala sigurnost zrakoplova tijekom njegovog boravka na stajanci, nužno je osigurati odgovarajuće zaštitne razmake između pozicija na stajanci koji su prikazani tablicom 6.

Tablica 6. Zaštitni razmaci

Kodno slovo	Udaljenost
A	3 m
B	3 m
C	4,5 m
D	7,5 m
E	7,5 m
F	7,5 m

Izvor: [19]

Za vrijeme prihvata i otpreme, zrakoplov se parkira na određeno mjesto koje se nalazi na stajanci zračne luke koje se naziva parkirna pozicija. Sama veličina parkirnih pozicija se određuje pomoću nekoliko parametara kao što je sama veličina zrakoplova koji se očekuje na parkirnoj poziciji, načini ulaska/izlaska zrakoplova s parkirne pozicije, polumjer okretanja zrakoplova, razne manevarske značajke i drugi čimbenici. Podjela pozicija prema načinu ulaska i izlaska na parkirnu poziciju je na ulazak zrakoplova snagom vlastitih motora, odnosno ulazak snagom vlastitih motora dok je izlazak izgurivanjem. Nadalje, ulazak i izlazak snagom vlastitih motora se dalje dijeli ovisno je li motor zaokretni ili prolazni. Zaokretni sustav parkiranja nadalje se dijeli ovisno o tome je li zrakoplov parkiran nosom prema ili od putničke zgrade, ili je prisutno paralelno parkiranje. Prolazni sustav parkiranja predstavlja ulazak i izlazak zrakoplova s pozicije snagom vlastitih motora. Ove se pozicije nalaze na određenoj udaljenosti od putničke zgrade jer je potrebno osigurati određeni prostor ispred i iza pozicije za samostalno kretanje zrakoplova naprijed i nazad. Na poziciju se mogu parkirati samo oni zrakoplovi koji su jednake veličine kao i sama pozicija ili pak manji od pozicije. U praksi je uobičajeno fleksibilno korištenje pozicija (engl. *Multiple Apron Ramp System* - MARS) gdje se na dvije pozicije koje su namijenjene za veće zrakoplove parkiraju tri manja zrakoplova, te u tom slučaju su potrebna tri aviomosta. Na slici 10 je prikazano fleksibilno korištenje pozicija na stajanci [19].



Slika 10. Sustav fleksibilnog parkiranja
Izvor: [20]

3.3.1 Stajanka za dulje parkiranje zrakoplova i izolirana parkirna pozicija

Kako svjetska flota raste, povećava se i potreba za „skladištenjem“ nekih od zrakoplova. Trenutno postoji oko 2.000 zrakoplova koji su neaktivni i parkirani na stajanci. Stajanka za dulje parkiranje zrakoplova se koristi u velikim svjetskim zračnim lukama i u zračnim lukama s domicilnim zračnim prijevoznikom. Na ovu stajanku se parkiraju zrakoplovi koji čekaju više sati po redu letenja te za neispravne zrakoplove, rezervne i slično. U ovisnosti o okolnostima, zrakoplov se može povući iz pogona na samo nekoliko dana ili do nekoliko godina. Što više zrakoplovi provedu na stajanci za dulje parkiranje zrakoplova, to im je teže vratiti se u aktivnu službu. Kada se zrakoplov skladišti, mora se pažljivo održavati kako bi se izbjegle štetne posljedice neispravnosti, kao i kako bi se osigurao pravilan povratak u operativni status. Na ovoj stajanci također se može odvijati recikliranje zrakoplova odnosno rashod ili prodaja rabljenih rezervnih dijelova zrakoplova. Prilikom odabira lokacije za ovu zračnu luku, treba se odabrati mjesto sa suhom i sunčanom klimom i malo padalina. Željeznička povezanost predstavlja veliku konkurentsku prednost. Zbog činjenice da se zrakoplovi ne pokreću snagom vlastitih motora, nego izgurivanjem, zrakoplovi na stajanci ne trebaju biti striktno parkirani prema uputama ICAO-a [21].

Izolirana parkirna pozicija se koristi za parkiranje zrakoplova za koje postoji utvrđena sumnja da je predmetnom nezakonitog djelovanja ili je pak iz nekog drugog razloga odvojen od normalnih aerodromskih aktivnosti. Udaljenost izolirane pozicije od ostalih pozicija, zgrada, itd treba biti što je više moguće ali nikako ta udaljenost ne smije biti manja od 100 metara. Izolirana pozicija ne bi smjela biti pozicionirana iznad nadzemnih instalacija kao što su komunikacijski ili električni kabeli, plinovodi,

gorivovodi i sl. Na slici 11 je prikazana izolirana parking pozicija Zračne luke Kuala Lumpur.



Slika 11. Izolirana parkirna pozicija
Izvor: [22]

3.3.2 Stajanka za održavanje zrakoplova i stajanka za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja

Ispred hangara za održavanje zrakoplova, najčešće je smještena stajanka za održavanje zrakoplova koja treba biti veličine pozicije barem kao i zrakoplov. Ova stajanka služi za parkiranje i održavanje zrakoplova. Na zračnim lukama gdje je zračni promet relativno intenzivan i gdje se često pojavljuje zaleđivanje planira se stajanka za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja. Može se nalaziti na stajanci ili na posebnim površinama uz stazu za vožnju koje su povezane na uzletno-sletnu stazu. Na ostalim zračnim lukama se postupak odleđivanja i zaštite zrakoplova protiv zaleđivanja vrši na stajanci za prihvat i otpremu zrakoplova. Tijekom odleđivanja i zaštite zrakoplova od zaleđivanja treba se paziti da ove radnje ne utječu na redovit aerodromski promet [18]. Stajanka za odleđivanje i zaštitu zrakoplova od zaleđivanja je prikazana na slici 12.



Slika 12. Stajanka za odleđivanje i zaštitu zrakoplova protiv zaleđivanja
Izvor: [23]

3.4 Putnička zgrada

Putnička zgrada, odnosno putnički terminal je namijenjen za prihvat i otpremu putnika i njihove prtljage. Dok vanjske dimenzije zrakoplova utječu na dizajn zračne luke, kapacitet putnika u zrakoplovu utječe na zračnu zonu. Zapravo, jedna od glavnih funkcija putničkog terminala je promjena vrste kretanja, odnosno skupine putnika koji dolaze u zračnu luku preformulirati u male grupe koje će zajedno biti uvedene u zrakoplov koji će ponovno biti podijeljene u zračnoj luci dolaska. To znači da će, bez obzira na veličinu zrakoplova, svi putnici morati biti obrađeni u kratkom vremenskom razdoblju. Nadalje, većina putnika bi radije se ukrcala u zrakoplov što je god moguće bliže planiranom vremenu polaska, iskorištavajući maksimalnu slobodu kretanja prije ulaska u zrakoplov [24].

U zgradi se nalazi cijeli niz komercijalnih sadržaja čiji je prvotni cilj udovoljavanje potreba putnika, kao što su restorani, *duty-free* shopovi i sl. Tijekom planiranja izrade putničke zgrade, potrebno je naći rješenje koje će omogućiti brzo, praktično i komforno kretanje putnika i prtljage sa što manjim mogućim troškovima. Također, potrebno je uzeti u obzir da putnička zgrada treba imati što bolju povezanost sa gravitacijskim područjem. Od velike je važnosti da je izgrađeno i osigurano parkiralište kao i garažni prostor ispred terminala. Ukoliko je putnička zgrada bliže uzletno-sletnoj stazi, sami troškovi zračnih operacija su jeftini i produktivniji [24].

Putničke zgrade, prema glavnim funkcionalnim površinama se dijele na površine i sadržaje smještene ispred putničkog terminala na kopnenoj strani, u putničkoj zgradi i uz putničku zgradu na zračnoj strani. Površine ispred putničkog

terminala na kopnenoj strani služe za kraće zadržavanje cestovnih motornih vozila te za ulazak/izlazak putnika u/iz putničkog terminala. Površine i sadržaji u putničkoj zgradi služe prvenstveno za prihvat i otpremu putnika i prtljage. Također, razlikuju se različite funkcije putničke zgrade kao što su:

- promjena modaliteta prometa (iz cestovnog, vodnog, željezničkog u zračni i obratno),
- prihvat i otprema putnika, prtljage, robe i pošte u dolasku i odlasku, transferu i tranzitu i
- promjena tipa kretanja (u odlasku putnici mogu dolaziti grupno ili individualno, dok nakon procesiranja se skupljaju u izlaznoj čekaonici za ulazak u zrakoplov).

Putnički terminali, tehničko-tehnološki se dijele prema:

- centraliziranoj i decentraliziranoj tehnologiji prijehvata i otpreme putnika i prtljage,
- horizontalnoj i vertikalnoj distribuciji tokova putnika i prtljage.

Ovisno o potrebi i samoj količini prometa, postoji nekoliko konfiguracija putničkih terminala. Konfiguracija putničkih zgrada prema horizontalnoj distribuciji se dijeli na:

- jednostavnu,
- linearne,
- fingerske,
- satelitske,
- kombinirane,
- višeterminalne i
- hibride, a prema vertikalnoj distribuciji na
- jednoetažne,
- jednoipoletažne i
- dvoetažne.

Za male i nekada srednje zračne luke, gradi se jednostavna putnička zgrada koja predstavlja jednoetažnu centraliziranu zgradu sa svim svojim tokovima u prizemlju terminala. Uz manji broj zrakoplova na stajanci, transfer putnika do zrakoplova na stajanci obavlja se vođenjem zemaljske domačine/domaćina. Kada je prisutan veći broj zrakoplova na stajanci, prijevoz putnika od putničkog terminala do zrakoplova se obavlja autobusima. Ova koncepcija je predstavljena nižom kvalitetom usluge u prijehu i otpremi putnika. U svijetu, većina putničkih terminala, a osobito oni na malim zračnim lukama, su jednostavne i centralizirane koncepcije [24].

Linearna konfiguracija putničke zgrade je najčešće predstavljena jednoipoletažnim ili dvoetažnim terminalom koji je aviomostovima na gornjoj etaži povezan sa zrakoplovima te može biti decentralizirana i centralizirana. Cilj ove koncepcije je da omogući vrlo kratke veze između zrakoplova i parkirališta što je izuzetno važno za putnika jer mu omogućuje da parkira automobil u neposrednoj blizini putničke zgrade. Prednost ove konfiguracije se očituje u odlasku, ali je nedostatak u dolasku i transferu zbog toga što putnik može pješaćiti i do nekoliko kilometara.

Linearna konfiguracija omogućuje dobru kvalitetu usluge lokalnim putnicima dok je transfernim putnicima niža razina kvalitete. Na zračnim lukama, kada promet iznosi više od 10 milijuna putnika godišnje, putnički terminal posjeduje više od stotinjak pozicija za parkiranje te je dug preko nekoliko kilometara. Za transfernog putnika, te putnika u dolasku, možda će biti potrebno da dođe na poziciju koja može biti udaljena nekoliko kilometara. Nužno je omogućiti dobar sustav povezivanja zračne strane zbog prijevoza do odlaznog leta za transferne putnike koji se na većim zračnim lukama uobičajno odvija tračničkim sustavima. Za putnike u dolasku, također treba osigurati dobro povezivanje između zemaljske strane putničkog terminala zbog što bržeg dolaska do automobila na parking, koji se u većini slučajeva odvija tračničkim sustavima ili autobusima. Ovakav koncept putničke zgrade omogućuje lokalnim putnicima visoku razinu usluge prihvata i otpreme, no nižu kvalitetu transfernim putnicima. Primjeri decentralizirane linearne koncepcije putničkog terminala su: Berlin-Tegel (slika 13), Dallas – *Forth Worth* i *Hannover*, a centraliziranu predstavljaju: London – *Heathrow* Terminal 4, Budimpešta, Pariz – *Charles de Gaule* (novija zračna luka) i München [24].

Polovinom prošlog stoljeća predstavljena je fingerska koncepcija putničkog terminala. Putnička zgrada sa fingerima predstavlja dogradnju na centralnu putničku zgradu zbog rasta potražnje za zračnim prostorom. Financijski, ova konfiguracija se pokazala isplativom jer su u središnjem dijelu i dalje ostale osnovne funkcije, a fingeri predstavljaju hodnike koji povezuju središnju zgradu sa čekaonicama koje se nalaze uzduž fingera. Razlika u udaljenosti od centralne zgrade do udaljenijih čekaonica može biti i do nekoliko stotina metara, ali ako je duljina hodnika veća od 300 metara, preporuka je da se postave pokretne trake. Ovaj koncept putničke zgrade zadovoljava visoku kvalitetu u procesu prihvata i otpreme putnika i prtljage te je učestao u državama koje imaju srednje i veće zračne luke. Zračne luke Frankfurt (slika 14), *Schiphol* u Amsterdamu, *Zurich*, London – *Heathrow* Terminal 3, Bangkok i mnoge druge posjeduju fingersku koncepciju putničke zgrade [24].

Satelitska konfiguracija putničke zgrade je vrlo slična fingerskoj. Putnička zgrada sa satelitima predstavlja nadogradnju centralne putničke zgrade čije su čekaonice oblikovane u satelitu. U nekim satelitskim koncepcijama, hodnik ne služi za prihvata zrakoplova te je smješten podzemno da bi se ostvarila veća sloboda kretanja zrakoplova po stajanci te samim tim povećao kapacitet satelita. U satelitu, smještene su izlazne čekaonice. U slučaju većih udaljenosti između centralne zgrade i satelita, u hodniku je uobičajeno da su ugrađene pokretne trake. Kod velikih putničkih terminala, čiji godišnji promet premašuje 10 milijuna putnika, u pravilu su ugrađene nadzemne ili podzemne tračničke veze. Kvaliteta usluge prihvata i otpreme putnika i prtljage kod ove konfiguracije putničke zgrade je zadovoljavajuća te ostvaruje velik godišnji promet. U svijetu, najveće zračne luke su predstavljene zgradama koje imaju izduljen oblik s obostranim aviomostovima te su povezane s centralnim putničkim terminalom podzemnim tračničkim sustavom. Zračna luka *Stansted* u Londonu, Tokio – *Narita* Terminal 2 i u Parizu – *Charles de Gaule* Terminal 1 (slika 15) sa centralnom okruglom

zgradom i sedam satelita oko nje su primjeri satelitskih konfiguracija putničkih terminala [24].

Kod kombinirane konfiguracije putničke zgrade središnji dio sadržava veći broj funkcija u procesu prijehata i otpreme putnika i prtljage. Središnja zgrada je linearna ili je pak s fingerima i odmaknutim satelitima. Neke zračne luke zbog nemogućnosti proširenja dograđivale su nove putničke terminale s tim da su stari ostali još u funkciji. Takav koncept nazivamo višeterminalnom konfiguracijom putničkog terminala. Ova konfiguracija omogućuje postizanje vrlo visoke razine usluge u putničkom prometu. Putnička zgrada nove zračne luke u Kuala Lumpuru i Terminal 5 Zračne luke Heathrow (slika 16) su jedne od najpoznatijih primjera ove konfiguracije putničke zgrade.

Zračne luke, koje su tijekom svog razvoja, bile u nemogućnosti proširiti prvotnu putničku zgradu su razvijale višeterminalnu konfiguraciju. Velik broj zračnih luka u Londonu posjeduje takvu konfiguraciju putničkih zgrada kao što su Frankfurt, London – *Gatwick* i Pariz – *Charles de Gaulle*. U SAD-u, velik broj zračnih luka posjeduje i veliki broj putničkih terminala jer je uobičajeno da veliki zračni prijevoznici grade i eksploatiraju putničku zgradu. Zračne luke New York – J. F. *Kennedy* (slika 17), New York – *La Guardia* su primjeri takvih eksploatacija. Unatoč činjenici da se sa stajališta broja putničkih terminala takve zračne luke smatraju decentralizirane, upravo ti terminali predstavljaju skupinu centraliziranih putničkih terminala [24].

U svijetu, velik broj putničkih terminala posjeduje aviomostove koji imaju otvorene pozicije do kojih se putnici u većini slučajeva prevoze autobusima. Prijevoznici koji pružaju nižu razinu usluge koriste ove usluge u vrijeme vršnih opterećenja zbog niže cijene prijehata na otvorenoj poziciji u odnosu na cijenu pozicije uz aviomost. Korištenje otvorenih pozicija je ekonomske prirode zbog neisplativosti aerodromskih poduzeća za posjedovanjem aviomostova koji će se koristiti maksimalno dva puta na dan. Putnici se najčešće do tih pozicija prevoze autobusima ili posebnim vozilima s podiznom kabinom koja omogućava da putnici izravno ulaze uz/iz zrakoplova. Omjer pozicija uz putnički terminal, s aviomostom u odnosu na otvorene pozicije bez aviomosta iznosi 1:2 do 2:1. Hibridna konfiguracija putničkog terminala se može samo uvjetno prihvatiti jer većina putničkih terminala koji pripadaju u hibridnu konfiguraciju, ujedno i pripadaju u neku od prethodno navedenih konfiguracija [24]. Zračna luka O'Hare (slika 18) je primjer takve konfiguracije.



