



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

ZAVOD ZA PROMETNICE

AERODROMI

VODIČ ZA IZRADU PROGRAMA

Izradio:
Marko Ožbolt, dipl.inž.građ

veljača, 2008.

1. ACN-PCN klasifikacija

Od 1983. godine, kada je ICAO prihvatile Amandman 35 Aneks 14, primjenjuje se ACN-PCN klasifikacija zrakoplova i kolnika. Tom metodom se određuje granično opterećenje aerodromskih manipulativnih površina putem usporedbe ACN i PCN.

definicije:

ACN (Aircraft Classification Number) je broj koji izražava relativni utjecaj nekog zrakoplova na kolničku konstrukciju, uzevši u obzir deformabilnost posteljice.

Numerički je ACN definiran kao dvostruko opterećenje ekvivalentnog pojedinačnog kotača s inflacijskim tlakom od 1,25 MPa, izraženo u tisućama kilograma, tj.,

$$ACN = \frac{2Q_{eq} [kg]}{1000}, \quad \text{za } p_i = 1,25 \text{ MPa}$$

Za svaki zadani zrakoplov, kategoriju posteljice i vrstu kolnika, očita se iz tablice pripadajući ACN broj.

Mjerodavni zrakoplov je onaj zrakoplov koji ima najveći ACN.

Mjerodavni zrakoplov se određuje posebno za kruti, a posebno za savitljivi kolnik.

Vrijednosti ACN za zrakoplove očitavaju se iz tablice.

PCN (Pavement Classification Number) je broj koji označava nosivi kapacitet materijala kolnika i njegove posteljice. Numerička definicija je jednaka onoj za ACN. Zrakoplov s ACN manjim ili jednakim od PCN aerodroma može obavljati sve operacije bez ograničenja težine ili operacija. Ako je ACN zrakoplova (pod punim opterećenjem) veći od PCN aerodroma, treba ograničiti ili opterećenje zrakoplova ili broj operacija.

Metoda određivanja PCN aerodroma može biti:

- tehnička, koja se temelji na proračunima s dokazom naprezanja ili
- posredno izvedena, dobivena iz podataka za zrakoplove koji koriste promatrani aerodrom.

Za potrebe programa iz kolegija Aerodromi, PCN aerodroma se određuje posredno. Dakle, promatrajući mjerodavni zrakoplov,

$$PCN = ACN_{\max}.$$

Primjer:

Zadano je prometno opterećenje aerodroma:

tip zrakoplova	broj operacija godišnje
Airbus A300 B4	300
Boeing 707-320 C	400
Boeing 747-100	300
DC-10-10	550
DC-10-30	300

podaci o tlu (posteljici)

kategorija: A (dobra nosivost)

$k = 150 \text{ MN/m}^3$

CBR = 15%

određivanje ACN-a za zadane zrakoplove

	ACN	
	kruti kolnik	savitljivi k.
Airbus A300 B4	46	50
Boeing 707-320 C	42	45
Boeing 747-100	46	49
DC-10-10	49	57
DC-10-30	50	59

