

Nemanja Nešković, mast.inž.grad.¹
v. prof. dr Goran Mladenović, dipl.grad.inž.²

METODA ACR-PCR ZA ANALIZU NOSIVOSTI KOLOVOZNIH KONSTRUKCIJA NA AERODROMIMA

0352-2733, 57 (2025), p. 37-61
doi: 10.5937/GK25057037N

UDK: 625.717:624.046
PREGLEDNI RAD

Rezime

Stalni porast mase aviona i opterećenja po točkovima glavnih stajnih trapova i pritiska u pneumaticima, kao i konstantan rast saobraćaja, odnosno povećanje broja avio-operacija, postavljaju sve veće zahteve u pogledu nosivosti kolovoznih konstrukcija.

Međunarodna organizacija civilnog vazduhoplovstva (International Civil Aviation Organization - ICAO) je 1981. godine uvela prvu standardizovanu metoda za izveštavanje o nosivosti kolovoznih konstrukcija na manevarskim površinama aerodroma, koja je poznata kao ACN-PCN (Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number) metoda. Međutim, ova metoda je bila zasnovana na empirijskim metodama i parametrima materijala i nije omogućavala konzistentnost između postupaka za dimenzionisanje i analizu nosivosti kolovoznih konstrukcija na aerodromima, kao ni analizu uticaja pod kompleksnim stajnim trapovima savremenih aviona. Nova metoda ACR-PCR koja je usvojena 2020. godine i koja se primenjuje od 2024. godine prevazilazi ova ograničenja i omogućava znatno pouzdaniju analizu nosivosti kolovoznih konstrukcija na aerodromima.

U radu su prikazane osnove obe metode, a njihova primena je ilustrovana na studiji slučaja jedne fleksibilne i jedne krute kolovozne konstrukcije.

Ključne reči: manevarske saobraćajne površine, aerodromi, nosivost, ACN-PCN, ACR-PCR

¹ Stellenbosch University, Department of Civil Engineering, Banghoek Rd, 7600 Stellenbosch, Južnoafrička Republika

² Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Srbija, emladen@imk.grf.bg.ac.rs

ACR-PCR METHOD FOR BEARING CAPACITY ANALYSIS OF AIRPORT PAVEMENTS

Summary

The constant increase in aircraft weight and main landing gear wheel loads, as well as tire pressure, along with the continuous growth in traffic, i.e., an increase in the number of flight operations, places ever-increasing demands on the load-bearing capacity of airports' pavement structures.

In 1981, the International Civil Aviation Organization (ICAO) introduced the first standardized method for reporting the load-bearing capacity of pavement structures on airport maneuvering areas, known as the ACN-PCN (Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number) method. However, this method was based on empirical methods and material parameters and did not allow for consistency between procedures for the design and performance analysis of airport pavement structures, nor for the analysis of the impact of complex landing gears of modern aircrafts. The new ACR-PCR method, adopted in 2020. year, and which has been in effect since 2024, overcomes these limitations and allows for a significantly more reliable analysis of pavement structures at traffic areas at airports.

The paper presents the fundamentals of both methods, and their application is illustrated with a case study of one flexible and one rigid runway pavement structure.

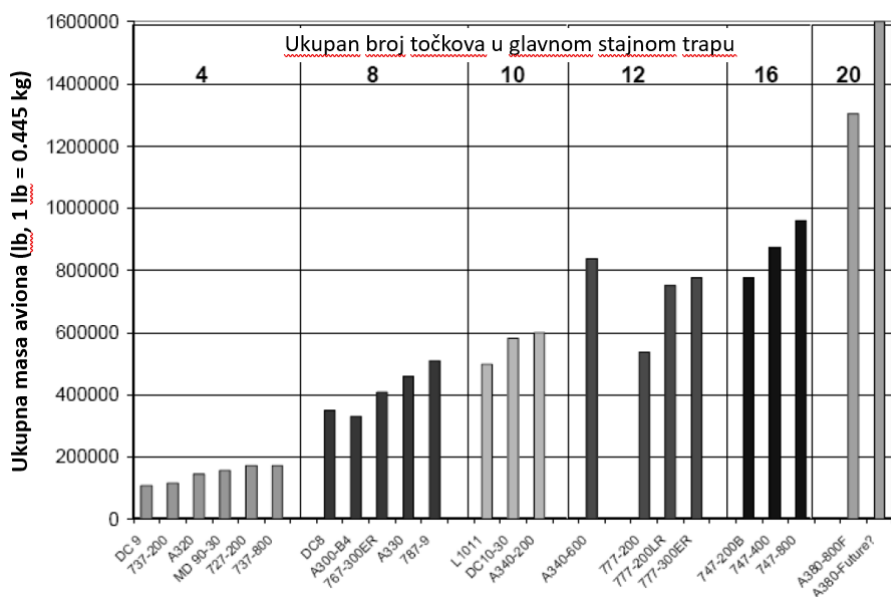
Keywords: maneuvering traffic areas, airports, load-bearing capacity, ACN-PCN, ACR-PCR

1. UVOD

Kolovozne konstrukcije na aerodromskim manevarskim površinama služe da omoguće predviđeni broj operacija određene flote aviona tokom projektnog perioda. One čine približno 30% ukupnih troškova izgradnje aerodroma i 50% troškova održavanja aerodromske infrastrukture [1].

Potrebna nosivost kolovozne konstrukcije zavisi od opterećenja koje se prenosi preko stajnih trapova aviona i očekivanog broja operacija, kao i od kvaliteta, odnosno nosivosti materijala u posteljici kolovozne konstrukcije.

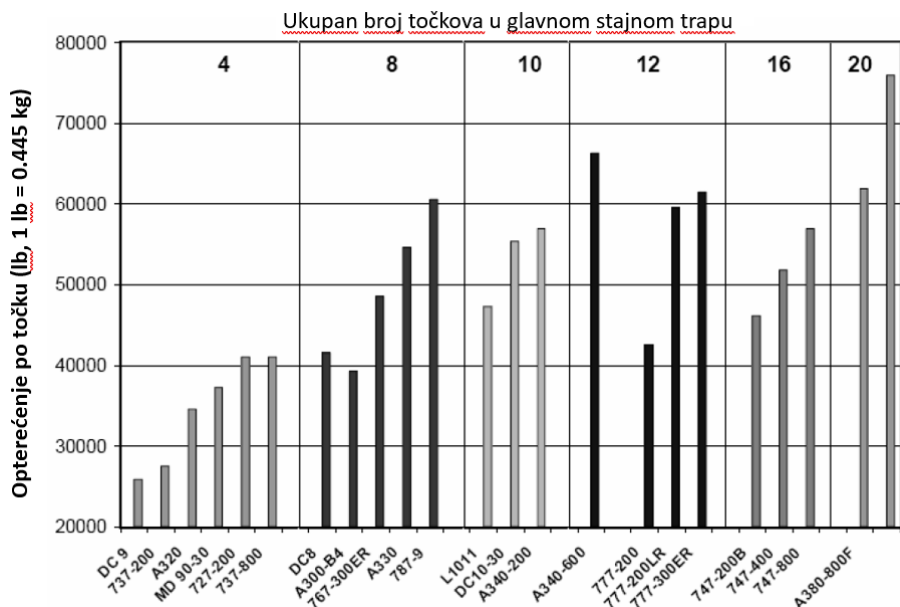
Od razvoja prvog aviona, a posebno od završetka II Svetskog rata, avioni su sve veći i sve teži, sa opterećenjima po točkovima i pritiscima u pneumaticima koji se konstantno povećavaju (slike 1 i 2).



Slika 1. Trend povećanja mase aviona [2]

Konstantan trend porasta mase aviona, opterećenja po točku i pritiska u pneumaticima postavljao je sve veće zahteve u pogledu nosivosti kolovoznih konstrukcija na aerodromima. Sa druge strane, sa aspekta upravljanja, postavljalo se pitanje da li određeni avioni mogu da koriste manevarske površine na nekom aerodromu. Savezna uprava za vazduhoplovstvo Sjedinjenih Država (Federal Aviation Administration – FAA) je stoga 1958. godine uvela ograničenje da novi avioni ne mogu opterećivati kolovoze više od aviona DC8-50, koji je imao masu od 159 t

[3] i dupli tandem stajni trap sa četiri točka. Ovo ograničenje je uticalo na proizvođače aviona da povećaju rastojanja između točkova u stajnim trapovima i uvode sve kompleksnije stajne trapove sa više točkova, kako bi kolovozne konstrukcije mogle u tim uslovima da prime opterećenje od aviona sa sve većom masom. Ovo ograničenje je važno sve do 2009. godine za aerodrome u Sjedinjenim Država.