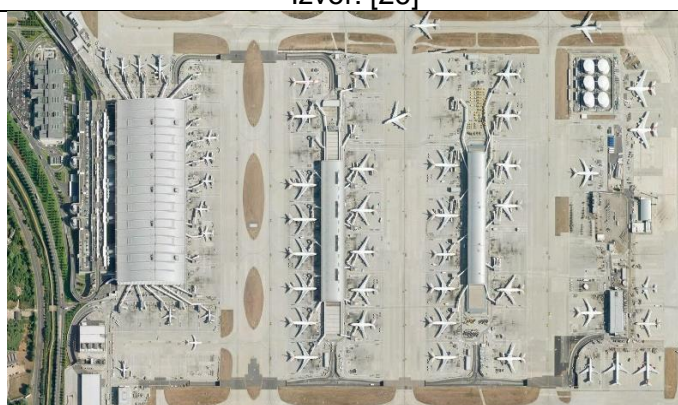
Slika 13. Zračna luka Berlin – Tegel
Izvor: [25]



Slika 14. Zračna luka Frankfurt - Terminal 1
Izvor: [26]



Slika 15. Zračna luka Charles de Gaulle
Izvor: [27]



Slika 16. Zračna luka Heathrow - Terminal 5
Izvor: [28]



Slika 17. Zračna luka John F. Kennedy
Izvor: [29]



Slika 18. Zračna luka O'Hare
Izvor: [30]

Bitna karakteristika centraliziranih putničkih terminala jest da imaju sve ili većinu primarnih tehnoloških sadržaja jedne vrste na istom mjestu. U primarne tehnološke sadržaje spadaju registracija putnika i prtljage, zaštitni pregled, kontrola putovnica i sl. Prednosti centraliziranog putničkog terminala su što je potrebno manje zgrada, samim tim i prostora, potrebno je manje osoblje, veća je iskoristivost kapaciteta i što su jednostavniji tokovi putnika u dolasku i odlasku. Nedostatci se očituju u problemima sa kapacitetom, velikom udaljenosti za kretanje putnika i kompleksnom sortirnicom. Kod

decentraliziranog putničkog terminala, sve ili većina primarnih tehnoloških sadržaja za svaki let pojedinačno su na istom mjestu čime se postižu kraće udaljenosti za kretanje putnika te manji zahtjevi u sortirnici. Nedostaci su što se potrebne duplikacije većine sadržaja čime se postiže povećavanje troškova, potreban je velik broj osoblja te je veća potražnja za prostorom.

Prema etažnosti putničkog terminala vrši se sljedeća podjela na jednoetažne, jednoipoetažne i dvoetažne putničke zgrade. Jednoetažna putnička zgrada se gradi pri malom obujmu prometa. I putnički i tokovi prtljage su u jednoj razini. Jednoipoetažna putnička zgrada je pri srednjem i većem prometu gdje je potrebno više prostora u putničkom terminalu, posebice za čekaonice. U prizemlju zgrade su služba registracije putnika i prtljage, nekada i kontrole na odlasku. Na katu se nalaze čekaonice, izlazne čekaonice, hodnici, ugostiteljski sadržaji, prodavaonice, toaleti itd. Putnici u odlasku idu kroz aviomostove u zrakoplov, a u dolasku aviomostom dolaze na razinu prvog kata te se spuštaju u prizemlje. U prizemlju se razvrstava prtljaga koja je odvojena od putnika u odlasku i dolasku. Dvoetažna putnička zgrada karakteristična je za zračne luke sa srednjim i velikim prometom. U gornjoj etaži se odvija odlazni tok putnika, a u donjoj dolazni. Prtljaga, nakon registracije, odvojeno od putnika se prevozi u prizemlje gdje se vrši razvrstavanje gdje se zatim odvozi do zrakoplova. U odlasku putnici prolaze kontrole te ulaze u čekaonice, a putnici kojima se zrakoplov nalazi na otvorenoj poziciji spuštaju se iz kata na zračnu stranu u čekaonicu u prizemlju te se potom prevoze autobusima do otvorenih pozicija odnosno zrakoplova. U dolasku, putnici aviomostovima stižu na razinu prvog kata te se spuštaju u prizemlje. U dolasku, putnici sa strane stajanke ulaze u autobuse do putničke zgrade na razini prizemlja gdje pristupaju daljem procesu prihvata i otpreme putnika.

Od svih komponenti sustava obrade putnika na koje utječe kapacitet zrakoplova, ističu se sljedeće:

- prostorije za prijavu,
- čekaonice za odlazak i dolazak i
- sustav rukovanja prtljagom.

Broj šaltera za prijavu se mora povećati s povećanjem kapaciteta zrakoplova, ako se želi postići zahtijevana razina usluge. Veći zrakoplov kao što su zrakoplovi nove generacije, zahtijevaju veći broj šaltera za prijavu. Kod dimenzioniranja čekaonica za odlazak je važna je stopa ukrcaja, odnosno broj putnika po jedinici vremena. U većini slučajeva, ova se stopa može smatrati istom za svaki zrakoplov, neovisno o veličini zrakoplova. No međutim, za zrakoplove koji prevoze više od 500 putnika potrebno je više vremena da se ukrcaju svi putnici. Proizvođači proučavaju održivost sustava ukrcaja na dvije razine, koji bi omogućili više stopa ukrcaja što bi povećalo broj putnika koje bi trebalo opsluživati u salonima u putničkim terminalima. Naposljetku, sustavi za rukovanje prtljagom također moraju zadovoljiti očekivane zahtjeve u vršnim satima, ako se želi izbjeći kašnjenje. Ovo uključuje satni kapacitet transportnih sustava, duljinu i broj *conveyora* za preuzimanje prtljage i veličinu prostorije za preuzimanje prtljage. Duljina *conveyora* koju je predložio Međunarodno udruženje zrakoplovnih prijevoznika

(engl. *International Air Transport Association - IATA*) za zrakoplove nove generacije je 110 metara. U zračnim lukama gdje tako dugačak conveyor ne stane u zgradi terminala, trebala bi se izgraditi dva manja [24].

4. PRILAGODBA AERODROMSKE INFRASTRUKTURE U FUNKCIJI PRIHVATA I OTPREME ZRAKOPLOVA NOVE GENERACIJE (STUDIJA SLUČAJA)

Karakteristike samih zrakoplova imaju važnu ulogu u planiranju izgradnje zračne luke. I zračna luka i kopneno planiranje temelje se na radnim karakteristikama zrakoplova kojim će se upravljati u zračnoj luci. Na strani zračne luke mjerodavni zrakoplov će odrediti duljinu i širinu uzletno-sletne staze, minimalnu udaljenost između staza za vožnju i čvrstoću kolnika. Dodatno, ekološki problemi kao što su buka i onečišćenje zraka, također nastaju zbog zrakoplova koji koriste zračnu luku. Kod putničkih terminala, karakteristike zrakoplova utjecati će na broj i veličinu vrata, a posljedično i na konfiguraciju terminala. Kapacitet putnika u zrakoplovu, utjecati će na veličinu objekata unutar terminala, poput putničkih salona i sustava za obradu putnika i veličine sustava za rukovanje prtljagom. Sa druge strane, zračne luke su se morale prilagoditi zrakoplovima nove generacije da bi ih mogli primiti. Troškovi prilagodbe zračne luke za prihvat većeg zrakoplova postali su toliko visoki da su proizvođači zrakoplova bili primorani pretraživati nova rješenja za prilagodbu postojećih zračnih luka zrakoplovima [31].

Uz predviđenu stopu rasta od 5% godišnje, predviđa se da će se zračni putnički promet udvostručiti u narednih 15 godina i utrostručiti u 20 godina. Kako bi proizvođači zrakoplova zadovoljili ovu potražnju, razvili su „*super-jumbo*“ *jet*, zrakoplov koji će biti sposoban prevoziti od 555 do najviše 800 putnika. Prvi od ovih zrakoplova bio je *Airbus A380*, koji je ušao u promet početkom 2006. godine, čime je i započela nova era u zračnom prometu. Europski proizvođač zrakoplova najavio je čvrste obveze sve većeg broja svjetskih zrakoplovnih tvrtki za ovaj zrakoplov. *Singapore Airlines*, *Air France*, *Virgin Atlantic*, *Emirates*, *Qantas Airways* i *Qatar Airways* su sve naručile zrakoplov *A380*. Ovaj zrakoplov je u stanju prevoziti puno više putnika na svakom zrakoplovu od svojih prethodnika, te zbog toga zračne luke su morale početi planirati potrebne sadržaje i usluge za rukovanje većim brojem putnika koji će početi putovati kroz njihove terminale. Da bi zračne luke mogle smjestiti neke od najvećih putničkih zrakoplova nove generacije, morale su se napraviti razne modifikacije. U ovoj studiji slučaja, prikazano je kako se Zračna luka *Heathrow* prilagodila zrakoplovu *Airbus A380*, te koje je sve modifikacije napravila u infrastrukturi da bi ovaj zrakoplov bio primljen [31].

4.1 Zrakoplov A380

Zrakoplov *Airbus A380*, prikazan na slici 19, je najveći i najprostraniji putnički zrakoplov na svijetu, s kabinom koja omogućava putnicima komfor i udobnost tijekom krstarenja, te pruža priliku putnicima da se kreću po kabini za vrijeme leta. Zrakoplov

posjeduje dvije palube, glavnu i gornju, te s brojem sjedala koji je veći od bilo kojeg drugog zrakoplova, zrakoplov *Airbus A380* nudi rješenje za porast prometa i zagušenja zračnih luka. A380 je postavio novi standard za svjetsku zrakoplovnu industriju. Također, podigao je standarde zaštite okoliša sa svojom niskom potrošnjom goriva po putniku i niskom razinom buke – kao i smanjenom emisijom CO₂ i NO_x, što se prenijelo na buduće generacije zrakoplova. A380 je poznat po niskoj emisiji buke, te u mnogim slučajevima, veća površina krila omogućuje znatno sporije slijetanje, što stvara upola manju buku u odnosu na velike zrakoplove prethodne generacije. Kokpit zrakoplova A380 prikazan na slici dijeli sličnu ergonomiju kao i dizajn pilotske kabine drugih *Airbusovih* obitelji letjelica te nudi napredne tehnološke značajke koje uključuju velike interaktivne zaslone, napredni sustav upravljanja letom i poboljšanu navigaciju. Sustav za navigaciju u zračnoj luci (engl. *Onboard Airport Navigation System - OANS*), razvijen je u suradnji s *Thalesom* za zrakoplov A380 te je sada raspoređen na druge tipove *Airbusa* (A329neo, A330neo i A350). OANS nudi pilotima preglednu kartu stajanke i rulnih staza, kao i prikaz položaja zrakoplova na toj karti. OANS pomaže smanjiti pogreške u površinskoj navigaciji i spriječiti upade na uzletno-sletnoj stazi. A380 je također prvi u arhitekturi 2H/2E sustava, gdje su tradicionalna tri hidraulička kruga zamijenjena s dva hidraulička i dva električna sustava, kako bi se smanjila težina, poboljšala redundantnost sustava i sigurnost.



Slika 19. Zrakoplov Airbus A380
Izvor: [32]

Ključna inovacija zrakoplova A380 je korištenje elektroničke knjižnice koja u velikoj mjeri zamjenjuje tradicionalnu papirnatu dokumentaciju koju koriste piloti. Ova knjižnica omogućuje posadama za letenje i održavanje da lako lociraju relevantne operativne informacije u različitim priručnicima leta, popisima i dnevnicima, istovremeno omogućujući optimizaciju performansi i izračunavanja težine i ravnoteže što je međuostalom ugrađeno u novu generaciju zrakoplova. *Airbus* je predstavio svoju inovativnu tehnologiju *Brake-to-Vacate* na zrakoplov A380, omogućujući letačkim posadama da učinkovitije upravljaju prilaskom i slijetanjem unaprijed odabranim optimalnim izlaskom iz uzletno-sletne staze. Ova tehnologija može smanjiti vrijeme

popunjenosti uzletno-sletne staze i do 30% i što značajno povećava broj zrakoplova kojima mogu upravljati svjetske zračne luke. Ova tehnologija je također ugrađena u zrakoplove *Airbus A350* [31].

Glavna instrumentalna ploča zrakoplova A380 uključuje osam identičnih i izmjenjivih jedinica zaslona s tekućim kristalima, koji pružaju primarni prikaz leta, navigacijski zaslon, dva višenamjenska zaslona s kontrolom pokazivača putem kuglice, zaslon upozorenja motora i zaslon sustava. Veća veličina zaslona pruža povećanu perspektivu za pilote i omogućuje poboljšane načine prezentacije, kao što je funkcija svjesnosti okomite situacije koja predstavlja "vertikalni rez" putanje zrakoplova koji uključuje putanju leta, teren i informacije o vremenu.

Najnovija dostignuća u strukturama i materijalima uključuju upotrebu naprednih aluminijskih legura za krilo i trup, zajedno s opsežnom primjenom kompozitnih materijala u primarnoj strukturi kutije središnjeg krila, rebrima krila i stražnjem dijelu trupa. Zrakoplov A380 također uključuje *Glare TM* materijal u gornji i bočni omotač trupa pod tlakom. *Glare TM* je laminat koji uključuje naizmjenične slojeve ljepljiva od aluminijske legure i ljepljiva ojačanog staklenim vlaknima, a njegova svojstva su optimizirana podešavanjem broja slojeva i orijentacije staklenih traka. To nudi značajno smanjenje težine te pruža napredne karakteristike otpornosti na zamor i oštećenja. Dvije opcije motora s visokim omjerom zaobilaženja (motor *Alliance GP7200* i *Rolls-Royceov Trent 900*) prikazani na slici 20 kombiniraju se sa naprednim dizajnom krila i stajnog trapa, što A380 čini znatno tišim od ostalih velikih zrakoplova – omogućavajući ovom zrakoplovu da ispuni stroge lokalne propise u zračnim lukama diljem svijeta. Sa novim dizajnom krila i kompozitnim materijalima koji čine 25% njegove strukturne težine, A380 je izrazito učinkovit zrakoplov. Pouzdanost i mogućnost održavanja A380 dodatno su povećani suvremenom tehnologijom, uključujući poboljšani središnji sustav održavanja na brodu i generatore promjenjive frekvencije koji pojednostavljuju mrežu proizvodnje električne energije. Hidraulički sustav A380 od 350 kg/cm² rezultira cijevima manjeg promjera, kao i smanjenjem količine hidrauličke tekućine na brodu. 350 kg/cm² se sada također koristi u A350. Sustav *Brake-to-Vacate* olakšava zagušenje u zračnoj luci i smanjuje vrijeme zadržavanja zrakoplova na uzletno-sletnoj stazi. Omogućavajući pilotima da odaberu izlaz iz uzletno-sletne staze dok se zrakoplov približava slijetanju, *Brake-to-Vacate* koristi automatski let, kontrolu leta i sustave automatskog kočenja za reguliranje usporavanja nakon dodira. To omogućuje zrakoplovu da stigne do određenog izlaza pravilnom brzinom pod optimalnim uvjetima. Sustav je dodatna sigurnosna mjera koja pomaže u izbjegavanju izleta iz uzletno-sletne staze [31].



Slika 20. Motor zrakoplova Airbus A380
Izvor: [31]

Zrakoplov A380 je dizajniran kako bi smanjio vrijeme na izlazu tijekom kritičnih faza za zračne prijevoznike: ukrcaj i iskrca putnika i opskrbu zrakoplova hranom i pićem za sljedeći let. Dizajn zrakoplova omogućuje zračnim prijevoznicima da brzo ukrcaju i iskrcaju putnike – čak i bez izravnog pristupa ukrcaju na gornjoj palubi, te da optimiziraju vrijeme dostave hrane, koja se istovremeno obavlja na gornjoj i glavnoj palubi da bi se skratilo vrijeme koje zrakoplov provede na zemlji. Oprema za zemaljsko servisiranje je u upotrebi otkako je zrakoplov započeo komercijalne letove i kompatibilna je s drugim širokotrupnim zrakoplovima. Ukrcaj na gornju palubu pruža dodatnu mogućnost da se putnicima ponude prilagođene usluge. Neki su zračni prijevoznici stvorili besprijekoran prijelaz sa zemlje na zrakoplov, sa namjenskim salonima za premium putnike koji omogućuju izravan ukrcaj na gornju palubu A380 [31].