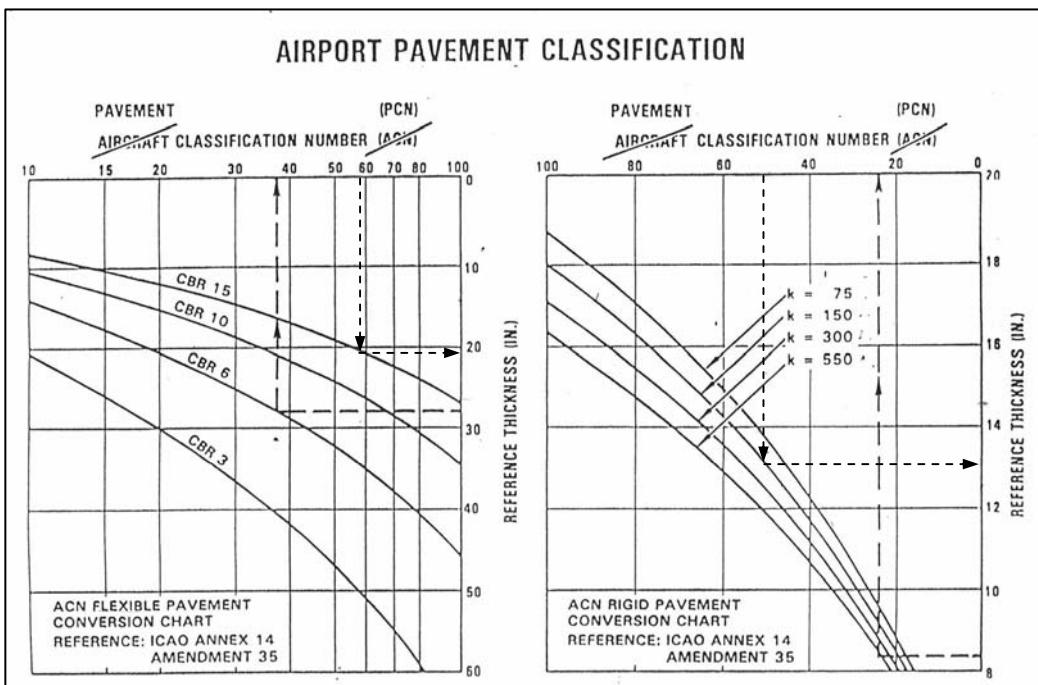
Mjerodavni zrakoplov za kruti i savitljivi kolnik je DC-10-30.

2. Određivanje referentne debljine kolničke konstrukcije prema ACN-PCN metodi

Dijagrami na slici 1 služe za orijentaciono dimenzioniranje kolničke konstrukcije, posebno za krute (h_{rk}), a posebno za savitljive kolnike (h_{rs}). Za određenu vrstu kolničke konstrukcije i ACN se preko obilježja posteljice očita vrijednost referentne debljine kolničke konstrukcije.

Pod pojmom referentna debljina kolničke konstrukcije se podrazumijeva, kod savitljivih kolnika, ukupna debljina svih slojeva kolničke konstrukcije, dok je to kod krutih kolnika debljina betonske ploče.

Dijagrami se mogu koristiti i u "suprotnom smjeru", tako da se za određenu debljinu kolnika odredi PCN aerodroma.



Slika 1: Dijagrami za određivanje referentne debljine kolničke konstrukcije

NAPOMENA: vrijednosti CBR-a i modula reakcije posteljice, "k", po potrebi interpolirati.

Primjer: Očitane vrijednosti referentne debljine kolničke konstrukcije iznose:

za savitljiv kolnik
za kruti kolnik

$$\begin{aligned} h_{rs} &= 21 \text{ in} = 53,3 \text{ cm} \\ h_{rk} &= 13 \text{ in} = 33,0 \text{ cm} \end{aligned}$$

3. Klasificiranje mjerodavnog tipa zrakoplova i aerodroma po LCN metodi za kruti i savitljivi kolnik

3.1. Klasifikacija zrakoplova za kruti kolnik

Prvo je potrebno izračunati ekvivalentno opterećenje preko jednostrukog (ekvivalentnog) kotača. To opterećenje je ono, koje uz isti tlak nalijeganja svih kotača podvozja izaziva iste deformacije betonske ploče, kao i opterećenje koje se prenosi preko čitavog podvozja.

Za određivanje ekvivalentnog opterećenja potrebno je poznavati:

E – Youngov modul elastičnosti betona [MN/m²]; E=30000 MN/m²

v – Poissonov koeficijent; v=0,15

k – modul reakcije tla [MN/m³]; k-zadan u zadatku

h – debljina kolnika [m] h-uzeti referentnu d.