Slika 2. Trend povećanja opterećenja po točku [2]

Da bi se olakšala komunikacija između aerodroma sa jedne strane i avio kompanija sa druge, Međunarodna organizacija civilnog vazduhoplovstva (International Civil Aviation Organization - ICAO) je 1981. godine uvela prvu standardizovanu metoda za izveštavanje o nosivosti kolovoznih konstrukcija na manevarskim površinama aerodroma, koja je poznata kao ACN-PCN (Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number) metoda [4].

U radu je prvo prikazana ova metoda, koja se do skoro koristila za izveštavanje o potrebnoj nosivosti kolovoznih konstrukcija za određene avione, odnosno o nosivosti postojećih kolovoznih konstrukcija na manevarskim površinama aerodroma, a zatim je prikazana novouvedena metoda ACR-PCR (Aircraft Classification Rating – Pavement Classification Rating) koja treba u budućnosti da se koristi za izveštavanje o nosivosti kolovoznih konstrukcija na aerodromima. Takođe je prikazan

odnos parametara nosivosti u ove dve metode, a postupci su ilustrovani na jednoj studiji slučaja i za fleksibilne i za krute kolovozne konstrukcije.

2. RAZVOJ I PARAMETRI ACN-PCN METODE

U skladu sa ovom metodom ACN-PCN moguće je iskazati relativni uticaj svakog aviona na određenu kolovoznu konstrukciju jednim brojem (ACN), koji zavisi od mase aviona i konfiguracije njegovog stajnog trapa (uključujući broj i raspored točkova i pritisak u pneumaticima), kao i od tipa kolovozne konstrukcije (fleksibilna ili kruta) i od nosivosti materijala u posteljici kolovozne konstrukcije.

Sa druge strane, nosivost kolovozne konstrukcije se izražava jedinstvenim brojem PCN, bez obzira na avione koji koriste tu kolovoznu konstrukciju i bez potrebe da se poznaje struktura slojeva u kolovoznoj konstrukciji.

Metoda podrazumeva da kolovozna konstrukcija koja ima nosivost PCN može da primi bez ograničenja u pogledu broja operacija saobraćajno opterećenje od aviona koji ima ACN broj manji ili jednak od te vrednosti PCN.

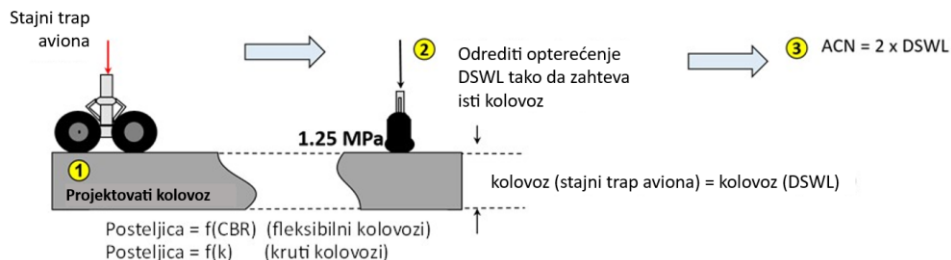
Kada je uvedena ova metoda, sve države članice ICAO su bile u obavezi da objave podatke o nosivosti kolovoznih konstrukcija na svim (javnim) aerodromima projektovanim da prime opterećenje veće od 5.7 t.

2.1 Proračun ACN

Proračun ACN-a se zasniva na izvedenom ekvivalentnom opterećenju točka (Derived Single Wheel Load - DSWL) koje dovodi do istih uticaja (ugiba na površini posteljice za fleksibilne kolovozne konstrukcije, odnosno napona na zatezanje pri savijanju na donjoj površini betonske ploče za krute kolovozne konstrukcije) kao i stajni trap određenog aviona.

ACN se određuje na standardnim, referentnim kolovoznim konstrukcijama. U slučaju fleksibilnih kolovoznih konstrukcija potrebna debljina konstrukcije za 10000 ciklusa opterećenja stajnog trapa aviona se određuje na bazi metode CBR i rešenja Boussinesq-a za ugib elastičnog poluprostora i na bazi toga se određuje DSWL za standardni pritisak u pneumatiku od 1.25 MPa (slika 3). Treba imati u vidu da jedan ciklus opterećenja podrazumeva puno opterećenje u konkretnom poprečnom preseku, koje je tipično rezultat više prelaza opterećenja, što se iskazuje odnosom Pass/Coverage (P/C) za svaki avion.

U slučaju krutih kolovoznih konstrukcija, debljina referentne konstrukcije se određuje metodom Westergaard-a za elastičnu ploču na Winkler-ovoj podlozi, za slučaj položaja opterećenja u unutrašnjosti ploče, podrazumevajući napon na zatezanje pri savijanju od 2.75 MPa [4].



Slika 3. Postupak proračuna broja ACN [5]

ACN se definiše kao dvostruka vrednost opterećenja po točku DSWL (u tonama) [4]. ACN se sračunava za četiri standardne nosivosti posteljice, za fleksibilne i krute kolovozne konstrukcije (tabela 1), što daje osam različitih vrednosti. ACN zavisi od broja i rasporeda točkova u stajnom trapu aviona, opterećenja koje se prenosi preko stajnog trapa i pritiska u pneumaticima.

Proizvođači aviona su publikovali podatke o vrednostima ACN, tipično za dve vrednosti mase aviona: maksimalnu masu pri rulanju i masu praznog aviona. Za vrednosti opterećenja između ova dva slučaja ACN se dobija linearnom interpolacijom. Vrednosti ACN se kreću od u rasponu od 2 do 5 u slučaju lakših aviona sa težinama bliskim definisanih 5.7 tona, pa do preko 120 u slučaju najzahtevnijih vazduhoplova i lošijeg kvaliteta materijala u posteljici.

Tabela 1. Kategorije posteljice za proračun ACN i PCN [4]

Kategorija posteljice	Nosivost	Kolovozna konstrukcija			
		Fleksibilna		Kruta	
		CBR (%)		K^1 (MN/m ³)	
		Tipična vrednost	Raspon	Tipična vrednost	Raspon
A	Dobra	15	>13	150	>120
B	Srednja	10	8-13	80	60-120
C	Slaba	6	4-8	40	25-60
D	Vrlo slaba	3	<4	20	<25

Napomena: ¹Opit pločom prečnika 76.2 cm

2.2 Određivanje PCN

Preko broja PCN se izražava nosivost postojeće kolovozne konstrukcije. Za razliku od ACN-a, ICAO nije bliže definisao postupak proračuna PCN, osim da se PCN može usvojiti na bazi tehničkog proračuna ili na osnovu aviona koji koriste postojeće manevarske površine. Rezultat toga je da je razvijeno više različitih postupaka za proračun PCN-a.

Standardizovani format PCN broja sadržao je oznake za:

- PCN broj
- tip kolovozne konstrukcije (“F” za fleksibilne i “R” za krute kolovoze)
- kategoriju posteljice (tabela 1)
- kategoriju koja se odnosi na maksimalni dozvoljeni pritisak u pneumatiku (tabela 2)
- metodu na osnovu koje je određen PCN (“T” za proračun ili “U” kada je PCN određen na bazi aviona sa najvećim ACN koji koristi određene manevarske površine).

U pogledu pritiska u pneumatiku, u originalnoj verziji metodologije bile su usvojene nešto niže vrednosti koje su bile čisto empirijske. Kasnija istraživanja, koja je sprovedla FAA, su pokazala da i veće vrednosti pritiska ne dovode do značajnih oštećenja kolovoza izuzev kolovoza sa tankim asfaltnim slojevima, i da je uticaj veličine pritiska u pneumatiku sekundaran u odnosu na opterećenje po točku i rastojanje točkova. Pritisak u pneumaticima se tipično ne uzima u obzir kod deklarisanja PCN na krutim kolovoznim konstrukcijama, osim ako postoje oštećenja spojnica (joint spalling) ili druga oštećenja površine kolovoza. Za fleksibilne kolovoze je prihvatljivo da se definiše ograničenje samo u slučajevima kada visoki pritisci u pneumaticima dovode do nastanka oštećenja [6].