Program izgradnje zrakoplova A380 bio je pokretač transformacije male tvrtke *Airbus-Industrie* u integriranu tvrtku *Airbus* koja je sada vodeća u svijetu zrakoplovstva. Svi daljnji Airbusovi modeli zrakoplova, imali su koristi od mnogih inovacija koje su razvijene s zrakoplovom A380. Do danas je isporučeno 249 zrakoplova A380 za 14 kupaca. Operatori A380 su: *Asiana, British Airways, China Southern, Emirates, Etihad, Korean Air, Lufthansa, Malaysia Airlines, Qantas, Qatar Airways, Singapore Airlines, Thai Airways i ANA*. Danas *Airbusov* zrakoplov radi na više od 70 odredišta, te je preko 400 zračnih luka u svijetu kompatibilno sa zrakoplovom i u mogućnosti ga je prihvatiti i otpremiti na stajanci. Više od 50% kapaciteta A380 je iz/do/unutar azijsko-pacifičke regije, od čega je oko 15% na regionalnim letovima unutar Azije. Za pouzdanost rada samog zrakoplova se uzima više od 99%. I danas se smatra da je zrakoplov A380 najbolje rješenje za rast prometa, pogotovo na mjestima gdje je kapacitet zračne luke ograničen i gdje se rast prometa udvostručuje svakih 15 godina. Prednost je i to što zrakoplov proizvodi upola manje buke u odnosu na zrakoplove prethodne generacije. A380 ima niže emisije, koje su znatno ispod međunarodnih smjernica:

- NOx 30% ispod CAEP/6, 16.4 EPNdB margina buke prema ICAO Poglavlju 4,

- 33% bolje sagorijevanje goriva i emisija CO₂ u usporedbi s prethodnom generacijom zrakoplova.

Kabina zrakoplova se ističe po mnogim kriterijima:

- Kabina je šira zbog širih sjedala (do 49 cm u ekonomskoj klasi).
- Postojanje više osobnog prostora za putnike i povećanje komfora.
- Ukupna površina kabine je 550 m².
- Kabina na glavnoj palubi je najšira od svih zrakoplova, 51 cm je šira od kabine zrakoplova B747.
- Kabina na gornjoj palubi je 180 cm šira od kabine B747.
- A380 nudi čist zrak preko HEPA filtera koji predstavlja visoku učinkovitost pri odvodnji čestica (uklanja se više od 99,9% čestica u zraku).
- Klima uređaj: 6 ulaza za zrak (do sada je bilo tipično 4).
- Kabina podjeljena u 15 različitih zona kontrole temperature, temperature u svakoj može varirati između 18 i 30 °C.
- A380 dopušta 545 sjedala u standardnoj konfiguraciji u 4 klase bez utjecanja na udobnost putnika .
- Kabina A380 omogućuje zračnim prijevoznicima da smjeste 232 sjedala više (+75%) od 747-400 i 199 sjedala više (+60%) od 747-8 u konfiguraciji rasporeda sjedala u četiri klase.

Zrakoplovu A380 je potrebna 300 m kraća uzletno-sletna staza za polijetanje i slijetanje od njegovog glavnog konkurenta Boeinga B747. Zrakoplov zahtjeva manju brzinu prilaza (istu kao i zrakoplov A320). U standardnoj klasi, s 545 sjedala, mogućnost dometa iznosi 8.000 nm -15.000 km. Standardno vrijeme isporuke iznosi 90 minuta uključujući vrijeme ukrcaja manje od 30 minuta i vrijeme iskrcaja, manje od 15 minuta. U sljedeće dvije tablice, prikazani su podaci o zrakoplovu A380. U tablici 7 prikazane su same dimenzije zrakoplova, a u tablici 8 operativni podaci o zrakoplovu.

Tablica 7. Dimenzije zrakoplova A380

Ukupna duljina:	72.7m
Visina:	24.1m
Promjer trupa:	7.1 m
Maksimalna širina kabine:	Glavna paluba: 6.5m Gornja paluba: 5.8m
Dužina kabine:	49.9m
Raspon krila (geometrijski):	79.8 m
Površina krila (referenca):	845 m ²
Zamah krila:	33.5 stupnjeva
Međuosovinski razmak:	31.9 m
Trag kotača:	14.3 m

Izvor: [31]

Tablica 8. Operativni podaci o zrakoplovu A380

Maksimalna težina pri polijetanju:	560 t / 575 t
Maksimalna težina pri slijetanju:	386 t / 394 t
Maksimalna težina zrakoplova bez goriva:	361 t / 369 t
Maksimalni kapacitet goriva:	320.000 litara
Motori:	Rolls-Royce Trent 900 ili Engine Alliance GP 7200
Raspon potiska motora (lb slst)	70.000
Tipični broj putničkih sjedala: Maksimalni kapacitet sjedenja:	545 (četiri klase) 853
Domet (sa maksimalnim brojem putnika):	8.000 nm 15.000 km

Izvor: [31]

Zrakoplov A380 je trebao opsluživati zračne luke koje je tada opsluživalo zrakoplov *Boeing* B747-400, koji je do pojave A380, bio tadašnji najveći komercijalni zrakoplov u pogonu. Zrakoplov A380 od B747-400 bio 3,4 metara duži, 12,5 metara širi, 4,6 metara viši i 181.440 kilograma teži. Ovaj zrakoplov je omogućavao ublažavanje gužve u zračnoj luci prijevozom više putnika uz manje letova, dok s druge strane zahtijevao je proširenje i renoviranje postojeće infrastrukture zračne luke. Hipotetski, zrakoplovne tvrtke bi mogle spriječiti gužve tako da rasporede super-jumbo mlazne zrakoplove u vrijeme izvan *rush-hour* što je u suprotnosti s *hub and spoke* mrežom koja pokušava maksimizirati korištenje zrakoplova konvergirajući na kontrolnu točku (*hub*) u određeno doba dana. Planiranje ovih zrakoplova u vrijeme izvan *rush hour* bi moglo biti u suprotnosti s inozemnim vremenskim intervalima. Uvođenjem zrakoplova A380 komplicira se planiranje prihvata i otpreme i sam parking zrakoplova zbog održavanja potrebnog razmaka između zrakoplova. Jedno od rješenja je parkiranje zrakoplova na udaljenijim pozicijama na tvrdim postoljima i prijevoz putnika autobusima ili kombijima do dvorana i terminala. Da bi se izbjegao trošak nadogradnje infrastrukture, ove operacije se već koriste, ali su se pokazale izuzetnom skupom opcijom.

Dvokatni dizajn zrakoplova A380 također može biti predmetom problema u nekim zračnim lukama. Za održavanje konkurentnih rasporeda zračnih prijevoznika i restriktivnih slotova za polijetanje/slijetanje, ovi zrakoplovi morat će se okrenuti u istoj količini vremena kao i manji jumbo zrakoplov. Kako bi se olakšao potreban preokret od 90 minuta od strane zračnih prijevoznika i zračnih luka, A380 je dizajniran za korištenje tri putnička mosta istovremeno. Dok su neki noviji projekti izgradnje terminal dizajnirani za prilagodbu ovoj vrsti konfiguracije, korištenje mostova na višoj razini zahtijevalo bi značajne strukturne izmjene mnogih postojećih terminala. U zračnim lukama s godišnjim brojem putnika od 8 milijuna ili više, super-jumbo jet moći će donijeti smanjenju od zagušenja rada zračne zone. No s druge strane, može pridonijeti velikom broju putnika u zrakoplovu čime se ostvaruje zagušenost terminala i općenito

zračne luke. Da bi se smjestilo 555 do 800 putnika po letu, vrata će se morati udvostručiti, a kapacitet obrade karata, rukovanje prtljagom i carinska kontrola će se morati povećati. Pročelja rubnjaka, dolazne i odlazne ceste i parkirališta za automobile, koja su već ograničena na mnogim zračnim lukama, možda neće moći podnijeti vrhunac valova dolazaka i odlazaka putnika koji će dovesti veliki zrakoplov. Ograničenje kapaciteta u mnogim velikim zračnim lukama mogu nametnuti korištenje ovih novih velikih zrakoplova. Zrakoplov A380 predstavlja rješenje za porast potražnje u zračnom prometu sve dok se infrastruktura zračne luke može izgraditi na pristupačan i pravovremen način [31].

Smještaj ovog zrakoplova raspona krila od blizu 80 metara može zahtijevati značajne izmjene na zračnim lukama koje namjeravaju uvrstiti ove letjelice u svoje redove letenja. Da bi se ispunili zahtjevi utvrđeni za potrebnu kategoriju, širine uzletno-sletne staze i staze za vožnju, kao i razdvajanje staze za vožnju trebat će proširenja. Neke zračne luke mogu izbjeći potpunu obnovu rulnih staza povećanjem polumjera ugla na raskrižjima ili proširenjem rulne staze toliko da se održi potrebna margina ruba rulne staze. Budući da mnoge svjetske zračne luke imaju ograničenje količine prostora koja su dostupna za proširenje, postizanje potrebnog razdvajanja između uzletno-sletnih staza i rulnih staza predstavlja veliki izazov za zračne luke.

Ionako je kapacitet goriva A380 za 105,99 litara veći od 747-400, super-jumbo jet ne bi trebao stvoriti značajno veću potražnju za gorivom, jer obećava smanjenje ukupnog broja letova te će biti sve više uštede goriva. Međutim, upumpavanje 321,76 litara u A380 u vremenu potrebnom za željeni 90-minutni okret može zahtijevati neke izmjene na sustavima za gorivo. Zahtijevat će se više od dvije istovremene veze, što znači tri do četiri hidrantska kolica i slično će biti potreban broj hidrantskih jama na vratima koja služe A380. Bez obzira na veličinu zrakoplova, objekti za održavanje zrakoplova predstavljaju značajnu investiciju za vlasnike, odnosno izgradnja hangara za smještaj zrakoplova [33].

4.2 Zračna luka Heathrow

U zapadnom dijelu Londona smještena je međunarodna Zračna luka Heathrow prikazana na slici 21. Najprometnija je svjetska zračna luka po broju putnika u međunarodnom zračnom prometu, te je treća po ukupnom broju putničkog prometa. Baltička zrakoplovna akademija (engl. *Baltic Aviation Academy* - BAA) je vlasnik zračne luke, koja u vlasništvu ima još šest zračnih luka, čiji je i operator. Zračna luka predstavlja glavno čvorište (engl. *hub*) zrakoplovnih prijevoznika *Virgin Atlantic*, *British Airways* i *BMI*. Heathrow se nalazi 22 km zapadno od središnjeg Londona i jedino je zračno središte u Velikoj Britaniji. Trenutno postoji pet terminal s dvije paralelne glavne uzletno-sletne staze i uzletno-sletnom stazom za bočni vjetar. Godišnje, kroz zračnu

luku prolazi 67 milijuna putnika koji putuju kroz četiri terminala i otprilike 90 zračnih prijevoznika trenutno lete na zračnoj luci.



Slika 21. Zračna luka Heathrow
Izvor: [34]

Airbus A380, zbog svojih fizičkih karakteristika zahtjeva i šire i duže uzletno-sletne staze za što mnoge zračne luke nisu bile spremne. Da bi zračne luke bile spremne prihvatiti ovaj zrakoplov, treba se razmotriti slijetanje i taksiranje do terminala, parking na stajanci, iskrcaj putnika i prtljage, čišćenje, punjenje gorivom, ponovni ukrcaj, taksiranje i polijetanje. Zrakoplov A380 zahtjeva tri aviomosta (slika 22) na stajanci za ukrcaj/iskrcaj putnika, umjesto uobičajeno dva. To utječe i na prometne tokove na terminalu i na položaj i kretanje zemaljske opreme kao što su vozila za opskrbu zrakoplova hranom i pićem i oprema za punjenje zrakoplova gorivom. Zrakoplov zahtjeva više opreme za opsluživanje na zemlji, ponekad i do 30 vozila te ta vozila ne mogu zauzeti iste položaje koje bi bila u mogućnosti zauzeti za neki manji zrakoplov. Kada bi 615 putnika odjednom stiglo na terminal, postojao bi rizik od dugih redova na šalterima, kontroli putovnica i preuzimanjem prtljage. Stoga, zračna luka mora osigurati više prostora i veći broj osoblja za prihvat zrakoplova i putnika. Ako zračne luke ne poduzmu prave korake da private ovaj zrakoplov, putnici će doživjeti duge redove, njihova prtljaga će biti na pogrešnim mjestima, a zrakoplovi će zaglaviti na stajanci. Samim tim, kvaliteta usluge zračne luke pada kao i broj kupaca. Stoga iskustvo putnika postaje nužno za uspjeh poslovanja zračne luke [34].



Slika 22. Tri aviomosta spojena na zrakoplov Airbus A380
Izvor: [35]

Rano planiranje i angažman zračnih luka za prihvatanje zrakoplova smanjuje rizik skupoga preuređivanja infrastrukture. Čest je slučaj da zračne luke nisu pravilno planirane, te se kratkoročni popravci moraju neprestano obavljati što financijski negativno utječe na operatore zračne luke te umanjuju komfor putnika zbog raznih radova po zračnim lukama i čestim promjenama ruta od/do terminala/zrakoplova [34].

BAA je potrošila više od 3 milijarde funti u nadogradnju zračne luke (isključujući troškove Terminala 5) te je uloženo 450 milijuna funti u ponovni razvoj Terminala 3 zračne luke, kako bi bio spreman za dolazak zrakoplova A380. Izgradnja novih objekata u zračnim lukama predstavlja velik izazov jer se posao mora izvoditi u operativnom okruženju zračne luke koja se nikad ne zatvara. Zračna luka *Heathrow* ima jednu od najprometnijih uzletno-sletnih staza te je priprema za smještaj potpuno novog zrakoplova predstavljala velik izazov. Građevinske firme koje su sudjelovale u projektu su morale razmotriti pristaništa, staze za vožnju, uzletno-sletne staze, ceste, pojaseve za prtljagu, objekte za prijavu na let i parkiralište. U radu bit će opisana dva projekta, *Pier 6* i Terminal 3.

4.2.1 Projekt *Pier 6*

Najveći projekt koji BAA poduzima na Heathrowu je ponovni razvoj terminala *Pier 6*, prikazan na slici 23. Stari terminal *Pier 6* je srušen kako bi se osigurao prostor za novu infrastrukturu koja je bila izgrađena na drugoj trasi paralelno sa južnom uzletno-sletnom stazom. Ovaj projekt rekonstrukcije vrijedan je 100 milijuna funti te je osigurao četiri veća stajališta za zrakoplove i četiri nova ulazna prostora, koja su u stanju primiti 2200 putnika. Novi terminal je 280 metara duga zgrada sa staklenim pročeljem koja osim za funkcionalne potrebe, pruža putnicima pogled na uzletnište i

zrakoplov tijekom hoda do ukrcaja na let. Pristanište je izgrađeno na tri razine kako bi se prilagodilo povećanoj visini i širini zrakoplova A380, omogućujući putnicima da se ukrcaju i iskrcaju putem dvostrukih mostova. Građevinski radovi su počeli u travnju 2004. te su završeni početkom 2006. Projekt je bio pomno planiran i proveden kako bi se osigurao minimalni poremećaj u zračnoj luci. U skladu s međunarodnim standardima zračne sigurnosti ovaj projekt je odvojio putnike koji dolaze i koji odlaze te je osigurao salon prve klase, dvije male maloprodajne jedinice i kafić.

Na razini platforme je 1600 četvornih metara uredskog i skladišnog prostora koje služe za korištenje zračnim prijevoznicima i špediterima za rukovanje. Prva kompletna izlazna čekaonica je bila gotova u rujnu 2005., a cijeli terminal je pušten u rad od sredine siječnja 2006. Svaka izlazna čekaonica služila je za A380, a dvije ulazne imaju sustav rampe za više zrakoplova koji mogu opsluživati dvama manjim zrakoplovima istovremeno. Ovo je poboljšalo ukupnu operativnu učinkovitost na Terminalu 3 te će se lakše nosilo s većim brojem putnika koji koriste ovaj objekt [33].



Slika 23. Terminal Pier 6
Izvor: [36]

4.2.2 Projekt Terminal 3

Povećana razina putnika koja se očekivala na zračnoj luci je podrazumijevala i povećan broj prtljage tako da je bilo nužno planiranje proširenja područja terminala da bi se osiguralo da terminal i ostali objekti na zračnoj luci mogu prihvatiti budući rast u broju putnika i prtljage. Projekt vrijedan 35 milijuna funti započeo je u proljeće 2004. Projekt je uključivao:

- 1) Proširenje postojeće dvorane za dolaske kako bi se osigurali duže pokretne trake za preuzimanje prtljage.

- 2) Uvođenje dvije pokretne trake u već postojeću salu za prtljagu.
- 3) Ponovna izgradnja i preuređenje carinskog područja Terminala 3.
- 4) Ponovna izgradnja prostora za okupljanje dolazaka.