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_1 \cdot h_{rk}^3}{12 \cdot (1 - v^2) \cdot k}}$$

$$A = \frac{G}{1,1 \cdot p_i}$$

p_i – inflacijski tlak u gumama [MPa]

G – masa koju prenosi jedno podvozje [MN]

f - faktor redukcije; određuje se iz nomograma slici 2. Ulagni podaci za nomograme su (ovisno da li je sustav podvozja mjerodavnog zrakoplova dvostruki kotač ili dvostruki tandem):

$$\frac{S_T}{l}, \frac{A}{l^2} i \frac{S_B}{l}$$

$$P_{ekv} = \frac{G}{f} - \text{ekvivalentno opterećenje}$$

$$p_p = 1,1 \times p_i - \text{tlak punjenja}$$

LCN se određuje iz nomograma na slici 3. (Za kontrolu, LCN $\geq 0,6$ ACN).

Primjer:

$$l = \sqrt[4]{\frac{30000 \cdot 0,33^2}{12 \cdot (1 - 0,15^2) \cdot 150}} = 1,17 \text{ m}$$

Podaci o mjerodavnom zrakoplovu:

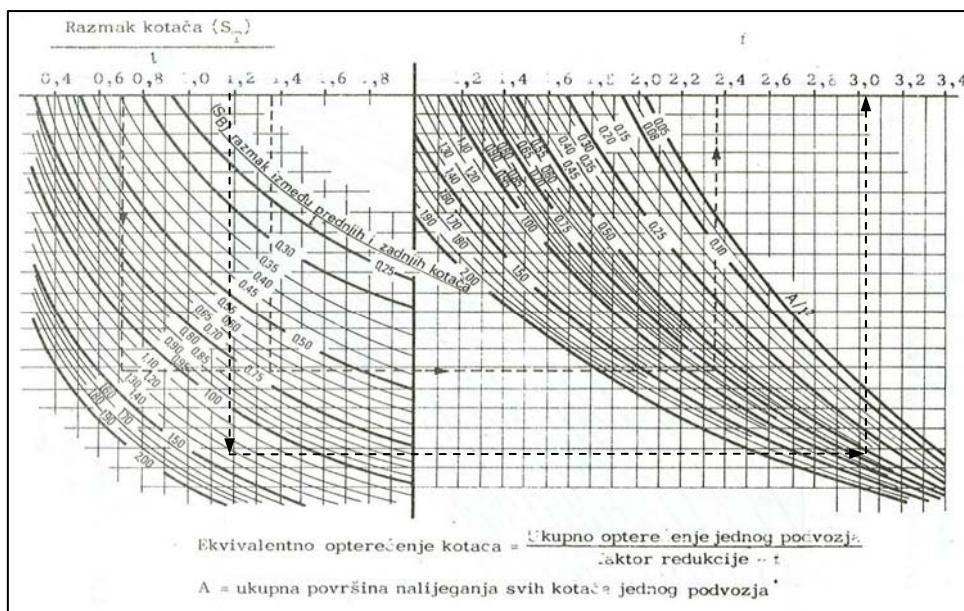
$$G_{\text{zrakoplov}} = 2593 \text{ kN} = 264,3 \text{ t} \quad \text{ukupna težina zrakoplova}$$

$$G = G_{\text{zrakoplov}} \times 37,9\% = 982,75 \text{ kN} = 0,983 \text{ MN}$$