Na zahtev najvećih proizvođača aviona (Boeing i Airbus) koji su sprovedli dodatna eksperimentalna istraživanja [7], originalne kategorije ograničenja pritiska u gumama su modifikovane (tabela 2). Ova promena je npr. omogućila povećanje pritiska u gumama aviona sa 1,50 MPa na 1,75 MPa za aerodrome sa ograničenjem pritiska u gumama kategorije X. Ove kategorije su kasnije zadržane bez promene i u metodi ACR-PCR.

FAA je razvio 2014. godine program COMFAA 3.0, koji se koristio za proračun po metodi ACN-PCN. Program sadrži biblioteku aviona koja uključuje najveći broj komercijalnih i vojnih aviona koji su trenutno u upotrebi, ali i omogućava da se dodaju nove konfiguracije aviona. Ovaj program omogućava korišćenje koncepta kumulativnog faktora oštećenja

(Cumulative Damage Factor – CDF), izvedenog na osnovu Miner-ovog pravila [9].

Tabela 2. Kategorije ograničenja pritiska u gumama prema ACN-PCN metodologiji [8]

<i>Kategorija ograničenja pritiska u pneumatiku</i>	<i>Maksimalni pritisak u pneumatiku (MPa)</i>	
	<i>Originalno</i>	<i>Modifikovano (od 2013. godine)</i>
W	Neograničeno	Neograničeno
X	1.50	1.75
Y	1.10	1.25
Z	0.50	0.50

Preko CDF se definiše iskorišćeni deo veka trajanja kolovoza. On se izražava kao odnos proteklog broja ciklusa opterećenja i broja ciklusa koji dovodi do loma. CDF je jedan avion je dat sledećim izrazom:

$$CDF = \frac{\text{protekli broj ciklusa opterećenja}}{\text{broj ciklusa koji dovodi do loma}}$$

Kada je $CDF = 1$, to znači da je istekao životni vek kolovoza. $CDF < 1$ znači da kolovoz ima određeni preostali vek, dok $CDF > 1$ znači da je došlo do loma kolovoza.

Za više aviona u floti, kumulativni faktor oštećenja se definiše kao:

$$CDF = CDF_1 + CDF_2 + \dots + CDF_N$$

gde su sa $CDF_1, CDF_2, \dots, CDF_N$ označena oštećenja koja prave različiti avioni u floti, a N je broj različitih aviona.

Vrednosti PCN-a se kreću od 1 (vrlo slaba kolovozna konstrukcija) do preko 120 (kolovozna konstrukcija koja ima veliku nosivost). Operatori aerodroma objavljuju podatke o PCN manevarskih površina, uključujući poletno-sletne staze, rulne staze i platforme u odgovarajućim publikacijama (Aeronautical Information Publication - AIP).

2.3 Nedostaci metode ACN-PCN

Originalna ACN-PCN metoda se zasnivala na metodama za projektovanje kolovoznih konstrukcija koje su razvijene u prvoj polovini XX veka, metodi CBR za fleksibilne kolovozne konstrukcije i metodi Westergaarde-a za krute kolovoze. Savremene metode za projektovanje fleksibilnih i krutih kolovoznih konstrukcija se zasnivaju na teoriji

višeslojnih elastičnih sistema ili metodi konačnih elemenata, i pri tome uzimaju u obzir varijabilnost položaja tragova točkova u poprečnom profilu, Minerovo pravilo za analizu uticaja ponovljenih opterećenja i određivanje kumulativnog faktora oštećenja CDF, što je dovelo u nesklad metode za projektovanje kolovoza sa postupcima koji su se koristili za proračun njihove nosivosti.

Takođe, ovi savremeni postupci uzimaju u obzir fundamentalne karakteristike materijala, poput modula i Poisson-ovog koeficijenta, za razliku od indeksa, poput CBR-a, koji se koristi u metodi ACN-PCN.

Pored toga, konfiguracije stajnih trapova aviona preko kojih se prenosi opterećenje na kolovoznu konstrukciju su značajno kompleksije i uključuju veći broj pneumatika, što je posledica povećanja mase aviona i što je dovelo do povećanja opterećenja po točku i pritiska u pneumaticima. Da bi se omogućio proračun ACN za fleksibilne kolovozne konstrukcije i za nove konfiguracije stajnih trapova, kao što su dupli tandem sa 4 točka i tridem sa 6 točkova, uveden je Alfa faktor, kojim se modifikovao debljinu kolovoza, pa samim tim i DSWL. Na osnovu sprovedenih eksperimentalnih istraživanja, ICAO je redukovao 2007. godine alfa faktor za stajni trap sa 4 točka sa 0.825 na 0.8, dok je zadržao vrednost od 0.72 za stajni trap sa 6 točkova, što je rezultovalo nešto nižim, manje konzervativnim vrednostima ACN [10].

3. RAZVOJ I PRIKAZ METODE ACR-PCR

Kao rezultat neusaglašenosti metoda za projektovanje kolovoznih konstrukcija na aerodromima i metoda za procenu njihove nosivosti dešava se da, formalno, kolovozna konstrukcija koja je projektovana za određeno saobraćajno opterećenje, „ne zadovoljava“ u pogledu nosivosti za to isto saobraćajno opterećenje.

Stoga je ICAO 2009. godine formirao studijsku grupu sa ciljem da istraži mogućnost unapređenja postupka za izveštavanje o nosivosti kolovoznih konstrukcija na aerodromskim manevarskim površinama. Ova studijska grupa je razvila novu metodu za analizu nosivosti kolovoznih konstrukcija i izveštavanje ACR-PCR. Ovu metodu je ICAO usvojio 2020. god., a od novembra 2024. godine zemlje članice treba da izveštavaju o nosivosti kolovoznih konstrukcija na aerodromima u skladu sa njom. U narednom poglavlju su prikazane osnove ove metode, kao i osnovne razlike u odnosu na metodu ACN-PCN.

Metoda ACR-PCR je formirana na sličan način kao i metoda ACN-PCN. Preko ACR-a se izražava relativan uticaj određenog aviona na kolovoznu

konstrukciju pri određenoj nosivosti posteljice, dok PCR označava nosivost kolovozne konstrukcije. Međutim, nova metoda prevazilazi ograničenja postojećeg postupka, zasniva se na savremenim postupcima za dimenzionisanje kolovoznih konstrukcija na aerodromima, pa stoga eliminiše potrebu za korišćenjem faktora ekvivalencije i alfa-faktora i omogućava racionalnije vrednovanje postojećih fleksibilnih kolovoznih konstrukcija u odnosu na prethodnu metodu koja se bazirala na vrlo konzervativnom postupku CBR za dimenzionisanje kolovoza. Pored toga, definisan je opšti postupak za proračun parametra PCR i jedinstvena klasifikacija materijala u posteljici fleksibilnih i krutih kolovoznih konstrukcija, koja je prikazana u tabeli 3.

Tabela 3. Kategorije posteljice za proračun ACR i PCR [11]

Kategorija posteljice	Nosivost	Kolovozna konstrukcija	
		Fleksibilna i kruta	
		E (MPa)	
		Tipična vrednost	Raspon
A	Dobra	200	>150
B	Srednja	120	100-150
C	Slaba	80	60-100
D	Vrlo slaba	50	<60

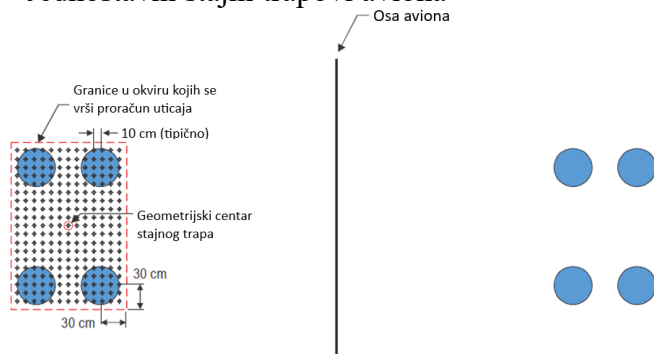
3.1 Određivanje ACR

Za određivanje ACR za fleksibilne i krute kolovozne konstrukcije koristi se metoda višeslojnih elastičnih sistema (Layered Elastic Analysis – LEA) koja podrazumeva da su slojevi homogeni, elastični i izotropni, i njihove karakteristike se opisuju modulima elastičnosti E_i , Poasonovim koeficijentima ν_i i konstantnim debljinama sloja t_i . Smatra se da su slojevi beskonačni u horizontalnom pravcu, a posteljica se predstavlja kao elastični poluprostor, beskonačan i u vertikalnom pravcu. Zbog linearno-elastične prirode modela, moguće je superponirati napone i deformacije od pojedinih tačkova stajnog trapa aviona.