Također, trebalo je izgraditi privremeni tunel kroz gradilište na kojem se vršilo proširenje kako i se osigurala zaštićena ruta za kolica s prtljagom. Izgrađeni su i dulji pojasevi za prtljagu, novi toaleti, nove stolove za zrakoplov, mjenjačnicu i druge sadržaje. Preuređena dvorana je predviđala poboljšanu zonu za putnike koji napuštaju zgradu terminala i nastavljaju svoje putovanje do konačnog odredišta.

Također, za siguran prihvat i otpremu zrakoplova su se provodile sljedeće radnje [33]:

- obnova uzletno-sletne staze,
- širenje i jačanje ramena uzletno sletne staze,
- nadogradnja osvijetljene uzletno-sletne staze,
- pomicanje zračne linije unutarnje staze za vožnju zbog dužeg raspona krila A380 i
- izgradnja novih rulnih staza.

Uzletno-sletna staza 09L/27R duga je 3.901 m, dok je uzletno-sletna staza 09R/27L duga 3.660 m. Dvije uzletno-sletne staze su postavljene s asfaltnom površinom su postavljene u smjeru istok-zapad. Za vrijeme radova na zračnoj luci za prihvat zrakoplova A380 postavljeni su novi sustavi infracrvenih kamera koji su instalirani na dvije uzletno-sletne staze da bi se povećala sigurnost na uzletno-sletnoj stazi [37].

Međunarodna zračna luka *Heathrow* nudi četiri kategorije parkiranja. Parking za kraći boravak dostupan je do pet sati. *Heathrow* poslovno parkiralište nudi usluge za tri do četiri dana. Uz pomoć osobe zadužene za parkiranje vozila, putnici mogu imati osobnog vozača koji će im parkirati automobile na sigurno mjesto i vratiti im kada se vrate. Na svim terminalima zračne luke dostupno je i dugotrajno parkiralište. Za vrijeme radova za prihvat zrakoplova A380, izgradila se nova i struktura parkirališta, poznata kao višetažno parkiralište West (slika 24), koje se otvorilo u ljeto 2006. i koje je omogućilo putnicima veći broj parkirnih mjesta. Ovo parkiralište se nalazi kod središnjeg terminal *Heathrow*. Mjesto novog parkirališta je okruženo nekim od najprometnijih cesta na *Heathrowu*. Projektni tim je morao preusmjeriti preko 800 usluga (uključujući kabele za zemaljsku rasvjetu aerodrome, visokonaponske električne kabele i IT kabele) koji prolaze kroz mjesto novog parkirališta. Kada se otvorilo novo parkiralište, staro parkiralište je bilo srušeno te se izgradilo novo dvorište za terminal [37].



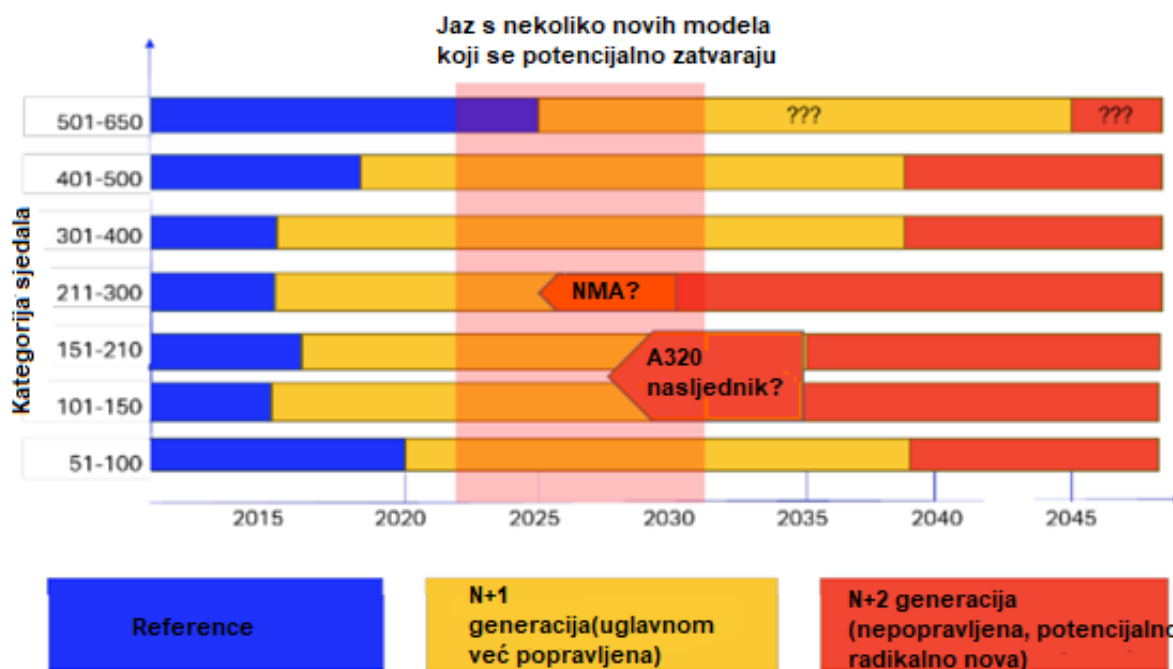
Slika 24. Novo parkiralište Zračne luke Heathrow
Izvor: [38]

5. IZAZOVI U BUDUĆEM RAZVOJU INFRASTRUKTURE I OPREME ZA PRIHVAT I OTPREMU ZRAKOPLOVA NOVE GENERACIJE

Komercijalno zrakoplovstvo doživjelo je ogroman porast u posljednja dva desetljeća, s milijardama putnika koji svakodnevno lete zrakoplovima. Zrakoplovi troše tisuće litara zrakoplovnog goriva na sat, ispuštajući pritom značajne količine onečišćene tvari u zrak, uključujući ugljični dioksid. Prema istraživanjima, zrakoplovstvo čini 2,4% globalnih emisija CO₂, čija se brojka samo povećava zbog porasta broja putnika koji leti svake godine. Zrakoplovne tvrtke i sami proizvođači zrakoplova poduzimaju korake za poboljšavanje trenutne situacije izgradnjom učinkovitijih zrakoplova koji će imati manji utjecaj na okoliš. Jedna od promjena za koju se pretpostavlja da će se dogoditi u bliskoj budućnosti je korištenje održivog goriva umjesto standardnog mlaznog goriva na bazi kerozina čime bi se pomoglo u smanjivanju emisija ugljika. Održivo zrakoplovno gorivo obično predstavlja kombinaciju otpadnih proizvoda, sirovine iz proizvodnje goriva i drugih održivih izvora koje su pomiješane u standardno zrakoplovno gorivo. Ove smjesa se zatim koriste kao gorivo, te pritom smanjuju ukupnu upotrebu fosilnih goriva po letu [39].

Zračne luke za koje se očekuje smještaj zrakoplova nove generacije zahtijevat će posebno planiranje podataka kako bi se utvrdilo jesu li trenutne duljine uzletno-sletnih staza dovoljne za prihvata zrakoplova nove generacije. Prema dokumentu AC 150/5325-4A, zahtijevi za duljinu uzletno-sletne staze za projektiranje zračne luke, daju dizajn i smjernice za određivanje preporučenih duljina uzletno-sletnih staza za civilne zračne luke. Kao što je navedeno u AC-u, preporučena duljina primarne uzletno-sletne staze određena je uzimajući u obzir ili obitelj zrakoplova sa sličnim performansama ili specifični zrakoplov koji zahtjeva najdužu uzletno-sletnu stazu. S novim dizajnima krila i motora, zrakoplovi nove generacije će letjeti znatno dulje i zahtijevati će manje uzletno-sletne staze od svojih starijih modela zrakoplova.

Tipično vrijeme između zamjene generacija zrakoplova jedni drugima su u redu od 20 godina, ponekad i duže. S novim modelima zrakoplova koji se trenutno predstavljaju u gotovo svim kategorijama sjedala, neizvjesno je hoće li se sljedeća generacija zrakoplova stići prije 2030-ih osim u kategoriji od 211 do 300 sjedala, kao što je vidljivo na slici 25. Također, na slici je vidljivo da bi u razdoblju između ranih 2020-ih i ranih 2030-ih se mogao pojaviti samo jedan novi model zrakoplova koji bi trebao nuditi poboljšanje učinkovitosti goriva u odnosu na njegove prethodnike.



Slika 25. Prikaz zamjena generacija zrakoplova
Izvor: [39]

5.1 Implementacija hidrogena u zrakoplovstvu

Poput automobila, lokomotiva i drugih samohodnih vozila, zrakoplovi se oslanjaju na motore koji im daju potreban potisak za kretanje. Trup zrakoplova je dizajniran da iskoristi prednosti aerodinamike i osigura podizanje kako bi se zrakoplovi podignuli iznad tla. Zrakoplovi, kao i druga vozila, znatno su se poboljšali od svojeg prvog modela. Kako se broj zrakoplova u upotrebi povećava, dolazi do značajnog povećavanja onečišćenja. Postoji više aspekata zagađenja iz zrakoplovstva, od kojih je najočitije zagađenje iz zraka. Međutim, dok emisije ugljika i dušikovih oksida stvaraju onečišćavanje okoliša te samim tim privlače pozornost javnosti, druga područja zrakoplovne industrije također pridonose globalnom onečišćenju. Povećanje broja putnika u zrakoplovstvu je proporcionalno povećanju otpada koje nastaje u zračnim lukama i tijekom leta. Na primjer, povećanje jednokratnih materijala koji se koriste na putničkim letovima poboljšava operativnu učinkovitost (pladnjevi za hranu, šalice, pribor za jelo,...). Upotreba plastike, pomaže u smanjenju ukupne težine zrakoplova, ali povećava zagađenje koje stvara zrakoplovna industrija. Onečišćenje zraka predstavlja veliki problem za zrakoplovnu industriju. Unatoč što je doprinos zrakoplovne industrije od 2,1% globalnim emisijama ugljika mnogo je niže od 11% koliko doprinosi cestovni promet, privlači mnogo više pozornosti jer je globalni utjecaj na okoliš značajniji zbog tragova koje stvaraju mlazni motori zrakoplova u letu. Proizvođači zrakoplova moraju ulagati u razvijanju tišeg, štedljivijeg zrakoplova. Zrakoplovna industrija uvelike utječe na zagađenje okoliša, te da bi se značajno

smanjio utjecaj na globalno zatopljenje i klimatske promjene, planira se uvođenje obnovljivog goriva i vodika u zrakoplovstvo. Vodik je dokazan kao prikladno alternativno gorivo jer ga ima u izobilju, čist je i ne proizvodi emisije ugljika, već samo vodu nakon upotrebe, koja ima potencijal da ohladi okoliš. Alternativni obnovljivi izvori energije i vodik mogu pružiti dugoročan plan za razvoj industrije alternativne energije.

Otpriblike dvije trećine potrošnje kerozina, što je u izravnoj korelaciji s CO₂ emisijama, dolazi od letova koji se obavljaju zrakoplovima kratkog i srednjeg dometa (letovi sa manje od 165 PAX i letovi sa manje od 250 PAX). Ovi zrakoplovi čine 70% svjetske flote. Više od 5% emisija uzrokovano je regionalnim (manje od 80 PAX) i prigradskim (19 PAX ili manje) letovima, koji opslužuju oko 20% današnjih zrakoplova. Ostatak emisija proizlazi iz dugog dometa (preko 250 PAX) letova, koji opslužuju 10% zrakoplova. Što se tiče dometa letova, više od 20% emisija dolazi od letova iznad 7.000 kilometara, ali ovi letovi čine manje od 5% ukupnog broja letova. Nasuprot tome, letovi koji se protežu na manje od 3.000 kilometara i neovisni su o veličini zrakoplova čine više od 50% ukupnog broja CO₂ u zrakoplovstvu emisije i 90% svih letova. Ovi podaci ukazuju da bi glavni fokus na dekarbonizaciji zrakoplovstva trebao biti na zrakoplovima kratkog dometa koji manje lete na 2.000 do 3.000 kilometara, kao i na zrakoplovima srednjeg i dugog dometa [40].

Motori sa unutarnjim izgaranjem u zrakoplovima ispuštaju 3,15 kilograma CO₂ za svaki kilogram izgorjelog kerozina u letu. Ovaj CO₂ ostaje 50 do 100 godina u gornjim slojevima atmosfere. Međutim, zrakoplovi također emitiraju NO_x, vodu i čađu na velikim visinama. Iako NO_x ostaje samo nekoliko tjedana u atmosferi, pojačava ozon, koji bi mogao biti jednako štetan za klimu kao i CO₂ emisije. Vodena para također izravno utječe na klimu, jer reflektira zračenje koje zagrijava klimu. Ali to ne traje dugo na velikim visinama, i njegovi učinci su oko 10 puta manji od CO₂ emisije.

Za dekarbonizaciju u zrakoplovstvu, industriji su potrebne nove, niskougljične pogonske tehnologije i /ili nova goriva. One uključuju [40]:

- Održiva zrakoplovna goriva: najdalje razvijena među tim gorivima su biogoriva poput HEFA (engl. *Hydrotreated Esters and Fatty Acids*) iz biomase ili otpad (ulja i masti za kuhanje), nakon čega slijede napredna biogoriva koja se sintetiziraju iz npr. čvrste sirovine, biomasa poput usjeva ili algi. Treća opcija SAF-a (engl. *Sustainable Aviation Fuel*) su goriva iz struje u tekućinu (singoriva).
- Nove pogonske tehnologije, to uključuje baterijske i turbo-električne tehnologije, kao i vodikova izgaranja u turbinama i gorivnim ćelijama koje pokreću elektromotore

Biogoriva imaju prednost nad ostalim vrstama hidrogenih goriva jer ne zahtjevaju promjene u infrastrukturi zrakoplova i primjenjivi su na sve segmente zrakoplova. Biogoriva su već komercijalno dostupna, npr. HEFA goriva. Ali oslanjanje biogoriva na sirovine, promjene u korištenju zemljišta, veliku upotrebu vode i/ili monokulturu znači da će se zrakoplovna industrija natjecati sa drugim industrijama

koje također trebaju te sirovine za druge namjene. Za razliku od biogoriva, gorivu *Synfuels*, glavni izvor singoriva (pretvorba energije u tekućinu) je struja. Ova električna energija koristi se prvo za proizvodnju vodika i za hvatanje ugljika, kombinirajući to dvoje u gorivo nalik kerozinu. *Synfuel* se također može koristiti u trenutnim motorima zrakoplova i infrastrukturi goriva, pa je stoga pogodan za sve segmente.

Kod tehnologija baterijsko-električnih i hibridno-električnih zrakoplova postoje mnoga poboljšanja u posljednjih 20 godina. Za potrebe zrakoplovstva, baterije još uvijek imaju nisku gravimetrijsku gustoću energije od 0,2 do 0,5 kWh/kg i ograničen životni ciklus što ograničava njihovu primjenu kao jedinog izvora snage za vrlo kratke letove (tj. za prigradske i potencijalno regionalne zrakoplove). Dok se gustoća energije poboljšava, tehnologija baterija bi trebala doživjeti veliki napredak da bi uopće mogla biti razmatrana kao primjenjiva na veće domete. Uz to, brzi sustavi punjenja ili zamjene baterija bi zahtijevali značajne promjene u infrastrukturi zračne luke. Baterije bi se međutim, mogle primijeniti u kombinaciji s vodikovom gorivnom ćelijom ili konvencionalnim pogonom. U letu, akumulatorski električni pogon ima najbolji utjecaj na klimu jer ne uzrokuju emisije ili efekte povezane s emisijom [40].

Zrakoplovstvo na vodik nije novi koncept, no međutim potrebna infrastruktura se rijetko istražuje. Vodik se može koristiti kao gorivo u zrakoplovima kada bi se izgaranjem vodika palio motor ili kada bi se događala reakcija u gorivnoj ćeliji koja bi pokretala električne motore. Razvoj industrije vodika za komercijalno zrakoplovstvo može se kategorizirati u sljedeća područja [40]:

- Primjena u zračnoj luci, gdje vodikove gorivne ćelije pokreću aktivnosti u zračnoj luci, kao što su njihova zemaljska podrška i transport.
- Postojeća infrastruktura, gdje aplikacije za zrakoplove ili platforma ne trebaju promjenu i mogu se koristiti elektro-goriva kao *drop-in-jet* gorivo, koje proizvodi miješanjem CO₂ s vodikom.
- Infrastruktura u nastajanju, u kojoj se zrakoplovi redizajniraju ili modificiraju.