$$A = \frac{0,983}{1,1 \cdot 1,22} = 0,732 \text{ m}^2$$

$$S_T = 1,37 \text{ m}; \quad S_B = 1,62 \text{ m}$$

$$\frac{S_T}{l} = 1,17; \quad \frac{A}{l^2} = 0,53; \quad \frac{S_B}{l} = 1,38$$

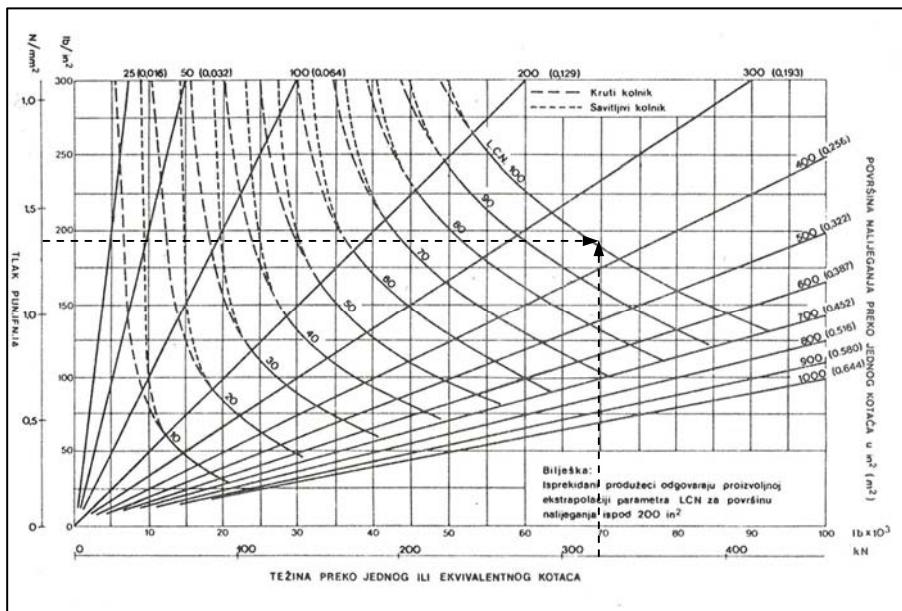


Slika 2: Nomogram za određivanje faktora redukcije za dvostruki tandem

$$P_{ekv} = \frac{G}{f} = \frac{982,75}{3,05} = 322,21 \text{ kN}$$

$$p_p = 1,1 \times p_i = 1,1 \times 1,22 = 1,34 \text{ MPa}$$

Očitana je vrijednost LCN = 101.



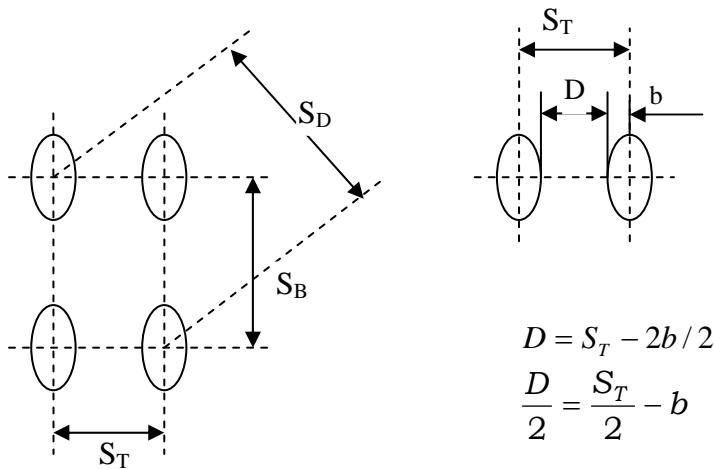
Slika 3: Nomogram za određivanje broja LCN

3.2. Klasifikacija zrakoplova za savitljivi kolnik

Proračun ekvivalentnog opterećenja preko jednostrukog kotača je kod savitljivog kolnika nešto komplikiranije nego kod krutog kolnika, zbog toga jer je savitljivi kolnik sastavljen od nekoliko slojeva od različitih materijala.

Proračun se vrši pomoću nomograma na slici 4. Na nomogram se nanose točke ($D/2$, Q-težina jednog kotača podvozja) i ($2S_D$, G-težina svih kotača podvozja), koje se spoje pravcem. Točka u kojoj se sijeku pravac i vertikalna linija iz ukupne debljine kolnika (h_{rs} - savitljivi kolnik) se preslika na ordinatu i očita se P_{ekv} .

Za proračun su potrebni neki geometrijski podaci o podvozju koji se računaju na sljedeći način:



$$A = \frac{Q}{p_i} [\text{m}^2] - \text{površina nalijeganja jednog kotača}$$

$$A = ab\pi = 1,4b^2\pi - \text{površina elipse}$$

Q = opterećenje po kotaču [MN]
slijedi,

$$\frac{Q}{p_i} = 1,4\pi b^2 \quad \Rightarrow \quad b = \sqrt{\frac{Q}{1,4\pi p_i}}$$

iz toga je,

$$\frac{D}{2} = \frac{S_T}{2} - b = \frac{S_T}{2} - \sqrt{\frac{Q}{1,4\pi p_i}}$$