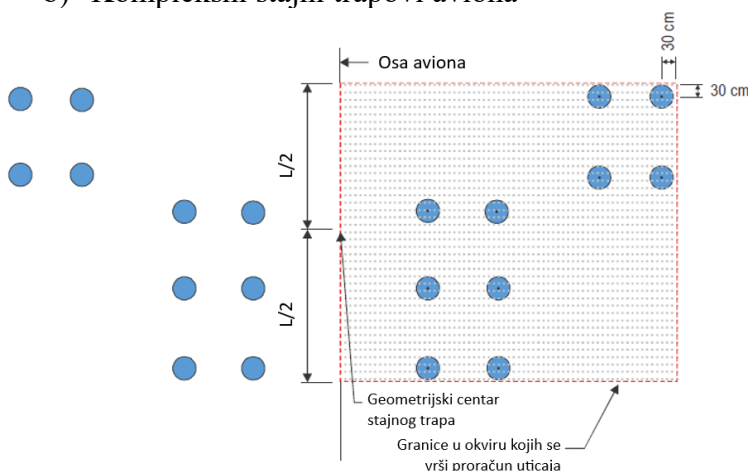
Za određivanje ACR se koristi maksimalna masa aviona (pri rulanju) uzimajući u obzir odgovarajući položaj težišta, sa pritiskom u pneumaticima u skladu sa preporukama proizvođača.

Za fleksibilne kolovozne konstrukcije proračun uticaja se vrši na mreži tačaka, koja zavisi od kompleksnosti stajnog trapa aviona (slika 4)

a) Jednostavni stajni trapovi aviona

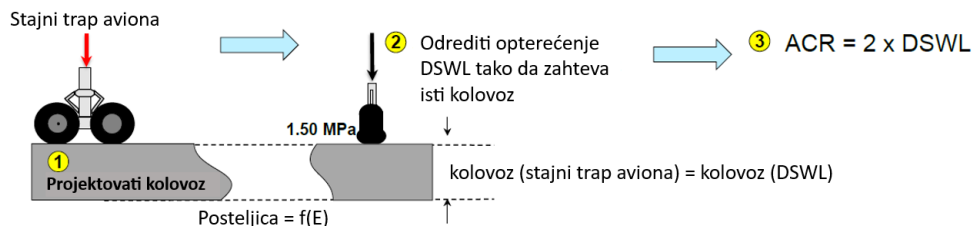


b) Kompleksni stajni trapovi aviona



Slika 4. Raspored tačaka u kojima se vrši proračun dilatacija za fleksibilne kolovozne konstrukcije [11]

Pri tome se za određivanje ACR za fleksibilne kolovoze koriste standardne kolovozne konstrukcije u zavisnosti od konfiguracije stajnog trapa aviona. Za avione sa jednim ili dva točka u glavnom stajnom trapu koriste se konstrukcije sa 76 mm (3 in) asfaltnih slojeva i podlogom od nevezanog drobljenog agregata promenljive debljine, dok je za avione sa više od dva točka u glavnom stajnom trapu debljina asfaltnih slojeva 127 mm (5 in). U proračunu se podrazumeva da nema proklizavanja između slojeva. Debljina podloge se varira dok CDF na površini posteljice ne bude jednak 1.0 za 36500 opterećenja aviona. Rezultujuća debljina je referentna debljina podloge kolovozne konstrukcije. Za tako definisanu kolovoznu konstrukciju se određuje DSWL podrazumevajući pritisak u pneumatiku od 1.50 MPa, tako da CDF posteljice bude jednak 1.0. ACR se onda definiše kao dvostruka vrednost DSWL. Postupak je šematski prikazan na slici 5.



Slika 5. Postupak proračuna broja ACR [6]

Za proračun ACR na krutim kolovoznim konstrukcijama debljina betonske ploče može da bude najmanje 127 mm (5 in), a ispod betonske ploče se nalazi podloga od drobljenog kamenog agregata fiksne debljine od 200 mm i modula od 500 MPa. Između ploče i podloge oodrazumeva se potpuno proklizavanje, dok se između podloge i posteljice podrazumeva da nema proklizavanja. Proračun napona zatezanja se vrši na dnu betonske ploče, ispod centra svakog točka u stajnom trapu aviona. Debljina betonske ploče se varira dok se ne postigne maksimalni napon od 2.75 MPa u bilo kojoj tački. Dobijena debljina betonske ploče predstavlja referentnu debljinu za određivanje ACR. Za tako definisanu krutu kolovoznu konstrukciju se određuje DSWL podrazumevajući pritisak u pneumatiku od 1.50 MPa, tako da napon zatezanja na donjoj površini betonske ploče jednak 2.75 MPa. ACR se onda definiše kao dvostruka vrednost DSWL.

Za proračun ACR ICAO je razvio odgovarajući program ICAO-ACR [11]. ACR se izražava u stotinama kg (u poređenju sa vrednostima ACN koje su se izražavale u hiljadama kg) što je učinjeno sa namerom da se izbegne konfuzija između vrednosti sračunatih po novom i po starom postupku. Posledica je da su vrednosti ACR-a približno 10 puta veće od ACN-a, pri čemu se taj odnos kreće od 7.7 do 12.0, sa srednjom vrednošću 9.75 i veći je za krute kolovoze [8].

3.2 Određivanje PCR

Slično kao i za PCN, standardizovani format za iskazivanje nosivosti postojeće kolovozne konstrukcije brojem PCR sadrži oznake za:

- PCR broj (u stotinama kg)
- tip kolovozne konstrukcije ("F" za fleksibilne i "R" za krute kolovoze)
- kategoriju posteljice (tabela 3)
- kategoriju koja se odnosi na maksimalni dozvoljeni pritisak u pneumatiku (tabela 2)

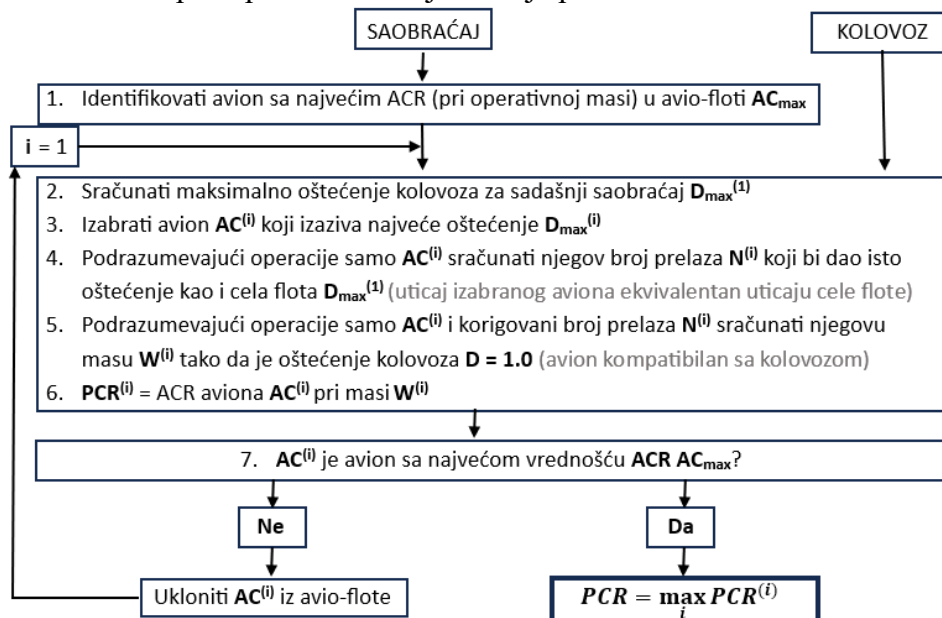
- metodu na osnovu koje je određen PCR (“T” za proračun ili “U” kada je PCR određen na bazi aviona sa najvećim ACR koji koristi određene manevarske površine).