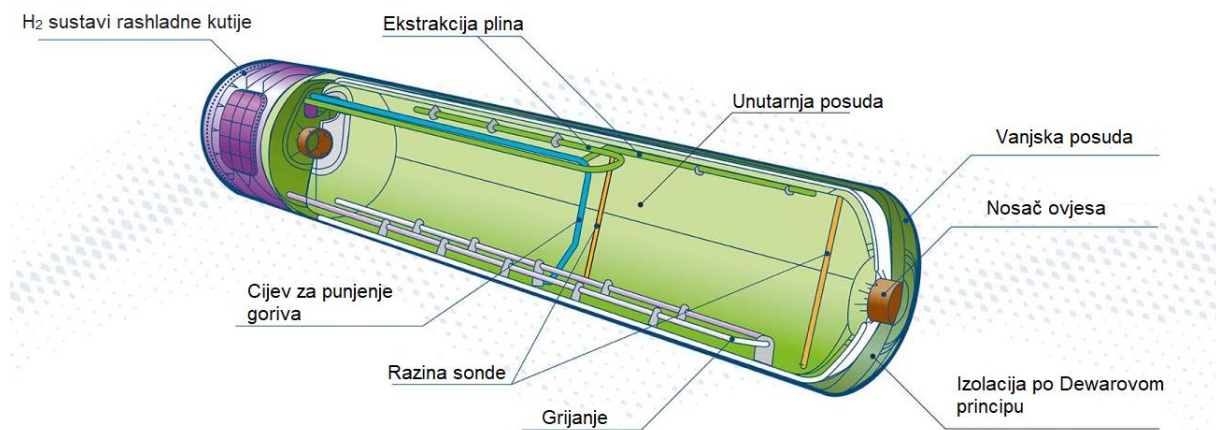
Postoji dva načina korištenja vodika kao goriva u zrakoplovu:

- korištenje vodika kao zrakoplovno gorivo za zamjenu kerozina u velikim zrakoplovima i
- korištenje vodikove gorivne ćelije kao izvor energije u malim propelerskim zrakoplovima umjesto benzinskih motora.

Unatoč što ima tri puta veću gravimetrijsku gustoću energije u usporedbi s kerozinom, veći volumen vodika zahtjeva veće spremnike u zrakoplovu i prilagođene dizajne zrakoplova. Kako izgleda shematski prikaz spremnika vodika, kao i njegovi dijelovi, prikazano je na slici 26. Veličina i težina H₂ smanjuje ekonomičnost za zrakoplove velikog dometa. Prednost vodika je što se može izravno proizvoditi iz obnovljivih izvora energije. Vodik kao gorivo ne sadrži ugljik; tako da njegovo izgaranje ne uzrokuje CO₂ emisije u letu. Singoriva i biogoriva, sa druge strane, uzrokuju CO₂ emisije tijekom leta koje su slične emisijama koje proizvode zrakoplovi na kerozin. Zajedno sa sintetičkim gorivima, vodik predstavlja najvjerojatniju opciju

dekarbonizacije za zrakoplovstvo za razdoblje u budućnosti. Potencijalno nove tehnologije pokazuju da biogoriva i turboelektrični zrakoplovi mogu kratkoročno dekarbonizirati zrakoplovstvo. Dugoročno, dekarbonizacija zrakoplovstva mogla bi koristiti kombinaciju baterijsko-električno napajanje za zrakoplove (samo za vrlo kratke domete). Rješenja kao što su H₂ pogon (gorivna ćelija ili izgaranje), singoriva i biogoriva su prikladna za veće segmente zrakoplova s višim emisijama. Najvažnije komponente u zrakoplovu koji bi bio pogonjen vodikom [40]:

- Spremnici vodika: vodik se može skladištiti kao plin pod tlakom ili biti u tekućem obliku. Dok skladištenje u plinu može biti prikladno za kraće letove i komercijalno je dostupno, tekući vodik (engl. *Liquid hydrogen* - LH₂) se više proučava jer njegovi spremnici zahtijevaju upola manji volumen te su znatno lakši od spremnika za plinoviti vodik što je važno za zrakoplove kratkog do dugog doleta gdje će zrakoplovi nositi nekoliko tona vodika po letu. LH₂ spremnik mora ostati hladan i prijenos topline mora biti minimiziran kako bi se izbjeglo isparavanje vodika. Za učinkovitu integraciju spremnika u trup zrakoplova, trebat će se povećati trup zrakoplova.
- LH₂ sustav goriva za distribuciju, isparavanje i napajanje LH₂ na gorivne ćelije ili turbine: LH₂ zahtjeva kriogeno hlađenje do 20 stupnjeva *Kelvina*.
- Gorivne ćelije (za zrakoplove s pogonom na gorivne ćelije): u zrakoplovu s pogonom na gorivne ćelije vodik se pretvara u električnu energiju koja zatim pokreće električni motor i ventilator ili propeler.
- Turbine s izravnim izgaranjem vodika (za vodikovo izgaranje): u vodikovim zrakoplovima s unutarnjim izgaranjem LH₂ direktno izgara u turbini, slično kao i kerozin, za stvaranje potiska.



Slika 26. Shematski prikaz spremnika vodika
Izvor: [41]

Velika rekonstrukcija infrastrukture za opskrbu zrakoplova vodikovim gorivom u zračnim lukama vjerojatno neće biti potrebna. Broj potrebnih kamiona za opskrbu gorivom otprilike je dvostruko veći od broja potrebnog za kerozin. LH₂ kamioni za opskrbu gorivom vrlo se razlikuju od postojećih kamiona za opskrbu gorivom i zahtijevala bi se drugačija obuka i mjere sigurnosti [40].

Međutim, za korištenje vodika kao goriva u zrakoplovu zahtjeva ojačane spremnike za skladištenje goriva. Konstrukcije zrakoplova se moraju izmijeniti ako bi se vodik koristio kao zrakoplovno gorivo. Gorivo bi moglo biti pohranjeno u prostoru iza putničke kabine što bi promijenilo težište zrakoplova. Druga opcija za skladištenje je izgradnja jednog spremnika ispred putničke kabine i jednog spremnika iza. Također postoji opcija postavljanja dva spremnika vodika na vrh kabine i jedan u rep trupa [40]. *Airbusov* konceptni zrakoplov ZEROe s vidljivim prikazom spremnika vodika je prikazan na slici 27, a koji se u upotrebu planira staviti do 2035. godine.



Slika 27. Konceptni zrakoplov Airbus ZEROe
Izvor: [41]

5.2 Izgradnja solarnih elektrana

Razne tehnologije solarnih energija, predstavljaju komercijalno dostupne obnovljive energije koje posjeduju određeni potencijal za primjenu u zračnim lukama. Fotonaponski nizovi pretvaraju sunčevu svjetlost u električnu energiju. Sustavi zahtijevaju vrlo malo održavanja, ne stvaraju buku i te rade bez pokretnih dijelova i bez zagađivanja zraka i stvaranja stakleničkih plinova. Nizovi se mogu montirati na zgrade kao što su parkirne garaže ili biti postavljeni na tlo na potporne stupove ili nosače. Nizovi proizvode istosmjernu struju (engl. *Direct current* - DC), koja se može kondicionirati u električnu energiju izmjenične struje (engl. *Alternating current* - AC) kvalitetne mreže ili koristiti za punjenje baterije. Tipična fotonaponska ćelija pretvara

otprilike 14% sunčeve energije koja pada na njenu površinu u korisnu električnu energiju. Količina električne energije koju sustav proizvodi ovisi o vrsti sustava, orijentaciji i dostupnim solarnim resursima [42].

Tijekom krize goriva 1970-ih godina prošlog stoljeća, solarna energija putem fotonaponskih panela prikazana je kao alternativni izvor energije za čovječanstvo. Zrakoplovi na solarni pogon predstavljaju ekološki prihvatljive alternative. *Sunrise*, prvi svjetski avion na solarni pogon, poletio je 1974. godine. Zrakoplovi na solarni pogon, za razliku od običnih, hvataju sunčevo zračenje i pretvaraju ga u električnu energiju pomoću fotonaponskih panela. Zbog neiscrpne opskrbe solarnom električnom energijom, zrakoplovi na solarni pogon imaju značajan potencijal za velike visinske i dugotrajne (engl. *High-altitude long endurance* - HALE) misije. Zrakoplovi na solarni pogon mogu se konstruirati za letenje blizu svemira; odnosno neposredno iznad atmosferske zone leta, a i ispod područja letjelice (oko 20-100 km). Ovi zrakoplovi mogu neprestano krstariti dulje vrijeme, čak i godinama, neovisno o izdržljivosti sustava zrakoplova i sunčevim uvjetima što je za konvencionalne zrakoplove nemoguće zbog operativnih ograničenja. Još jedna velika prednost je veliko smanjenje emisija, s gotovo 80% manje emisija ugljika kod tradicionalnih zrakoplova. Glavna ideja je pokriti određeno područje zrakoplova solarnim ćelijama, što bi u većini slučajeva bilo krila i rep zrakoplova. Za vrijeme izloženosti sunčevim zrakama, fotonaponski paneli pretvaraju sunčevu energiju u električnu energiju. Količina proizvedene električne energije određena je čimbenicima kao što su orijentacija panela prema suncu i intenzitet sunčeve svjetlosti. Sklop s mikroprocesorom koji se može konfigurirati upravlja izlazom prijenosa energije. Mehanizam za regulaciju i prijenos električne energije jamči maksimalnu izlaznu energiju solarnih panela. Proizvedena električna energija uglavnom se koristi za pogon zrakoplova i elektronike. Višak energije se koristi za punjenje baterija koje se koriste u nedostatku sunčeve svjetlosti.

Fotonaponske (engl. *Photovoltaic* - PV) ćelije, koncentrirana solarna energija (engl. *Concentrated solar power* - CSP) i solarni toplinske kolektori za grijanje i hlađenje (engl. *Solar heating & cooling* - SHC) su tri primarne tehnologije koje se koriste za primjenu solarne energije. PV tehnologija je prepoznata kao način proizvodnje električne energije korištenjem fotonaponskih panela izgrađenih od niza solarnih ćelija za pretvaranje sunčeve energije u električnu energiju. Početak praktične primjene ovih tehnologija bilo je napajanje komunikacijskih satelita i svemirskih letjelica. Zbog tehnološkog poboljšanja, dostupne su baterije s povećanom gustoćom energije od 400-600 Wh/kg i više od 500 ciklusa pri standardnoj kvaliteti punjenja. Solarne gorivne ćelije stvorene su za proizvodnju energije u stacionarnim sustavima, kao i drugi konkurentski tehnološki pristupi. Istraživački i razvojni naponi usmjereni su na stvaranje pouzdanih, jeftinih i visokoučinkovitih mrežnih elemenata gorivnih ćelija za primjenu u vozilima. Tehnološki razvoj se ubrzano ostvaruje kako bi se poboljšala i proširila primjenjivost solarnog zrakoplovstva. Organski fotonaponski uređaji (engl. *Organic Photovoltaics Research* - OPV) proizvedeni su od organskih materijala koji su raznoliki i prilagodljivi, pružajući neograničene mogućnosti za poboljšanje širokog

spektra značajki. Organske molekule su jeftine, imaju izvrsnu sposobnost apsorpcije svjetlosti, dopuštajući korištenje premaza tankih od nekoliko stotina nm u tu svrhu [42].

Kvantne točke imaju potencijal poboljšati učinkovitost pretvorbe solarnih ćelija na najmanje dva načina: širenjem energetskog jaza solarnih panela kako bi se prikupilo više sunčeve svjetlosti u spektralnom području i proizvodnjom više napona iz jedne sunčeve čestice. Solarne ćelije izgrađene na kvantnim točkama mogle bi potencijalno transformirati više od 65% sunčeve energije u električnu energiju, povećavajući učinkovitost gotovo za dva puta. Nanomaterijali poput nanožica i nanočestica nude novi potencijal u solarnim uređajima. Objekti veličine nanometra imaju vrlo velike površine po jedinici volumena, što omogućuje stvaranje vrlo velikih međufaznih područja. Sunčeva energija ima mogućnosti da postane značajna komponenta potencijalnog energetskog sektora bez ugljika u zrakoplovstvu. Program *Solar Impulse* otkrio je ambicije za stvaranje novog zrakoplova na solarni pogon koji bi mogao obavljati neke od aktivnosti koje inače obavljaju sateliti. Međutim, znanstveni razvoj i inovacije potrebni su kako bi se prevladala slaba učinkovitost i skupi troškovi postojećih sustava. Proizvodnja solarne ploče varira s temperaturom i vlagom, obično je potreban uređaj za praćenje maksimalne snage (engl. *Maximum Power Point Tracking* - MPPT) kako bi se maksimalno iskoristila sunčeva insolacija [43].

Postoji nekoliko jedinstvenih primjena solarne energije u zračnim lukama. Neki primjeri uključuju [43]:

- PV za odleđivanje uzletno-sletne staze: Sveučilište u Arkansasu razvija sustav koji koristi PV kao izvor energije za odleđivanje uzletno-sletne staze umjesto korištenja mehaničkih pomagala ili nanošenja kemikalija. U ovoj primjeni, solarni paneli pretvaraju sunčevu svjetlost u energiju koja se zatim šalje elektrodama ugrađenim u cement kako bi se otopio led i kako bi se staza održala iznad temperature smrzavanja. Budući da uklanjanje snijega i leta zahtjeva skupu opremu, veliku količinu energije i veliki broj osoblja ekonomičnost solarne PV za topljenje leda ima svijetlu budućnost.
- PV u fasadama zgrada.
- PV za rasvjetu zračne luke čija je instalacija brza i jednostavna. Svjetla na polarni pogon se mogu koristiti za svjetla prilaza, uzletno-sletne staze i rulne staze, prilazna svjetla i sl.

Međunarodna zračna luka *Tucson* jedna je od novijih zračnih luka u svijetu koja je počela koristiti solarnu energiju da uštedi novac i smanji utjecaj na okoliš. Na slici 28 je prikazana solarna nadstrešnica koja pokriva glavno parkiralište terminala od 12 hektara [43].



Slika 28. Zračna luka Tucson
Izvor: [43]

5.3 Zemaljski izvor napajanja zrakoplova

Za napajanje zrakoplova na zemlji, koriste se agregati, koji predstavljaju zemaljski izvor električne energije. U slučaju da zrakoplov ne sadrži pomoćni motor (engl. *Auxiliary Power Unit* - APU) ili je taj isti sustav u kvaru, potreban je zemaljski izvor napajanja (engl. *Ground Power Unit* - GPU) odnosno agregat. Korištenjem GPU se predviđa korištenje struje koju osigurava zemlja putem uređaja postavljenih na uzletištu za pomoć pri polijetanju ili slijetanju. Prednosti prelaskom na GPU bi bile da bi zrakoplov mogao letjeti uz manju instaliranu snagu i koristiti manje energije za polijetanje i slijetanje kao što bi inače. Prednosti su i u smanjenoj emisiji ugljika i nižim troškovima. Zrakoplov zahtjeva brzinu naprijed za konvencionalno polijetanje što se postiže ubrzavanjem zrakoplova sve dok brzina zraka iznad krila ne bude dovoljna za polijetanje, po mogućnosti uz korištenje visokog uzgona s uređajima kao što su flapsovi. Jedan od načina pružanja zemaljske energije za ovaj dio faze bio bi podizanje zrakoplova do vrha stajanke što omogućuje razmjenu potencijalne energije dobivenu kinetičkom energijom dok prolazi niz stajanku. No međutim, energija dobivena na ovaj način nije dovoljna za polijetanje jer su potrebne brzine od oko 150 čvorova te je potrebno uključiti drugi uređaj koji bi povećavali pogon zrakoplova. Takvi uređaji bi mogli, na primjer biti maglev pogonske jedinice u kojima će se zrakoplov uključiti u kolica koja su povezana s gusjenicama maglev.

Koncept s drugačijim pristupom je „*Tube Take-Off*“ uređaj (TTOD) u kojem se predviđa vrlo velika cijev u koju se okreće zrakoplov koji polijeće. U cijevi iza putničkog zrakoplova nalaze se veliki i jaki ventilator koji je napajan iz zemaljskih izvora. Putnički zrakoplov stoji u cijevi, motori rade, dok ventilator radi i povećava brzinu i usisava zrak pored putničkog zrakoplova sve dok brzina zraka preko krila ne izazove dovoljan uzgon

potreban za let. Putnički zrakoplov tada može izaći iz cijevi i poletjeti. Izazovi koje treba svladati tiču se protoka zraka u otvoru cijevi i sam dizajn cijevi. Zrakoplov treba ubrzati izvan cijevi tako da kada dosegne slobodni, stacionarni zrak negdje izvan cijevi postigne odgovarajuću brzinu letenja. Protok zraka u cijev će biti takav da stacionaran zrak se neće odmah pojaviti na ušću cijevi. Duljina vremena za ubrzavanje zrakoplova mora odgovarati duljini cijevi iz koje izlazi i udaljenosti poja strujanja izvan cijevi iz koje može izvući korist. Polje protoka se može optimizirati dizajnom otvora cijevi.

Vitla za ubrzavanje se također mogu koristiti za pomoć pri ubrzavanju zrakoplova, bilo samostalno ili u kombinaciji s drugim uređajem. Ta bi vitla bila veća verzija uređaja koji se koriste za lansiranje jedrilice ili katapult koji se koriste na pomorskim nosačima zrakoplova. Glavna svrha povećanja zemaljske snage je smanjiti instaliranu snagu zrakoplova [44].