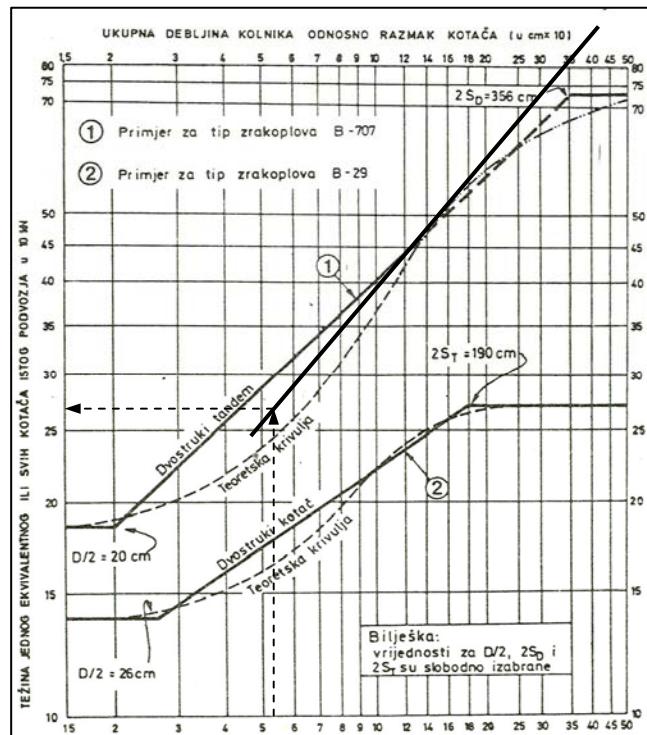
Nakon što se odredi P_{ekv} , poznati su svi podaci za određivanje LCN iz nomograma na slici 3.

Primjer:

$$\frac{D}{2} = 0,47 \text{ m} = 47 \text{ cm}; \quad Q = 245,69 \text{ kN}$$

$$2S_D = 4,24 \text{ m} = 424 \text{ cm}; \quad G = 982,75 \text{ kN}$$

Slika 4. Nomogram za određivanje težine ekvivalentnog kotača na asfaltnom kolniku



$$P_{ekv} = 270 \text{ kN}$$

Za P_{ekv} je iz nomograma na sl. 3 očitano LCN=88

4. Određivanje proračunskog broja operacija godišnje, svedeno na mjerodavni tip zrakoplova

Svođenje broja prolaza različitih modela zrakoplova, na broj prolaza mjerodavnog (projektnog) zrakoplova obavlja se primjenom sljedećeg izraza:

$$\log N_1 = \sqrt{\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)} \cdot \log N_2,$$

gdje su:

N_1 i N_2 odgovarajući brojevi operacija zrakoplova modela 1 i 2, a Q_1 i Q_2 opterećenja po kotaču zrakoplova.

Ovi se izrazi primjenjuju za konverziju broja prolaza samo za zrakoplove s istim brojem kotača glavnog podvozja, kao i mjerodavni zrakoplov. Ako to nije slučaj primjenjuju se sljedeći faktori redukcije broja prolaza:

sa	na	faktor
jednostruki kotač	dvostruki kotač	0,80
jednostruki kotač	dvostruki tandem	0,50
dvostruki kotač	dvostruki tandem	0,60

Primjer xx: Potrebno je dimenzionirati kolničku konstrukciju za sljedeće prometno opterećenje u toku predviđenog vijeka trajanja od 20 godina.

zrakoplov	broj uzljetanja (N)	težina po kotaču [kN]	vrsta podvozja
B 727-200	10000	177	dvostruki kotač
B 707-320	4000	173	dvostruki tandem
DC-9	11000	127	dvostruki kotač
DC-8-61	3000	171	dvostruki tandem

Cjelokupno prometno opterećenje svodi se na ekvivalentan broj uzljetanja zrakoplova DC-8-61.