Za određivanje PCR su potrebni podaci:

- struktura i frekvencija avio saobraćaja
- debljina, tip materijala i karakteristike svakog sloja u kolovoznoj konstrukciji
- povratni modul posteljice kolovozne konstrukcije.

Za razliku od određivanja PCN, ICAO je definisao generički postupak za proračun PCR koji se zasniva na primeni Minerovog pravila i analizi kumulativnog faktora oštećenja CDF. PCR se odnosi na strukturni vek kolovoza, i iako je za određivanje ACR ICAO definisao određeni model za proračun razvoja oštećenja (damage model), za određivanje PCR ostavljena je mogućnost državama da primene odgovarajuće modele u skladu sa svojom praksom. Za fleksibilne kolovoze ovi modeli se odnose na vek trajanje posteljice u zavisnosti od vertikalne dilatacije pritiska na njenoj površini, dok se za krute odnose na zavisnost veka trajanja betonske ploče od napona na zatezanje pri savijanju na donjoj površini betonske ploče.

Generički postupak određivanja PCR je prikazan na slici 6.



Slika 6. Postupak određivanja PCR [6]

Izbor odgovarajuće modela razvoja oštećenja je od ključnog značaja za određivanje vrednosti PCR, kao i za konzistentnost između postupaka za projektovanje kolovoznih konstrukcija i postupaka za određivanje PCR.

4. STUDIJA SLUČAJA: UPOREDNI PRIKAZ INDEKSA PCR/ACR I PCN/ACN NA KOLOVOZNIM KONSTRUKCIJAMA RAZLIČITOG KVALITETA MATERIJALA U POSTELJICI

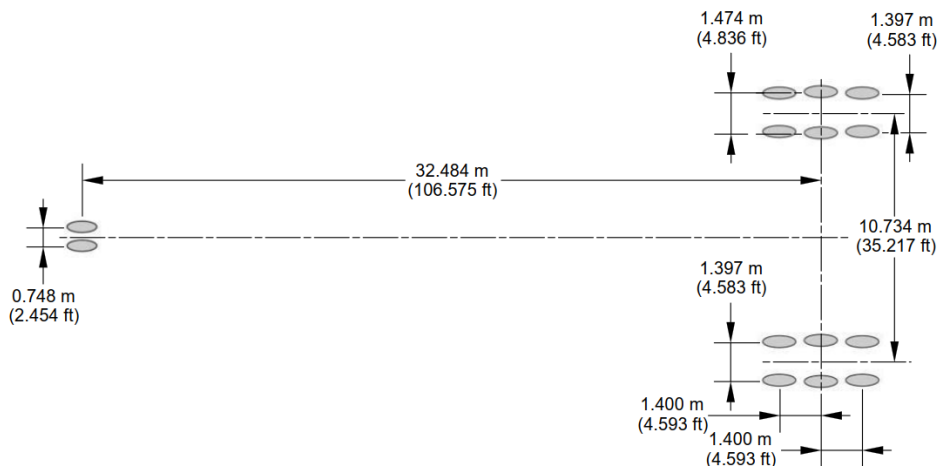
U ovoj studiji slučaja dat je uporedni prikaz proračuna indeksa PCR i PCN za fleksibilne i krute kolovozne konstrukcije za različite kategorije materijala u posteljici, prema uputstvima FAA [9, 13].

Flota za proračun usvojena je tako da uključuje reprezentativne tipove aviona kodnog slova C prema ICAO i klasifikaciji Agencije Evropske unije za bezbednost avio saobraćaja (European Union Aviation Safety Agency - EASA) [14,15], kao što su Airbus A320 i nešto teži Airbus A321. Pored toga, usvojeni su i širokotrupni avioni kodnog slova E, i to Boeing 787, kao i generalno najzahtevniji avioni za kolovozne konstrukcije, kao što su Airbus A350 – 900 i Boeing 777 – 300 ER. Boeing 777 i Airbus A350 (slika 7), ukoliko se nalaze u floti, su uvek avioni od posebnog interesa za projektovanje kolovoznih konstrukcija na aerodromima, pre svega njihove varijante koje imaju glavni stajni trap sa 6 točkova (prema FAA klasifikaciji [16] ovi stajni trapovi imaju oznaku 3D – 3 Duals in tandem), kakav je u konkretnom slučaju samo Boeing 777-300 ER.

Za studiju slučaja usvojen je sledeći saobraćaj koji je prikazan u tabeli 4.

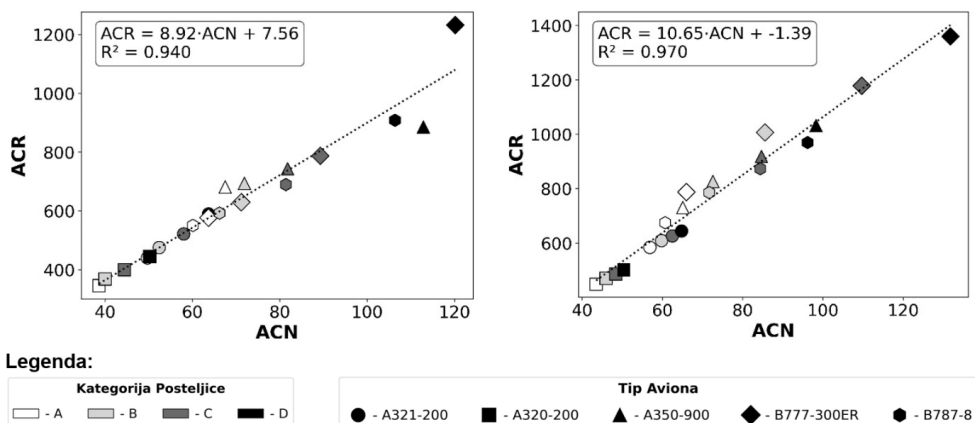
Tabela 4. Saobraćajno opterećenje korišćeno u analizi

<i>Tip vazduhoplova</i>	<i>Godišnji broj poletanja</i>
Airbus A320 - 200	25 000
Airbus A321 - 200	10 000
Airbus A350 - 900	2 500
Boeing 777 - 300 ER	2 500
Boeing 787 - 8	5 000



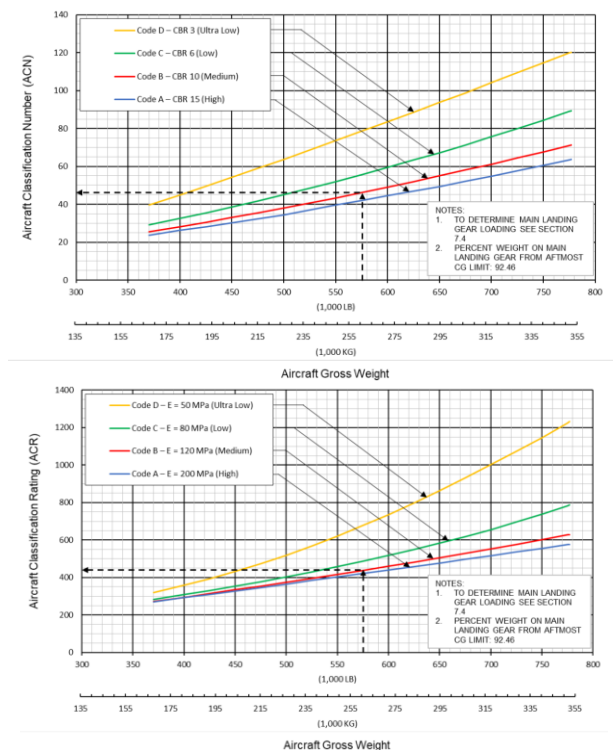
Slika 7. Šema stajnog trapa aviona Airbus A350-1000 [17]

Kao što su Armeni i Loizos već ranije potvrdili [18], a može da se vidi i kada se analiziraju tipovi aviona korišćeni u ovoj studiji, postoji značajan stepen korelacije između indeksa ACR i ACN (slika 8).



Slika 8. Uporedni prikaz vrednosti indeksa ACN i ACR aviona korišćenih u analizi, u slučaju fleksibilnih kolovoznih konstrukcija (levo) i krutih kolovoznih konstrukcija (desno)

Slično, ako bi se pogledali dijagrami koje daje Boeing u smernicama za projektovanje aerodroma [19], može se videti da, iako je reč o različitim algoritmima za proračun, sama ideja indeksa ACR, ostaje gotovo ista kao i u slučaju indeksa ACN (slika 9).