Zračne luke zbog porasta prometa imaju značajnu količinu aktivnosti tijekom rukovanja zrakoplovom tijekom njegovog boravka na stajanci. Mnogo specijaliziranih vozila i opreme se nalazi oko zrakoplova te služe za pojedine radnje rukovanja servisiranjem, ali također postoje i ona vozila i oprema koja je većinom pokretana dizelskim ili benzinskim gorivom. Sa stajališta zračne luke važno je mjesečno ili godišnje pratiti i analizirati emisije uzrokovane rukovanjem vozila te aktivno sudjelovanje na upotrebi ekološki prihvatljive opreme jer je to važno pitanje za budući razvoj zračne luke. Zbog toga, zračne luke nastoje promijeniti svoju opremu za zemaljsko rukovanje na stajanci od benzinskog ili dizelskog goriva do električnog pogona.

Korištenje dostupnog GPU-a umjesto APU-a rezultiralo bi uštedom goriva i manjom emisijom, što bi uštedjelo oko 19 milijuna litara mlaznog goriva i eliminiralo više od 45 milijuna kilograma emisija CO₂ godišnje. Održavanjem motora zrakoplova čistim bi se omogućilo da motori rade učinkovitije i štede više od 27 milijuna litara mlaznog goriva godišnje, kao i 68 milijuna kilograma CO₂. Također, korištenje samo jednog motora tijekom taksiranja na zračnoj luci, u slučajevima da je to izvedivo na siguran i operativan način, štedi se gotovo 11 milijuna litara mlaznog goriva i oko 27 milijuna kilograma emisije CO₂ godišnje. Zamjenjujući 19.000 *catering* vozila s novijim modelima od lakših materijala uštedjelo bi se gotovo 7,5 milijuna litara mlaznog goriva godišnje [44].

5.4 Inovacije u budućem razvoju zrakoplova

Zrakoplovi koji ulaze u službu u sljedećih nekoliko godina imaju istu cjelokupnu konfiguraciju kao i njihovi prethodnici. Međutim, oni su opremljeni retrofitima, serijskim nadogradnjama i novim dizajniranim komponentama i sustavima koji im omogućuju veću učinkovitost potrošnje goriva. Kod planiranja budućih generacija zrakoplova, najvažnije su sljedeće tri stavke: smanjenje težine zrakoplova, povećanje omjera

uzgona i otpora zrakoplova i smanjenje specifične potrošnje goriva za potisak zrakoplova. Cilj poboljšanja učinkovitosti zrakoplova je smanjenje potrošnje goriva potrebnog za rad zrakoplova. Količina goriva koju zrakoplov potroši povezana je sa specifičnom potrošnjom goriva za potisak, težinom zrakoplova i aerodinamičkim silama uzgona i otpora koje se javljaju tijekom leta. Masa zrakoplova smanjivat će se uvođenjem novih strukturnih koncepata i dizajnerskih materijala koji koriste prilagođene dizajne za trup zrakoplova i krila s integriranim upravljačkim aktuatorima. U budućim dizajniranjima zrakoplova će se više usmjeriti na poboljšanje materijalnih i strukturnih svojstava i mogućnosti izrade naprednih kompozita i metala [46].

U novijim i nadolazećim modelima zrakoplova najveći doprinos smanjenju sagorijevanja goriva dolazi od novih tehnologija motora. Neki od ovih motora su već ušli u službu, a drugi se očekuju instalirani na novim zrakoplovima u bliskoj budućnosti. Ovi motori imaju veće omjere prenosnice (BRP) od prethodnih modela motora. U slučaju regionalnih mlažnjaka i zrakoplova s jednim prolazom kao što su MRJ, obitelj *Embraer E2*, *Airbus A220*, *A320neo* i *Boeing 737MAX*, novi motori rade na ovim zrakoplovima imaju BRP od 9 do 12, što omogućuje smanjenje sagorijevanja goriva od oko 15% u usporedbi s ranijim motorima sa BRP koji je obično od 5 do 6. Novi motori za širokotrupne zrakoplove uključujući *Airbus A330neo* i *Boeing 777-9* smanjuju sagorijevanje goriva za 10% u usporedbi s prethodnim motorima [47].

Napredak u zrakoplovnim sustavima može znatno smanjiti potrošnju goriva u trenutnim konfiguracijama zrakoplova. Neki od primjera [44]:

- Taksiranje zrakoplova nudi veliki potencijal uštede goriva u novim sustavima zrakoplova. *Safran* je razvio električni sustav taksiranja (engl. *Electric Green Taxiing System* - EGTS) koji se sastoji od elektromotora montiranih uglavnom u kotače stajnog trapa koji omogućuju taksiranje bez korištenja glavnog motora ili vučenog traktora.
- Predviđena je jedinica automatskog transformatora ispravljača (ATRU) kao izvor napajanja male težine za EGTS, koji pretvara 115 V izmjenične struje koji proizvodi pomoćni uređaj zrakoplova jedinica za napajanje (APU) na 540V DC koju zahtijevaju EGTS motori.

Zrakoplovna industrija obvezala se postići nultu neto emisiju ugljika do 2050. godine. Da bi se postigao ovaj cilj, potrebni su alternativni pogonski sustavi i izvori energije s niskom razinom ugljika koje će pomoći u smanjivanju emisija CO₂ u budućim zrakoplovima. Budući projekti zrakoplova Airbusa su: *ZEROe*, *CityAirbus NextGen*, *Blade*, *Bluecopter*, *EcoPulse* i *Racer*. *Airbus* planira prvi komercijalni zrakoplov s nultom emisijom do 2035. godine uz pogon zrakoplova na vodik. Konceptni zrakoplov *ZEROe* omogućuje istraživanje različitih konfiguracija i vodikovih tehnologija koje će pomoći oblikovati razvoj budućih zrakoplova s nultom emisijom. Svi zrakoplovi *ZEROe* su hibridni zrakoplovi na vodik pokretani izgaranjem vodika kroz modificirane plinske turbine. Tekući vodik se koristi kao gorivo za izgaranjem s kisikom. Osim toga, vodikove gorivne ćelije stvaraju električnu energiju koja nadopunjuje plinsku turbinu, što rezultira visoko učinkovitim hibridno-električnim pogonskim sustavom. 2022.

godine je pokrenut *ZEROe* s ciljem testiranja tehnologije izgaranja vodika na multimodalnoj platformi zrakoplova A380. Kroz buduća testiranja na zemlji i u tlu, očekuju se nove razine tehnološke spremnosti za pogonski sustav sa sagorijevanjem vodika do 2025. godine. Zrakoplovi koji spadaju u koncept *ZEROe*: *Turbofan*, *Turboprop* i *Blended-Wing Body – BWB*. *Turbofan* zrakoplov ima dva hibridna turboventilatorska motora na vodik koji daju potisak. Sustav za skladištenje i distribuciju tekućeg vodika se nalazi iza stražnje tlačne pregrade [47].

Turboprop zrakoplovu potisak daju dva hibridna turboprop motora na vodik, koji pokreću osmokrake propelere. Sustav za skladištenje i distribuciju se nalazi iza stražnje tlačne pregrade. Kod BWB iznimno široka unutrašnjost otvara više opcija za skladištenje i distribuciju vodika. Ovdje su spremnici tekućeg vodika pohranjeni ispod krila. Dva hibridna turboventilatorska motora na vodik daju potisak. Ovaj zrakoplov ima veliko leteće krilo, koje sadrži područje korisnog tereta (putnička kabina ili prostor za skladištenje tereta) unutar njegovog središnjeg dijela. U civilnom zrakoplovstvu, BWB se smatra tipičnim primjerom „futurističke“ nove kategorije zrakoplova. Njegov aerodinamični oblik omogućuje stvaranje uzgona cijelim zrakoplovom [44].

CityAirbus NextGen (slika 29) predstavlja potpuni električni prototip s četiri sjedala za vertikalno polijetanje i slijetanje (engl. *Electric vertical take-off and landing - eVTOL*). Temeljen na konceptu uzleta i krstarenja, dostiže operativni domet od 80 km/h i brzinu krstarenja od 120 km/h što ga čini pogodnim za operacije letenja bez emisija za različite primjene u gradovima i zajednicama. Koncept izrade žičare i krstarenja je godinama u izradi. *CityAirbus NextGen* je predstavio ideju za učinkovitu uslugu zračnog prijevoza između strateških lokacija u urbanim i prigradskim sredinama koje je poteklo iz ideje da se urbana mobilnost može poslužiti nebom na održiv način. *Airbus* je razvio dva električna VTOL ogledna demonstratora, *CityAirbus* i *Vahana* iz koje su izvučene razne lekcije koje su ključne za stvaranje prototipa *CityAirbus NextGen*, *Airbusove* nove generacije eVTOL-a [47].

Jedinstvena konfiguracija *CityAirbus NextGen*-a uključuje razne inovativne elemente dizajna koji čine robusnu i besprijekornu arhitekturu, a to su [47]:

- fiksno krilo,
- rep u obliku slova V i
- osam propelera na električni pogon kao dio jedinstveno dizajniranog distribuiranog pogonskog sustava.



Slika 29. Helikopter CityAirbus NextGen
Izvor: [47]

Vahana (slika 30) predstavlja demonstracijski model potpuno električnog vozila s jednim sjedalom i nagibnim krilima koje je dizajnirano za napredni let s električnim okomitim uzlijetanjem i slijetanjem (eVTOL) sa vlastitim pilotiranjem. U manje od dvije godine, *Vahana* je prešla iz skice do letećeg zrakoplova u punoj veličini. Osam elektromotora i tandemska konfiguracija nagnutih krila omogućilo je *Vahani* postizanje i okomitog polijetanja i slijetanja, kao i domet letova unutar grada samo uz pomoć baterije. Ukupno je *Vahana* letjela preko 138 probnih letova u punoj veličini [47].



Slika 30. Airbus Vahana
Izvor: [48]

CityAirbus NextGen dizajniran je omogućiti tihe letove od samog početka, omogućujući glatku integraciju i korištenje u urbanim sredinama. Kako bi se postigla najviša razina sigurnosti i osigurala maksimalna učinkovitost u fazama lebdenja i krstarenja, *CityAirbus NextGen* oslanjat će se na kombinaciju internih i eksternih komponenti. *Airbus* se udružio s *Thalesom* i *Diehlom* u razvoju računala za upravljanje četom tvrtke *NextGen*, te sa *MagicAll-om* za njegove električne motore. Također se planira suradnja sa *Spirit AeroSystems* na krilima prototipa. *Airbusovo* vozilo je

opremljeno operativnim automatiziranim načinom letenja te će biti prvo eVTOL vozilo koje će biti pilotirani kako bi vodilo sazrijevanju tržišta urbane zračne mobilnosti.

Aerodinamička tehnologija je kontinuirano napredovala kroz proteklo desetljeće proizvedeći nove konstrukcije zrakoplova sa značajno smanjenim otporom. Stvorena je tehnologija koja omogućuje znatno smanjenje otpora sprječavanjem turbulencija u strujanju zraka preko površina zrakoplova. *BLADE* predstavlja revolucionarni laminarni demonstrator zrakoplova kojem je cilj smanjiti trenje krila za 50%, čime bi se mogle smanjiti emisije CO₂ tijekom leta do 5%. Od rujna 2017. godine proizvedena su ispitivanja leta zrakoplovom *BLADE* koji je trenutno na testiranju u laboratoriju za letenje A340. Na zrakoplovu su vanjski dijelovi krila, od oko 10 metara širine, zamijenjeni laminarnim profilima [44].

U usporedbi sa današnjim zrakoplovima, sve revolucionarne tehnologije i konfiguracije zrakoplova imaju utjecaj na različite aspekte poslovanja. Većina ih je dizajnirana s ciljem smanjenja sagorijevanja goriva i CO₂ emisija. Međutim, dodatne pogodnosti dolaze s dodatnim izazovima za implementaciju tehnologija ili za svakodnevne operacije. Ovi izazovi uključuju [47]:

- okoliš (buka, kvaliteta lokalnog zraka),
- zemaljske operacije i infrastruktura,
- performanse leta,
- putnički i teretni aspekti,
- održavanje,
- industrijski aspekti (razvoj, proizvodnja) i
- certifikacija.

Vrlo veliki investicijski troškovi za programe novih zrakoplova su veliki rizik za proizvođače. Međutim, nove tehnologije će postati pristupačnije sa vremenom uz širu tehnologiju napretka. To bi bio slučaj npr. za materijale od karbonskih vlakana koji je zamijenio sve više metalnih komponenata letjelica.

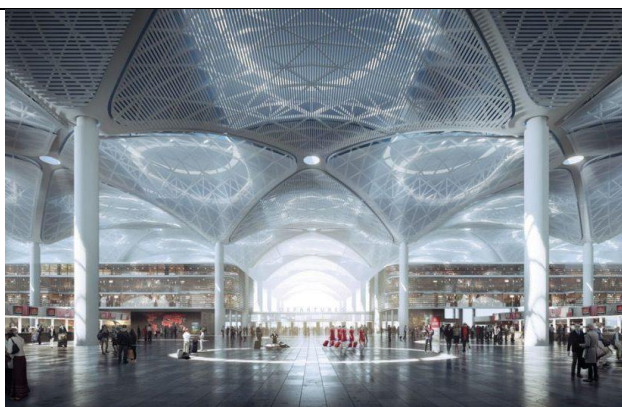
5.5 Budući razvoj zračnih luka

Nakon gotovo dvije godine pandemije Covid – 19 u kojem su zračne luke povremeno zaustavljale svoj rad, 2022. predstavlja nova ulaganja i razne planove za definiranje budućnosti putničkih zgrada i raznih projekata kako bi se prvenstveno utjecalo na smanjenje klimatskih promjena unatoč još uvijek aktualnoj pandemiji koronavirusom. Globalna nestabilnost, klimatske promjene i socijalne nejednakosti ostaju još uvijek izazovi u budućnosti, dok dulji učinci koronavirusa dovode do problema sa lancem opskrbe, manjkom radne snage i inflacije. S pandemijom koja ulazi u treću godinu, i uz pojavu novih varijacija virusa, uz već postojeće probleme u opskrbnom lancu, nedostatkom radne snage i inflacije, počinje konkurencija za

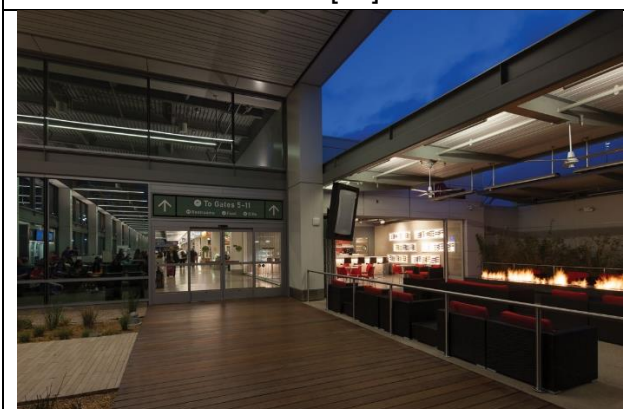
materijale i resurse koja do tada nije bila izražena u značajnoj mjeri. U različitim industrijama i vremenskim zonama dolazi do kašnjenja i pojave uskih grla u otpremi građevinskog materijala. Cilj u zračnoj industriji postaje poboljšanje dugoročne otpornosti i održivosti ponude građevinske industrije. Biti će potrebno da zračne luke ulože velika sredstva u temeljnu infrastrukturu unutar terminala, kao što je nadograđena električna i informacijska tehnologija (IT) koja će omogućiti budući rast. Važnost ovoga se očituje u činjenici da se u industrija okreće beskontaktnom procesu koji uključuje biometrijske tehnologije za ubrzavanje procesa prijave, provjere i carine. Vizija za budućnost je da zračne luke ne predstavljaju samo mjesto za dolazak i odlazak, već središte u kojem ljudi dolaze da bi se okupili i komunicirali. Zračne luke će postati same po sebi odredište, jednako važan dio putovanja kao i krajnja destinacija. Da bi se to postiglo, puno više se treba posvetiti procesu dolaska putnika na zračnu luku. Zračna luka *Changi* u Singapuru (slika 31) već ima *Jewel* - vrt leptira u kojem se putnici mogu povezati sa prirodom. Otvaranjem 2019. godine zračna luka namjerava postati samostalna destinacija, kako za međunarodne posjetitelje Singapura tako i za lokalno stanovništvo. Nova zračna luka u Istanbulu (slika 32) posjeduje veliku dvoranu namijenjenu samo da putnici sjede i opuste se čime je predstavljena ideja da ne treba biti komercijaliziran svaki kvadratni metar salona zračnih luka. U Zračnoj luci *Long Beach* (slika 33) u Kaliforniji, putnici mogu odmarati uz vatru dok čekaju let, dok na Zračnoj luci *Marseille* (slika 34) je uloženo u dizajn zračne luke da se dobije osjećaj provincije te ujedno omogućuje putnicima da promatraju zrakoplove u dolasku i odlasku [49].