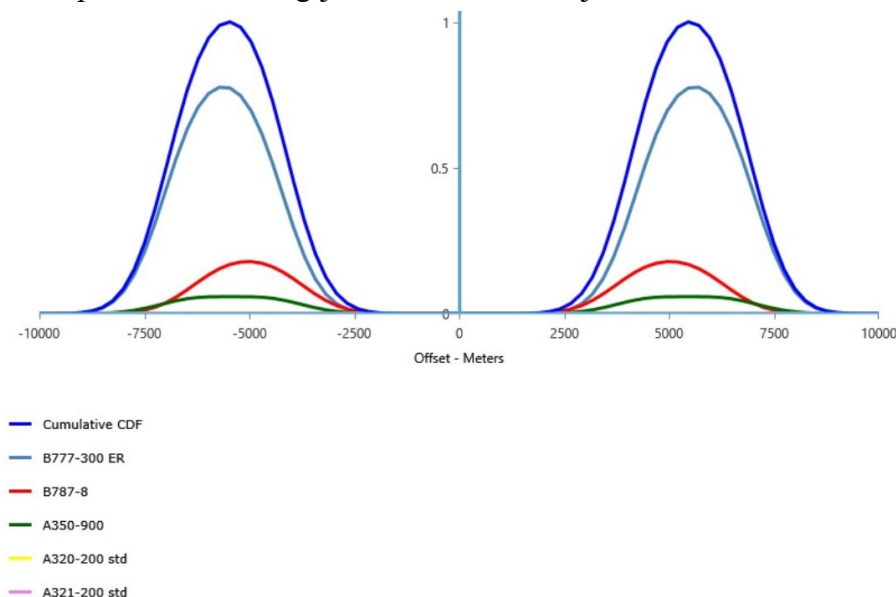
Slika 9. Primeri dijagrama za određivanje indeksa ACN i ACR koje daje Boeing, za avion Boeing 777-300ER, za fleksibilnu kolovoznu konstrukciju [19]

Fleksibilna kolovozna konstrukcija za dato saobraćajno opterećenje i reprezentativne module posteljice dobijena je proračunom u softveru FAARFIELD prema uputstvu FAA [12]. Dimenzionisanje fleksibilne kolovozne konstrukcije vršeno je na sloju nevezane podloge, dok je debljina bitumenom vezanih slojeva ostala konstantna, u skladu sa minimalnim debljinama za avione sa masom većom od 45 tona, definisanim navedenim uputstvom. Struktura kolovoznih konstrukcija, dobijena proračunom, za projektni period od 20 godina data je u tabeli 5.

Tabela 5. Struktura kolovoznih konstrukcija dobijena analizom u programu FAARFIELD

Kategorija materijala u posteljici	A	B	C	D
Asfaltni slojevi [cm]	22.9	22.9	22.9	22.9
Nevezana podloga [cm]	26.8	42.0	58.7	90.8
Povratni modul posteljice [MPa]	200	120	80	50

Sama metodologija za dimenzionisanje kolovoznih konstrukcija prema metodi FAA je mehanističko-empirijska i koristi linearno-elastičnu teoriju i delimično metod konačnih elemenata (u slučaju krutih kolovoznih konstrukcija) za proračun napona i deformacija. Bazirana je na proračunu kumulativnog indeksa oštećenosti (CDF – Cumulative Damage Factor) na površini posteljice, uzimajući u obzir karakteristike stajnog trapa svakog od vazduhoplova, na bazi čega se za svaki od tipova aviona izračunava broj prelazaka aviona potrebnih da bi se određena tačka na kolovozu jednom opteretila, tzv. Pass to Coverage Ratio (P/C). Do odnosa P/C se dolazi na bazi pretpostavke da se avion po poletno-sletnoj stazi ili rulnoj stazi ne kreće idealno pravom linijom, nego “luta” (eng. wander). Ta varijabilnost putanja u poprečnom profilu se modelira standardnom normalnom raspodelom. Za razliku od FAA, francusko uputstvo za dimenzionisanje kolovoznih konstrukcija na aerodromima [20], pravi razliku između površina i predviđa usvajanje različitih vrednosti standardne devijacije u zavisnosti od očekivanih brzina na predmetnim površinama. Kumulativni indeks oštećenosti se zasniva na Minerovom pravilu i izračunava se kao odnos broja prelazaka svakog od tipova aviona i odgovarajućeg dozvoljenog broja prelazaka. Na bazi pojedinačnih, izračunava se jedinstveni kumulativni indeks oštećenosti za celu flotu. Kao što je već rečeno, prema metodologiji FAA merodavna je vrednost kumulativnog



Slika 10. Dijagram kumulativnog indeksa oštećenosti, kao rezultat analize u programu FAARFIELD

indeksa oštećenosti na površini posteljice i proračun se automatski iterativno ponavlja sve dok za određenu debljinu sloja, na kome se vrši dimenzionisanje, CDF na površini posteljice ne bude 1. U samom programu postoji mogućnost izračunavanja i kumulativnog indeksa oštećenosti za asfaltna slojeve, ali te vrednosti su, u najvećem broju slučajeva, značajno manje od vrednosti indeksa na površini posteljice.

Kada se pogledaju rezultati proračuna debljine kolovoznih konstrukcija i vrednosti indeksa CDF za pojedine tipove aviona i njihovo učešće u ukupnoj vrednosti CDF, prikazani u tabeli 6, uočava se da je u slučaju kolovozne konstrukcije sa boljim kvalitetom materijala u posteljici (manjom debljinom sloja nevezane podloge), avion sa najvećim uticajem na kolovoznu konstrukciju A350-900, koji ima veći pritisak u točkovima i veće opterećenje po točku, ali manju ukupnu masu i drugačiji stajni trap u odnosu na avion B777-300ER. U slučaju kolovoznih konstrukcija sa manjom vrednošću povratnog modula posteljice (većom debljinom sloja nevezane podloge), kritičan avion za dimenzionisanje postaje Boeing 777-300ER. Ako se pogledaju vrednosti kumulativnog indeksa oštećenosti bitumenom vezanih slojeva koje daje FAARFIELD, uočava se da je avion sa najvećim doprinosom ukupnom CDF A320-200, najlakši avion u floti, ali sa najvećim brojem poletanja.

Tabela 6. Rezultati analize u programu FAARFIELD, prikaz dobijenih vrednosti kumulativnog indeksa oštećenosti (CDF)

Kategorija materijala u posteljici	CDF na površini posteljice	Avioni sa najvećim doprinosom ukupnom CDF posteljice		CDF u donjem bitumenom vezanom sloju	Avioni sa najvećim doprinosom ukupnom CDF donjeg bitumenom vezanog sloja	
A	1	A350-900	0.92	0.87	A320-200	0.24
		B777-300ER / B787-8	0.04		B787-8	0.21
B	1	A350-900	0.61	0.98	A320-200	0.27
		B777-300ER	0.22		B787-8	0.24
C	1	B777-300ER	0.77	0.30	A320-200	0.09
		B787-8	0.17		B787-8	0.07
D	1	B777-300ER	1	0.04	Četiri tipa aviona po 0.01	

U istom programskom paketu za razmatrane kolovozne konstrukcije moguć je proračun indeksa PCR. Prvi korak u proračunu je analiza flote i pronalaženje aviona sa najvećim pojedinačnim doprinosom kumulativnom indeksu oštećenosti, na čiji broj operacija se preračunava ostatak flote tako