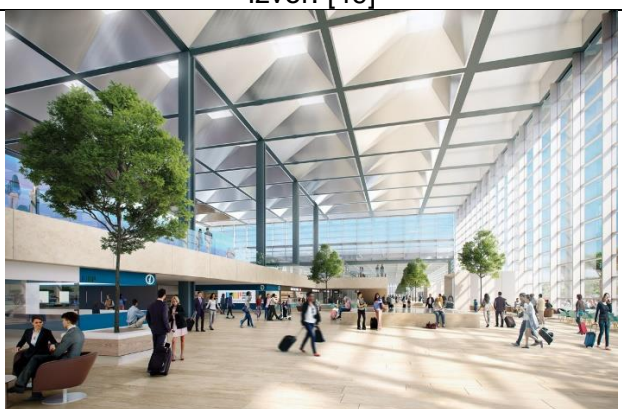
Slika 31. Zračna luka Changi
Izvor: [49]



Slika 32. Zračna luka Istanbul
Izvor: [49]



Slika 33. Zračna luka Long Beach
Izvor: [49]



Slika 34. Zračna luka Marseille
Izvor: [49]

Prijevozne tehnologije u nastajanju oblikuju sljedeću generaciju zračnog i zemaljskog prijevoza, koji će promijeniti radne uvjete u zračnim lukama i značajno pomoći u smanjenju utjecaja na okoliš. Elektrifikacija će smanjiti ovisnost o gorivima na bazi ugljikovodika, poboljšati javno zdravlje i ubrzati napredak u postizanju nulte neto emisije ugljika do 2050. maksimiziranje potencijala električne energije dovesti će do budućnosti koju karakteriziraju putovanja s nižim emisijama, napredni dizajn zrakoplova, čišća rješenja za prve i zadnje milje, nove usluge prijevoza kao što je napredna zračna mobilnost, povećanje broja povezanih i automatiziranih vozila unutar krajolika zračne luke i inovativni poslovni modeli za podršku i iskorištavanje novih tehnologija [50].

Kao sadašnja i buduća središta mobilnosti, zračne luke će morati ulagati u kapacitet i otpornost svojih postojećih distribucijskih mreža. Električni pogonski sklopovi predstavljaju budućnost automobila jer omogućuju nulte emisije u ispušnoj cijevi. Baterijska električna vozila (engl. *Battery Electric Vehicle* - BEV) i vodikova gorivna električna vozila (engl. *Fuel Cell Electric Vehicles* - FCEV) dio su većeg kretanja prema povezanim i automatiziranim vozilima koja pokreću napredni pogonski sustavi. Ove inovacije utjecat će na mobilnost od/do/u zračnoj luci, uključujući i zračnu i kopnenu stranu. Električni autobusi će se sve više koristiti za pružanje rješenja masovnog prijevoza na zračnoj luci. Oprema za zemaljsku podršku (engl. *Ground*

Support Equipment - GSE) predstavlja kritičan dio operacija zračnog prijevoznika koji omogućuje sigurnu i učinkovitu otpremu zrakoplova. Uz to što štedi novac na gorivu i troškovima održavanja, GSE također pozitivno pridonosi respiratornom zdravlju radnika u zračnoj luci i podržava napore za poboljšanje kvalitete zraka i smanjenje ugljičnog otiska. Zračni prijevoznici prednjače, ali često su ograničeni postojećom infrastrukturom električne mreže zračnih luka [51].

Elektrifikacija napreduje i u objektima putničkog terminala, na primjer, zamjenom sustavom grijanja zgrada koje se temelje na fosilnim gorivima potpuno električnim rješenjima koja koriste geotermalne i visokoučinkovite toplinske pumpe na zrak. Mrežni operatori zračnih luka pretpostavljaju da će baterije postati ključni alat za elektrifikaciju. Baterije će moći biti uparene sa svim DC brzim punjačima, ili će se moći centralizirati u blizini trenutne trafostanice ili središnjeg postrojenja.

Na pomolu su letovi na kratkim relacijama električnim zrakoplovima. Ovi mali, tiši zrakoplovi dio su napredne zračne mobilnosti (engl. *Advanced Air Mobility* - AAM). AAM se ne odnosi samo na nove zrakoplove i svemirske tehnologije; ono predstavlja potpuno novi način putovanja zračnim putem unutar velikih gradskih područja (urbana zračna mobilnost) s vertikalnim ili kratkim uzlijetanjem i slijetanjima zrakoplova, kao i između malih gradova i ruralnih područja sa konvencionalnim uzlijetanjem i slijetanjem zrakoplova. Ta vozila će koristiti električne ili hibridne pogonske sustave sa nultom emisijom i niskom razinom buke. Tehnologije bi trebale imati niže ukupne troškove rada zbog smanjenja troškova održavanja od sustava koji imaju puno manje pokretnih dijelova, što potencijalno čini putovanje zrakoplovom još dostupnijim. AAM bi mogao postati komercijalna stvarnost u nadolazećim godinama, nudeći letove na kratkim relacijama koji pružaju usluge na zahtjev od točke do točke, koje bi se mogle kombinirati sa mobilnošću na zemlji kako bi se formirala mobilnost temeljena na pametnim telefonima od vrata do vrata. AAM će pružiti ogroman potencijal za transformaciju unutar regionalnog zračnog prometa, povezivajući više zajednica sa zračnim prometom i povećavanjem aktivnosti manjih zračnih luka. Predviđa se povećanje raznolikosti zrakoplova i usluga u komercijalnim zračnim lukama [51].

Iako buduće promjene ovise o tempu tehnološkog napretka, zračne luke trebaju usmjeriti na izgradnju i unaprjeđenje infrastrukture kako bi bile u mogućnosti prihvatiti novitete koji će se pojaviti u budućnosti. Električna vozila pružaju priliku za napredak zračnih luka kao energetskih čvorišta i infrastrukturnih sredstava za proizvodnju, skladištenje i distribuciju električne energije. Mnoge zračne luke imaju prostor za stacionarne baterije, solarne elektrane ili druge sustave za proizvodnju energije koji mogu opskrbiti cijelu zračnu luku u slučaju kvara, povećati otpornost opskrbe električnom energijom za zajednice u blizini i generirati nezakonite prihode preprodajom viškova. Nova generacija rezervnih sustava, temeljena na visoko učinkovitim baterijskim napajanjima ili vodikovim gorivnim ćelijama, zamjenjuje tradicionalne dizelske generatore. Štoviše, električni autobusi i automobili, koji su već dio kopnenog prijevoza zračne luke, mogu se povezati s električnom distribucijskom mrežom zračne luke za prijenos energije sa jednog vozila na drugo i/ili djelovati kao

lokalni baterijski sklop koji omogućuje uštedu troškova koja se dijeli među zračnih luka i vlasnika vozila [51].

Iako su prednosti jasne, zračne luke često imaju ograničen rezervni električni kapacitet i nemaju sredstava za nadogradnju električnih usluga što se posebno odnosi na manje i udaljenije zračne luke. Zračne luke predstavljaju velike potrošače električne energije zbog operacija na zračnim lukama i zbog raznih potreba terminala koji uključuju sustave grijanja, pokretne stepenice, rukovanje prtljagom i pokretne trake, dizala za usluge/posjetitelje, trgovine i restorane. Pametni sustavi upravljanja punjenjem mogu osigurati da se većina punjenja završi kada je električna energija najjeftinija, što je obično preko noći, budući da su ostala električna opterećenja u zračnoj luci niska tijekom tog vremena. Pametno upravljanje napajanjem također može smanjiti vršno opterećenje u postojećim postrojenjima s dijeljenjem napajanja, na primjer, između mlaznih mostova i električnih GSE punjača.

Prelazak na električna i autonomna vozila utjecat će na korištenje zemljišta u zračnim lukama i na tradicionalne zahtjeve parkiranja. Uz manju potrebu za parkingom na licu mjesta, zemljište i objekti se mogu osloboditi za druge svrhe, uključujući proizvodnju energije, stacionarno skladištenje električne energije u baterijama i punjenje novih vozila čime se stvaraju novi izvori za povećanje prihoda. Vozila u zajedničkim mrežama mobilnosti bi se mogla priključiti na električne punionice, a hotelski i gradski autobusi koji prolaze kroz zračne luke također bi mogli pristupiti točkama za punjenje smještenim na bivšim parkiralištima. Neke zračne luke, prepoznajući da će električna energija igrati ključnu ulogu u poticanju boljeg protoka prometa, već i danas nude brze punionice za TNC vozila koja bi mogla napuniti [51].

U zračnim lukama se sve više koriste nove tehnologije koje uključuju između ostalog, korištenje robota za pružanje informacija putnicima i autonomnih vozila za prijevoz prtljage na terminalima te služe kao prijevoz do aerodroma za zaposlenike. Uvođenjem robota na zračnoj luci, radna snaga će biti puno manja i koncentrirana na uloge koje se odnose na korisnike. Na nekim zračnim lukama kao što su Zračna luka Oakland ili u Geneva, roboti (slika 35) već putnicima izražavaju dobrodošlicu, odgovaraju na njihova pitanja, otprate ih te na kraju i počiste za njima.



Slika 35. Primjena robota na Zračnoj luci Oakland
Izvor: [52]

Povezivost sa pametnim telefonima, digitalno određivanje puta i biometrijski skeneri utječu na poboljšanje usluge na zračnim lukama. Kako se cijela zračna luka razvija primjenom ekološki orijentiranih rješenja kao što je korištenje solarnih panela, izgledi i planovi u vezi uvođenja električne energije u zračnim lukama bi se trebali poboljšavati u budućnosti. Bilo da se zračne luke razvijaju kao sami mini-gradovi, poznati kao aerotropolisi, ili kao manje nadograđene strukture koje nude zračni promet i razne pogodnosti terminala, svaka zračna luka trebala bi procijeniti trenutnu potrošnju energije i potencijal proizvodnje kao sastavni korak u svom planiranju za budućnost. Danas zrakoplovstvo čini oko 2% emisije ugljika i 3,5% pokretača klimatskih promjena. Cilj je nastaviti sa poduzimanjem koraka za smanjenje emisija i postizanje ugljične neutralnosti do 2050. godine, sa pojedinačnim zračnim lukama i zračnim prijevoznicima koji se obvezuju dosegnuti neto nulte emisije do 2030. godine [51].

6. ZAKLJUČAK

Razvoj mlaznih zrakoplova započinje nakon drugog svjetskog rata kada je krenula masovna proizvodnja. Kroz godine se mijenjala tehnika izrade zrakoplova te kroz četiri generacije su vidljive promjene koje su nastupile u razvoju zrakoplova. Prva generacija komercijalnih mlaznih zrakoplova javlja se 1950-ih i 1960-ih godina te je bila ograničena analognom elektronikom tog doba. Druga generacija zrakoplova uvodi poboljšane sustave za automatsko letenje. Treća generacija zrakoplova je napredovala u pitanju digitalnih tehnologija te je uvela stakleni kokpit što je u velikoj mjeri poboljšalo navigacijske sposobnosti. Karakteristike četvrte generacije zrakoplova je korištenje tehnologije *fly-by-wire* koja se trenutno koristi na svakom proizvedenom zrakoplovu.

Uvođenje zrakoplova nove generacije utječe se na sve aspekte planiranja novih i nadogradnju postojećih zračnih luka, od veličine uzletno-sletne staze do broja automobilskih mjesta na parkiralištu. Zrakoplovna industrija ima najveću stopu rasta od svih oblika prijevoza i mogla bi imati ozbiljne posljedice na okoliš u vidu onečišćenja na lokalnoj i globalnoj razini. Pritisak na smanjenje goriva koji će dovesti do smanjenja učinka zagrijavanja klime uslijed izgaranja goriva ugljikovodika, u budućnosti vjerojatno će se još povećavati. Količina izgorjelog goriva će ovisiti o težini, brzini i otporu zrakoplova. Jedan od načina smanjivanja sagorijevanja goriva leži u značajnom smanjenju težine zrakoplova. Korištenje GPU može poslužiti za smanjenje potiska motora ili korištenje odvojivih ili prizemnih podvozja. Međutim, najučinkovitiji pristup je izrada novih koncepata zrakoplova. Tradicionalni proizvođači zrakoplova poput *Airbusa* i *Boeinga*, ako i specijalizirane start-up tvrtke, istraživačke institucije i akademske zajednice rade na nizu novih koncepata zrakoplova. Glavni trendovi u razvoju u budućnosti također su u novim konfiguracijama zrakoplova koji uključuju revolucionarne pogonske tehnologije, materijale i strukture. Njihov razvoj i implementacija, uključujući potrebne prilagodbe u infrastrukturi zračne luke, zahtjeva dosta vremena.

Zračna industrija zbog posljedica pandemije, treba dodatno ulagati u promjene za poboljšanje kvalitete putnika da bi povratila broj i dobit u vrijeme prije pojave koronavirusa. Osim ulaganja u osnovnu infrastrukturu, potrebno je ulagati u nove tehnologije, te na otpornost na klimatske i pandemijske promjene. Zračne luke se umjeravaju na ugljično neutralni utjecaj na okoliš. Porast društvene svijesti o klimatskim promjenama potaknut će zračne luke na konkretna rješenja u bliskoj budućnosti. Objekti zračne luke bit će okrenuti vjetru, geotermalnoj i solarnoj energiji ne samo za smanjenje emisija ugljika, već i za stvaranje samoodrživih postrojenja koje se ne oslanjaju na mrežu za napajanje. Predviđa se da će zračne luke u budućnosti postati više poput središta gradova što će potaknuti i osobe koje nisu putnici da dođu u prostore zračne luke. Proširenje zračnih luka će uključivati najam ili kupnju susjednih zemljišta za stvaranje javnog prostora, kao što su javni parkovi. Trenutno, zračne luke

su usmjerene više na učinkovitije iskorištavanje postojećeg prostora nego za porastom kapaciteta no kako bi se omogućio budući rast, zračne luke će morati ulagati u osnovnu infrastrukturu. U budućnosti se planira povezivanje zračne luke sa dodatnim tranzitnim sustavima. Željeznica može biti točka povezivanja zračne luke sa sustavim javnog prijevoza koji su dizajnirani za rješavanje mobilnosti od vrata do vrata, odnosno od kuće do zračne luke s čime će se postići bolje iskustvo putnika.

Prelazak na alternativna goriva predstavlja budućnost zrakoplovstva. Gorivne ćelije imaju sposobnost uzimanja dva uobičajena plina, vodika i kisika, te njihova proizvodnja je već na tržištu i daleko izvan laboratorijske faze. Današnja tehnologija samo razmatra pomoćnu pogonsku jedinicu za povećanje, ali ne i zamjenu glavnog pogonskog postrojenja zrakoplova. U budućnosti je potrebno obratiti pažnju na skladištenje komprimiranog vodika. Tlačne posude za sustav tekućeg plina su velike i teške i predstavljaju veliku prepreku izvođenju praktičnih dizajna za značajne domete u vozilima pune veličine. Korištenje solarnih elektrana predstavlja značajnu priliku za zračne luke zbog velike količine otvorenog zemljišta. Solarni PV ima nizak profil i može imati male ili nikakve utjecaje na letačke operacije. Solarni sustavi su uspješno implementirani u desetke zračnih luka diljem svijeta. Uspješnost implementacije solarnih sustava u zračne luke ovisi o detaljnom planiranju i određivanju lokacije, potencijala, utjecaja na divlje životinje, performanse sustava i sigurnosti.