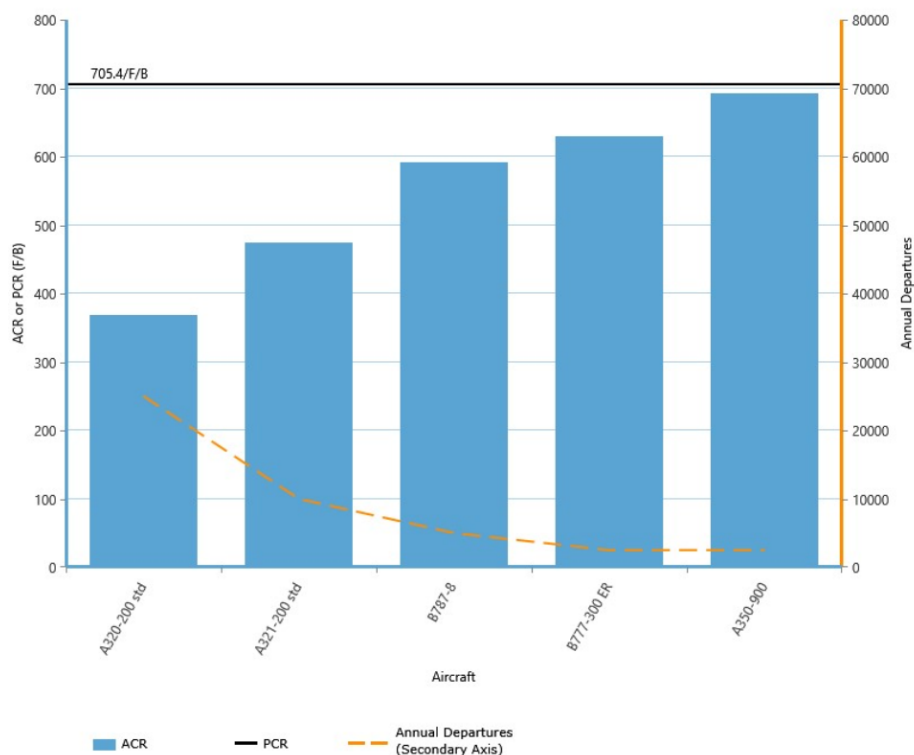
što se broj operacija kritičnog aviona povećava do izjednačavanja pojedinačnog sa ukupnim kumulativnim indeksom oštećenosti. Za tako izračunat broj operacija kritičnog aviona se dalje traži maksimalna dozvoljena masa kritičnog aviona, takva da vrednost kumulativnog indeksa oštećenosti bude jednaka 1. Za dobijenu težinu se dalje računa indeks ACR koji postaje PCR za kritični avion. U poslednjem koraku se samo proverava da li je kritični avion ujedno i onaj sa najvećom vrednosti indeksa ACR, a ako to nije slučaj proračun se ponavlja sa tim što se korišćeni kritični avion isključuje sa liste vazduhoplova. Na ovaj način se izbegava da avion sa relativno niskom vrednosti indeksa ACR, a velikim brojem operacija, dovede do objavljivanja konzervativne vrednosti indeksa PCR. Na kraju najviša vrednost indeksa PCR se objavljuje kao PCR manevarske površine [13].

Suštinska razlika između do sada korišćene ACN/PCN metodologije i nove ACR/PCR metodologije, kada je proračun indeksa PCN i PCR u pitanju, leži u tome da je nova metodologija sada usaglašena sa metodologijom za dimenzionisanje kolovoznih konstrukcija. Navedeno se može videti i po rezultatima prikazanim u tabeli 7. Kada se pogledaju vrednosti, vidi se da su kritični avioni isti kao i u slučaju dimenzionisanja kolovozne konstrukcije. Takođe kada se pogleda odnos indeksa PCR i ACR, primećuje se da su jako bliski, što svakako ukazuje da je kolovozna konstrukcija dimenzionisana za datu flotu.

Prethodni indeks PCN, izračunava se na bazi empirijske CBR metode u slučaju fleksibilnih kolovoznih konstrukcija i metode Vestergarda (poznata i kao "k" metoda) u slučaju krutih kolovoznih konstrukcija [9]. Kada se pogledaju rezultati dobijeni u programskom paketu COMFAA, koji se prema prethodnoj verziji uputstva koristi za proračun indeksa PCN, jasno se uočava da metodologija za proračun indeksa PCR konzervativnija. Do sličnih zaključaka su došli i Armeni i Loizos [18] u analizi koja je uključivala i veći broj vazduhoplova. U konkretnom slučaju, međutim, treba naglasiti i neadekvatno uzimanje u obzir uticaja aviona 777-300ER. Naime, u samim Uputstvima proizvođača Boeing [19] vezanim za ovaj tip aviona stoji napomena za fleksibilne i krute kolovozne konstrukcije, da se dati dijagrami za dimenzionisanje bazirani na CBR/k metodi ne mogu pouzdano koristiti za određivanje potrebnih debljina slojeva u slučaju aviona sa šest točkova u glavnom stajnom trapu.

Tabela 7. Uporedni prikaz dobijenih vrednosti indeksa PCR i PCN u slučaju fleksibilne kolovozne konstrukcije

Modul posteljice [MPa]	Kritični avion	PCR			Kritični avion	PCN		
		ACR	PCR	PCR/ACR		ACN	PCN	PCN/ACN
200	A350-900	681	685.1	1.01	A321-200	49.7	105.8	2.13
120	A350-900	693.3	705.4	1.02	A350-900	71.9	105.4	1.47
80	B777-300ER	787	831.7	1.06	B787-8	81.4	108.3	1.33
50	B777-300ER	1232	1301.9	1.06	A350-900	81.8	104.9	1.28



Slika 11. Prikaz rezultata indeksa PCR u programu FAARFIELD (primer fleksibilne kolovozne konstrukcije sa materijalom u posteljici kategorije B)

Treba napomenuti razliku koja nastaje usled različitih reprezentativnih vrednosti kvaliteta materijala u posteljici. PCR metodologija za klasifikovanje materijala u posteljici koristi povratni modul posteljice i u

slučaju fleksibilnih i u slučaju krutih kolovoznih konstrukcija. Do sada korišćena PCN metodologija koristi CBR materijala za klasifikaciju u slučaju fleksibilnih kolovoznih konstrukcija. FAA u programskom paketu FAARFIELD koristi empirijsku vezu između modula elastičnosti i indeksa CBR:

$$E \text{ [MPa]} = 10 \times \text{CBR [\%]}$$

Tabela 8. Poređenje graničnih vrednosti za klasifikovanje materijala u posteljici u slučaju fleksibilnih kolovoznih konstrukcija

Kategorija posteljice	PCR		PCN	
	Reprezentativni modul posteljice [MPa]	Granične vrednosti [MPa]	Reprezentativni CBR [%]	Granične vrednosti [%]
A	200	$E \geq 150$	15	$\text{CBR} \geq 13$
B	120	$100 \leq E < 150$	10	$8 < \text{CBR} < 13$
C	80	$60 \leq E < 100$	6	$4 < \text{CBR} \leq 8$
D	50	$E < 60$	3	$\text{CBR} \leq 4$

Na osnovu tabele 8 se može videti razlika između dve metodologije i zaključiti da kolovozna konstrukcija data u ovom primeru u slučaju kategorije posteljice D, pri proračunu indeksa PCN neće imati oznaku D, već C.

Kada je u pitanju kruta kolovozna konstrukcija, pre prikazivanja rezultata poređenja potrebno je naglasiti jednu suštinsku razliku u izveštavanju indeksa PCN i PCR kod krutih kolovoznih konstrukcija, a koji se tiče ponovo tiče kategorije materijala u posteljici. Naime u slučaju indeksa PCN, kategorija posteljice se usvaja na osnovu modula reakcije podloge - k na površini sloja podloge ispod betonske ploče, dok se u slučaju indeksa PCR uzima u obzir povratni modul same posteljice. Tako na primer, ako bi se posmatrala jedna tipična kolovozna konstrukcija koja bi uzela u obzir zaštitu kolovozne konstrukcije od dejstva mraza, kao i savremene preporuke za izgradnju aerodroma [12], koji podrazumevaju izradu sloja stabilizacije ispod betonske ploče (koriste se cementna stabilizacija, bitumenom vezani materijali, kao i mršav beton), prema PCN metodologiji kategorija posteljice bi najčešće bila A, eventualno B bez obzira na kvalitet materijala u samoj posteljici.

Slično kao i u prethodnom slučaju, u programskom paketu FAARFIELD je za datu flotu dimenzionisana kruta kolovozna konstrukcija. Za razliku od fleksibilnih kolovoza, kod krutih se dimenzionisanje vrši tipično na sloju betonske ploče, po sličnom principu kao i u slučaju fleksibilne kolovozne

konstrukcije. Za krute kolovozne konstrukcije na aerodromima, prema uputstvu FAA se tipično koristi nearmirani beton, čvrstoće na zatezanje 4.48 MPa (650 psi), što približno odgovara klasi betona C 35/45. U tabeli 9 prikazani su sumirani rezultati dimenzionisanja kolovozne konstrukcije. Kao što se može videti, u konkretnom slučaju avion B777-300 ER je, nevezano od kvaliteta materijala u posteljici, kritični avion za pri dimenzionisanju.