LITERATURA

- [1] AIRBUS. Generations of Jet. *Evolution of Commercial Jet Aircraft*. Preuzeto s: <https://accidentstats.airbus.com/statistics/generations-of-jet> [Pristupljeno: 16. ožujka 2022.]
- [2] Patterson JW. *Impact of new large aircraft on airport design*. Final report; 1998. Preuzeto s: <https://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ar97-26.pdf> [Pristupljeno: 16. ožujka 2022.]
- [3] Avjobs. Aviation Job Search. *History of Aviation – First Flights*. Preuzeto s: <https://www.avjobs.com/history/index.asp> [Pristupljeno: 9. travnja 2022.]
- [4] AIRBUS. Generations of Jet. *Evolution of Commercial Jet Aircraft*. Preuzeto s: <https://accidentstats.airbus.com/statistics/generations-of-jet> [Pristupljeno: 22. travnja 2022.]
- [5] National Air and Space Museum. *Commercial Aviation*. Preuzeto s: <https://airandspace.si.edu/commercial-aviation> [Pristupljeno: 22. travnja 2022.]
- [6] Simple Flying. *The Evolution Of the Airplane*. Preuzeto s: <https://simpleflying.com/the-evolution-of-the-airplane/> [Pristupljeno: 22. travnja 2022.]
- [7] TIME. The 1980s Generation. Preuzeto s: <https://web.archive.org/web/20071119123452/http://www.time.com/time/magazine/article/0,9171,1684552,00.html> [Pristupljeno: 22. travnja 2022.]
- [8] THALES. *Building a future we can all trust*. Preuzeto s: <https://www.thalesgroup.com/en/global/activities/aerospace/flight-deck-avionics-equipment-functions/flight-deck/learn-more-about> [Pristupljeno s: 22. travnja 2022.]
- [9] AIRBUS. A310. Preuzeto s: <https://www.airbus.com/en/who-we-are/our-history/commercial-aircraft-history/previous-generation-aircraft/a310> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [10] SkyBrary. *Electronic Flight Instrument System*. Preuzeto s: <https://skybrary.aero/articles/electronic-flight-instrument-system> [Pristupljeno: 3. svibnja 2022.]
- [11] SkyBrary. *Flight Management System*. Preuzeto s: <https://skybrary.aero/articles/flight-management-system> [Pristupljeno: 3. svibnja 2022.]
- [12] SkyBrary. *Terrain Avoidance and Warning System (TAWS)*. Preuzeto s: <https://skybrary.aero/articles/terrain-avoidance-and-warning-system-taws#:~:text=A%20Terrain%20Avoidance%20and%20Warning,potentially%20hazardous%20proximity%20to%20terrain> [Pristupljeno: 10. svibnja 2022.]

- [13] SkyBrary. *Fly-By-Wire*. Preuzeto s: <https://skybrary.aero/articles/fly-wire> [Prisupljeno: 10. svibnja 2022.]
- [14] Australia map directory. *Boeing 787 Dreamliner*. Preuzeto s: <https://stringfixer.com/pt/B787> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [15] SAE.INTERNATIONAL. *Boeing and NASA unveil lightweight, ultra-thin, more aerodynamic Transonic Truss-Braced Wing concept*. Preuzeto s: <https://www.sae.org/news/2019/01/boeing-and-nasa-unveil-lightweight-ultra-thin-more-aerodynamic-transonic-truss-braced-wing-concept> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [16] IATA. *Airport Infrastructure*. Preuzeto s: <https://www.iata.org/en/programs/ops-infra/airport-infrastructure/> [Pristupljeno: 3. svibnja 2022.]
- [17] Simple Flying. *Airport Infrastructure – Everything You Need To Know*. Preuzeto s: <https://simpleflying.com/airport-infrastructure/> [Pristupljeno: 3. svibnja 2022.]
- [18] Pavlin S. *Aerodromi I*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti, Sveučilišta u Zagrebu; 2016.
- [19] Bračić M. Autorizirana predavanja. Preuzeto s: <https://moodle.srce.hr/2021-2022/course/view.php?id=97723> [Pristupljeno: 3. svibnja 2022.]
- [20] APOG LABS. *Extra Large Stand with Convertible Option to 2 Medium Stands (a.k.a. MARS Stands)*. Preuzeto s: <https://forum.apoglabs.com/t/extra-large-stand-with-convertible-option-to-2-medium-stands-a-k-a-mars-stands/14633> [Pristupljeno: 1. kolovoza.2022.]
- [21] AERTEC. *Airports for long-term aircraft parking*. Preuzeto s: <https://aertecsolutions.com/en/2019/11/18/airports-for-long-term-aircraft-parking/> [Pristupljeno: 16. svibnja 2022.]
- [22] MALAYSIA AIRPORTS. *Kuala Lumpur*. Preuzeto s: <http://airports.malaysiaairports.com.my/> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [23] YOUR MILEAGE MAY VARY. *How and why planes are de-iced before takeoff*. Preuzeto s: <https://yourmileagemayvary.net/2020/12/01/how-and-why-planes-are-de-iced-before-takeoff/> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022]
- [24] Alfredić I., *Planiranje kapaciteta putničke zgrade zračne luke*. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti; 2017. Preuzeto s: <https://repositorij.fpz.unizg.hr/islandora/object/fpz%3A795/datastream/PDF/view> [Pristupljeno: 16. svibnja 2022.]
- [25] SPIEGEL Wirtschaft. *Berliner Flughafen Tegel kann am 15. Juni schliessen*. Preuzeto s: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/berlin-flughafen-tegel-kann-am-15-juni-schliessen-a-de2bec28-348d-4c84-bfb6-2a58b4528a2f> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]

- [26] AIRPORT WORLD. *The magazine of Airports Council International. Frankfurt Airport Terminal 1 set to celebrate 50th anniversary.* Preuzeto s: <https://airport-world.com/frankfurt-airports-terminal-1-set-to-celebrate-50th-anniversary/> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [27] Sketchfab. *Charles de Gaulle airport Terminal 1 – Paris.* Preuzeto s: <https://sketchfab.com/3d-models/charles-de-gaulle-airport-terminal-1-paris-0dbd7259122047ab8fa8bea90a388713> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [28] ferrovial press room. *Heathrow T5 marks its 10th anniversary in style.* <https://newsroom.ferrovial.com/en/news/heathrows-t5-marks-its-10th-anniversary-in-style/> Preuzeto s: [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022]
- [29] dezeen. *New York JFK airport to receive 10 billion revamp.* <https://www.dezeen.com/2017/01/05/new-york-john-f-kennedy-airport-to-receive-10-billion-dollar-revamp/> Preuzeto s: [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [30] BLACKLANE. *A guide to Chicago International Airport.* Preuzeto s: <https://blog.blacklane.com/travel/airports/a-guide-to-chicago-ohare-international-airport-ord/> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [31] AIRBUS. *Unique passenger experience.* Preuzeto s: <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/passenger-aircraft/a380> [Pristupljeno: 22. svibnja 2022.]
- [32] DW. *Made for minds. Airbus A380: The end of a multibillion-dollar dream.* Preuzeto s: AIRBUS. *Unique passenger experience.* Preuzeto s: <https://www.dw.com/en/airbus-a380-the-end-of-a-multibillion-dollar-dream/a-60124995> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [33] Burns & McDonnell. *How Will New Large Aircraft Affect Your Airport Facilities?* Preuzeto s: https://www.wbdg.org/files/pdfs/aviationreport_burns_mcdonnell.pdf [Pristupljeno: 27. svibnja 2022.]
- [34] ARUP. *How do you accommodate an A380 at an airport?* Preuzeto s: <https://www.arup.com/perspectives/how-do-you-accommodate-an-a380-at-an-airport> [Pristupljeno: 1. lipnja 2022.]
- [35] tumblr. *Airbus A380.* Preuzeto s: <https://a380flightdeck.tumblr.com/post/165006709690/the-jet-bridge-that-strange-too-often> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [36] Architects Journal. *Heathrow drops new Terminal 6 from expansion plans.* Preuzeto s: <https://www.architectsjournal.co.uk/news/heathrow-drops-new-terminal-6-from-expansion-plans> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [37] AIRPORT TECHNOLOGY. *London Heathrow Airport Expansions (LHA/EGLL).* Preuzeto s: <https://www.airport-technology.com/projects/heathrow5/> [Pristupljeno: 3. lipnja 2022.]

- [38] IDOM. *Car park at Heathrow airport*. Preuzeto s: <https://www.idom.com/en/project/car-park-at-heathrow-airport/> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [39] IATA. *Aircraft Technology Roadmap to 2050*. Preuzeto s: https://www.google.com/url?q=https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/Technology-roadmap-2050.pdf&source=gmail&ust=1657292492408000&usg=AOvVaw3JrQ_FyLihp1L94JPL809S [Pristupljeno: 4. lipnja 2022.]
- [40] CleanSky. *Hydrogen-powered aviation*. Preuzeto s: https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/20200720_Hydrogen%20Powered%20Aviation%20report_FINAL%20web.pdf [Pristupljeno: 16. lipnja 2022.]
- [41] AIRBUS. *How to store liquid hydrogen for zero-emission flight*. Preuzeto s: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-12-how-to-store-liquid-hydrogen-for-zero-emission-flight> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [42] ONREAL. *Implementing Solar Technologies at Airport*. Preuzeto s: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/62349.pdf> [Pristupljeno: 27. lipnja 2022.]
- [43] Solar Power World. *7 cool solar installation at U.S. airports*. Preuzeto s: <https://www.solarpowerworldonline.com/2016/03/7-cool-solar-installations-at-u-s-airports/> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [44] AZO MATERIALS. *Solar Powered Aircraft: Current Knowledge and Advances*. Preuzeto s: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=21135> [Pristupljeno: 27. lipnja 2022.]
- [45] ACARE. European Commission. *Out Of The Box. Part II*. Preuzeto s: [file:///C:/Users/karla/Downloads/Out_of_the_Box_Ideas_about_the_future_of_air_transport_%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/karla/Downloads/Out_of_the_Box_Ideas_about_the_future_of_air_transport_%20(2).pdf) [Pristupljeno: 27. lipnja 2022.]
- [46] NASA. *Next Generation Civil Transport Aircraft Design Consideration for Improving Vehicle and System-Level Efficiency*. Preuzeto s: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20140008298/downloads/20140008298.pdf> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [47] AIRBUS. *Future aircraft*. Preuzeto s: <https://www.airbus.com/en/sustainability/environment/future-aircraft> [Pristupljeno: 27. lipnja 2022.]
- [48] TRANSPORT UP. *The Latest News for Aerial Mobility. Airbus Vahana*. Preuzeto s: <https://transportup.com/airbus-vahana/> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]
- [49] THE POSSIBLE. *So what will be doing in the airport of the future? Anything we want*. Preuzeto s: <https://www.the-possible.com/airport-destination-spirit-of-place/> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]

[50] Gensler. *Design Forecast 2022*. Preuzeto s: <https://www.gensler.com/doc/gensler-design-forecast-2022> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]

[51] WSP. *Electrification of Airports From Landside to Airside*. Preuzeto s: <https://www.airbus.com/en/sustainability/environment/future-aircraft> [Pristupljeno: 3. kolovoza 2022.]

[52] THE POSSIBLE. *Facial recognition and intelligent vacuum cleaners: Welcome to the automated airport*. Preuzeto s: <https://www.the-possible.com/automated-airport/> [Pristupljeno: 1. kolovoza 2022.]

POPIS KRATICA

- TAWS (Terrain Avoidance and Warning System) sustav svjesnosti o terenu i upozorenja
- CFIT (Controlled Flight Into Terrain) nesreće kontroliranog leta na teren
- LOC-I (Loss Of Control) gubitak kontrole u letu
- RATO (Rocket Assistent Take Off) uzlijetanje uz pomoć rakete
- ETOPS (Extended-range Twin-engine Operational Performance Standards) operativne performanse sa dvostrukim motorom proširenog raspona
- CRT (Cathode Ray Tubes) katodne cijevi
- FMS (Flight Management System) sustav upravljanja letom
- EFIS (Eletronic Flight Instrument System) sustav elektroničkih letnih instrumenata
- LCD (Liquid Crystal Display) višebojni zaslone s tekućim kristalima
- EADI (Electronic Attitude Director Indicator) elektronički pokazivač smjera
- EHSI (The Electronic Horizontal Situation Indicator) elektronički vodoravni indikator situacije
- FMS (Flight Management System) sustav upravljanja letom
- AFCS (Automatic Flight Control System) automatski sustav kontrole leta
- AFGS (Automatic Flight Guidance System) automatski sustav navođenja leta
- IRS (Inertial Reference System) inercijski referentni sustav
- GPS (Global Positioning System) sustav globalnog pozicioniranja
- AHRS (Attitude and reference system) sustav svjesnosti o terenu i upozorenja
- NASA (The National Aeronautics and Space Administration) Nacionalna aeronautička i svemirska administracija
- TTBW (Transonic Truss-Braced Wing) transsonično krilo sa nosačima
- FAA (Federal Aviation Administration) Savezna uprava za zrakoplovstvo
- ARC (Airworthiness Review Certificate) potvrda o provjeri plovivosti
- CTOL (Conventional Take Off and Landing) konvencionalno polijetanje i slijetanje
- RTOL (Reduced Take Off and Landing) reducirano polijetanje i slijetanje
- STOL (Short Take Off and Landing) kratko polijetanje i slijetanje

BWB (Blended wing body) miješano krilo zrakoplova

VTOL (Vertical Take Off and Landing) vertikalno polijetanje i slijetanje

ICAO (International Civil Aviation Organization) Međunarodna organizacija civilnog zrakoplovstva

MARS (Multiple Apron Ramp System) fleksibilno korištenje pozicija

IATA (International Air Transport Association) Međunarodno udruženje zrakoplovnih kompanija

OANS (Onboard Airport Navigation System) sustav za navigaciju u zračnoj luci

BAA (Baltic Aviation Academy) Baltička zrakoplovna akademija

HEFA (Hydrotreated Esters and Fatty Acids) hidrotretirani esteri i masne kiseline

SAF (Sustainable Aviation Fuel) održivo zrakoplovno gorivo

LH2 (Liquid hydrogen) tekući hidrogen

DC (Direct current) istosmjerna struja

AC (Alternating current) izmjenična struja

HALE (High-altitude long endurance) duga izdržljivost na velikim visinama

PV (Photovoltaic) fotonaponske ćelije

CSP (Concentrated solar power) koncentrirana solarna energija

SHC (Solar heating & cooling) solarni toplinski kolektori za grijanje i hlađenje

OPV (Organic Photovoltaics Research) organski fotonaponski uređaji

MPPT (Maximum Power Point Tracking) uređaj za praćenje maksimalne snage

APU (Auxiliary Power Unit) pomoćni izvor napajanja

GPU (Ground Power Unit) zemaljski izvor napajanja

EGTS (Electric Green Taxiing System) električki sustav taksiranja

BEV (Battery Electric Vehicle) baterijska električna vozila

FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles) vodikova gorivna električna vozila

GSE (Ground Support Equipment) oprema za zemaljsku podršku

AAM (Advanced Air Mobility) napredna zračna mobilnost

POPIS SLIKA

Slika 1. Tipičan prikaz razvoja zrakoplova	4
Slika 2. Datum uvođenja zrakoplova	5
Slika 3. Trendovi dužina i visina zrakoplova	6
Slika 4. Trend međusovinskog razmaka	7
Slika 5. Zrakoplov Havilland Comet	9
Slika 6. Zrakoplov Boeing B737	11
Slika 7. Zrakoplov Airbus A310	13
Slika 8. Zrakoplov Boeing 737	16
Slika 9. Zrakoplov Boeing TTBW	18
Slika 10. Sustav fleksibilnog parkiranja	27
Slika 11. Izolirana parkirna pozicija	28
Slika 12. Stajanka za odleđivanje i zaštitu zrakoplova protiv zaleđivanja	29
Slika 13. Zračna luka Berlin - Tegel	33
Slika 14. Zračna luka Frankfurt - Terminal 1	33
Slika 15. Zračna luka Charles de Gaulle	33
Slika 16. Zračna luka Heathrow - Terminal 5	33
Slika 17. Zračna luka John F. Kennedy	33
Slika 18. Zračna luka O'Hare	33
Slika 19. Zrakoplov Airbus A380	37
Slika 20. Motor zrakoplova Airbus A380	39
Slika 21. Zračna luka Heathrow	43
Slika 22. Tri aviomosta spojena na zrakoplov Airbus A380	44
Slika 23. Terminal Pier 6	45
Slika 24. Novo parkiralište Zračne luke Heathrow	47
Slika 25. Prikaz zamjena generacija zrakoplova	49
Slika 26. Shematski prikaz spremnika vodika	52
Slika 27. Konceptni zrakoplov Airbus ZEROe	53
Slika 28. Zračna luka Tucson	56
Slika 29. Helikopter CityAirbus NextGen	60
Slika 30. Airbus Vahana	60
Slika 31. Zračna luka Changi	63
Slika 32. Zračna luka Grimshaw	63
Slika 33. Zračna luka Long Beach	63
Slika 34. Zračna luka Marseille	63
Slika 35. Primjena robota na Zračnoj luci Oakland	66

POPIS TABLICA

Tablica 1. Minimalne visine odluke i vidljivosti za staze za precizni prilaz	21
Tablica 2. Referentni kod zračne luke	21
Tablica 3. Širina uzletno-sletne staze	21
Tablica 4. Sigurnosni razmak	24
Tablica 5. Širina staze za vožnju	24
Tablica 6. Zaštitni razmaci	26
Tablica 7. Dimenzije zrakoplova A380.....	40
Tablica 8. Operativni podaci o zrakoplovu A380	41

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je **ZAVRŠNI RAD**
(vrsta rada)
isključivo rezultat mogega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom **UTJECAJ ZRAKOPLOVA NOVE GENERACIJE NA INFRASTRUKTURNI DIZAJN AERODROMA**, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, _____

(ime i prezime, *potpis*)