Za debljine slojeva, slično kao i u slučaju fleksibilnih kolovoznih konstrukcija, izračunate su vrednosti indeksa PCR i PCN. Što se tiče rezultata PCR, oni su kao i u prethodnom slučaju usaglašeni sa metodologijom za dimenzionisanje. Kada se pogledaju rezultati indeksa PCN, primećuje da za datu flotu kolovozna konstrukcija nema dovoljnu nosivost u slučajevima kada se u posteljici nalazi materijal većeg modula elastičnosti. Međutim, kao što je već rečeno, u slučaju PCN metodologije, kao ulazni podatak za proračun koristi se modul reakcije podloge – k [MN/m^3] direktno ispod betonske ploče [9]. Ukoliko ne postoji način da se ovaj parametar tla izmeri, FAA daje i Excel fajl gde se modul k može proceniti na bazi vrednosti modula k na površini posteljice i debljine slojeva nevezane podloge i stabilizacije. Ako se koristi pomenuti alat, dobijena vrednost “unapređenog” modula k ne može biti veća od $135 \text{ MN}/\text{m}^3$. U konkretnom primeru, kako je u pitanju masivna konstrukcija ispod betonske

Tabela 9. Rezultati dimenzionisanja krute kolovozne konstrukcije u programu FAARFIELD

Kategorija materijala u posteljici	Avion sa najvećim doprinosom ukupnom kumulativnom indeksu oštećenosti posteljice		Slojevi kolovozne konstrukcije	Debljine slojeva kolovozne konstrukcije [cm]
A (200 MPa)	B777-300ER	0.74	Betonska ploča	39.4
			Mršavi beton	35.0
			Nevezana podloga	55.0
B (120 MPa)	B777-300ER	0.87	Betonska ploča	41.0
			Mršavi beton	35.0
			Nevezana podloga	55.0
C (80 MPa)	B777-300ER	0.93	Betonska ploča	44.0
			Mršavi beton	35.0
			Nevezana podloga	55.0
D (50 MPa)	B777-300ER	0.85	Betonska ploča	48.2
			Mršavi beton	35.0
			Nevezana podloga	55.0

ploče, realno bi bilo očekivati da vrednost modula k veća. Zbog toga se dobijeni rezultati za indeks mogu smatrati konzervativnim.

Tabela 10. Prikaz rezultata indeksa PCR i PCN za krutu kolovoznu konstrukciju

Posteljica			PCR			PCN			
PCR	PCN	Kritični avion	ACR	PCR	PCR/ACR	Kritični avion	ACN	PCN	PCN/ACN
A	A	B777-300ER	787	819.0	1.04	B777-300ER	66.0	58.7	0.89
B	B	B777-300ER	1006.3	1051.5	1.04	B777-300ER	66.0	64.8	0.98
C	C	B777-300ER	1178.1	1230.2	1.04	B777-300ER	66.0	77.1	1.17
D	D	B777-300ER	1359.6	1410.2	1.04	A350-900	65.1	96.6	1.48

5. ZAKLJUČAK

Nova metoda za analizu nosivosti kolovoznih konstrukcija na aerodromskim manevarskim površinama ACR-PCR prevazilazi nedostatke metode ACN-PCN koja se do sad koristila.

Primenom ove metode, operatori aerodroma će biti u prilici u okviru svojih sistema za upravljanje kolovozima da optimizuju upotrebu manevarskih saobraćajnih površina i bolje predviđaju preostali vek kolovoznih konstrukcija na njima. Značajan napredak predstavljaju i jedinstvena klasifikacija nosivosti tla u posteljici za fleksibilne i krute kolovozne konstrukcije i posebno generička procedura za proračun PCR, koja će omogućiti pouzdanije i konsistentnije predviđanje nosivosti kolovoznih konstrukcija.

Za avio prevoznike nova procedura omogućava optimizaciju opterećenja aviona i izbegavanje konzervativnih kriterijuma koji su do određene mere uticali na isplativost i efikasnost avio saobraćaja.

Treba imati u vidu da su je određivanje PCR neophodno poznavanje trenutne i buduće strukture avio-saobraćaja, kao i da se predviđa objavljivanje vrednosti PCR za sve manevarske površine (platforme, rulne staze i poletno-sletne staze).

Iako je bilo predviđeno da se ova procedura primenjuje od kraja 2024. godine u potpunosti, za sada je ona primenjena na aerodromima u Sjedinjenim Državama, dok evropske države još uvek dominantno izveštavaju o nosivosti kolovoznih konstrukcija na aerodromima na bazi

PCN broja. EASA je odložila krajem 2024. godine prelazak na novi način izveštavanja, kako bi osigurala usaglašenost propisa i sinhronizovani prelazak na ACR/PCR metodologiju [21].

6. LITERATURA

- [1] Fabre, C. A New Era in Airport Pavement Asset Management, AIRCRAFT / PAVEMENT CLASSIFICATION RATING ACR / PCR, Central American and Caribbean Working Group (NACC/WG) Aerodromes and Ground Aids (AGA) Implementation Task Force Meeting (NACC/WG/AGA/TF/2), Mexico City, Mexico, 15 to 17 May 2024.
- [2] Han, J. Airport Pavement Design and Evaluation, Lectures, University of Kansas, 2010.
- [3] White, G. Limitations and potential improvement of the aircraft pavement strength rating system to protect airport asphalt surfaces. International Journal of Pavement Engineering, 18(12), 1111–1121., 2017., <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1155122>
- [4] ICAO Doc 9157 - Aerodrome Design Manual - Part 3 - Pavements, International Civil Aviation Organization, Second Edition, 1983.
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/ACN-PCN_method, pristupljeno 20.02.2026.
- [6] Fabre, C. The ICAO ACR/PCR Method, New Method to Report Pavement Strength (ACR-PCR) Webinar, 2022.
- [7] Fabre, C., Balay J.M., Lerat, P., Mazars, A. Full-scale aircraft tire pressure tests, Proceedings of the 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Tutumluer & Al-Qadi (eds), Vol II, pp. 1405-1413, 2009.
- [8] White, G, Practical implications for the implementation of the new international aircraft pavement strength rating system, 11th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Trondheim, Norway, 28-30 June 2022.
- [9] Federal Aviation Administration (FAA), Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength-PCN, Advisory Circular No 150/5335-5C, U.S. Department of Transportation, 2014.
- [10] <https://pavers.nl/load-classification/the-aircraft-classification-number>, pristupljeno 20.02.2026.
- [11] ICAO Doc 9157, Aerodrome Design Manual, Part 3 – Pavements, 3rd edition, 2022.

- [12] Federal Aviation Administration. Airport Pavement Design and Evaluation; AC 150/5320-6G; Federal Aviation Administration: Washington, WA, USA, 7 June 2021.
- [13] Federal Aviation Administration. Advisory Circular 150/5335-5D: Standardized Method of Reporting Pavement Strength for Airports. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2022.
- [14] International Civil Aviation Organization. Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation: Aerodromes. Vol. I, 9th ed., ICAO, 2022.
- [15] European Union Aviation Safety Agency. Easy Access Rules for Aerodromes: Regulation (EU) No 139/2014, Consolidated Version, EASA, December, 2024.
- [16] Federal Aviation Administration. FAA Order 5300.7: Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2005.
- [17] Airbus. A350: Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning. AIRBUS S.A.S, 2025.
- [18] Armeni, A., Loizos, A. Preliminary evaluation of the ACR-PCR system for reporting the bearing capacity of flexible airfield pavements, *Transportation Engineering* 8 (2022): 100117.
- [19] Boeing Commercial Airplanes. Aircraft Characteristics for Airport Planning: Boeing 777-200LR / -300ER / -Freighter (D6-58329-2), Revision G. Boeing, December 2024.
- [20] Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC), Service Technique de l'Aviation Civile (STAC). Rational Design Method for Flexible Airfield Pavements. 2nd ed., DGAC, October 2016.
- [21] European Union Aviation Safety Agency. Guidance for the implementation of the new Aircraft Classification Rating (ACR) - Pavement Classification Rating (PCR) method in the EASA Member States, Revision 1, October 2024. EASA, 2024.