Ovaj primjer je ovdje prikazan da se pokaže primjena faktora redukcije broja prolaza.

proračun

B 727-200	$0,60 \times 10000 = 6000$	
	$\log N_1 = \sqrt{\left(\frac{177}{171}\right)} \cdot \log 6000$	$N_1 = 6980$
B 707-320	$1 \times 4000 = 4000$	
	$\log N_1 = \sqrt{\left(\frac{173}{171}\right)} \cdot \log 4000$	$N_1 = 4198$
DC-9	$0,60 \times 11000 = 6600$	
	$\log N_1 = \sqrt{\left(\frac{127}{171}\right)} \cdot \log 6600$	$N_1 = 1957$
DC-8-61	1×3000	$N_1 = 3000$
		$\Sigma = 16135$

Ukupan broj uzljetanja mjerodavnog zrakoplova za projektno razdoblje iznosi 16135. S tom vrijednošću se ulazi u dimenzioniranje kolničke konstrukcije.

Primjer: Za primjer koji se koristi od početka separata, proračunski broj operacija za mjerodavni zrakoplov DC-10-30 je 1296.

5. Metode dimenzioniranja kolničkih konstrukcija

5.1. Savitljive kolničke konstrukcije

NAPOMENA: Ako je ACN > 60, savitljiv kolnik se ne promatra.

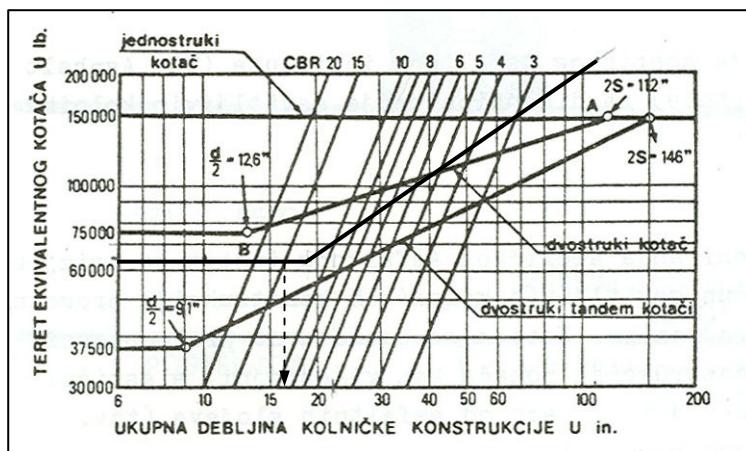
5.1.1. CBR metoda

CBR (California Bearing Ratio) metoda je vrlo jednostavna metoda za proračun debljine savitljivih kolničkih konstrukcija. Njome se dobiva zajednička (ukupna) debljina kolničke konstrukcije u ovisnosti od opterećenja, vrste podvozja i indeksa nosivosti tla, CBR. Ne uzimaju se u obzir karakteristike različitih slojeva u konstrukciji.

Ova metoda se koristi u kombinaciji s novijim metodama, a vrijednosti debljine kolničke konstrukcije služe kao orientacione vrijednosti.

Prepostavka za korištenje ove metode je da se primjenjuje tzv. ekvivalentni kotač (P_{ekv}) koji ima isti inflacijski tlak kao i kotači podvozja.

U proračunu se koristi opći nomogram, koji je primjenjiv za sve modele zrakoplova (slika 5). U nomogram se nanose dvije točke koje se spoje pravcem. Prva točka ima koordinate $(D/2, P_{ekv})$, a druga $(2S_T, \text{ukupno opterećenje podvozja} - G)$. Nađe se presjek tog pravca sa odgovarajućim pravcem indeksa nosivosti podtla, CBR te se na apscisnoj osi očita ukupna debljina kolničke konstrukcije u inčima.



Slika 5. Nomogram CBR metode za određivanje debljine savitljive kolničke konstrukcije i težine ekvivalentnog kotača podvozja zrakoplova

Primjer.

$$\frac{D}{2} = 47 \text{ cm} = 18,5 \text{ in}$$

$$P_{ekv} = 270 \text{ kN} = 60623 \text{ lb}$$

$$2S_T = 274 \text{ cm} = 107,9 \text{ in}$$

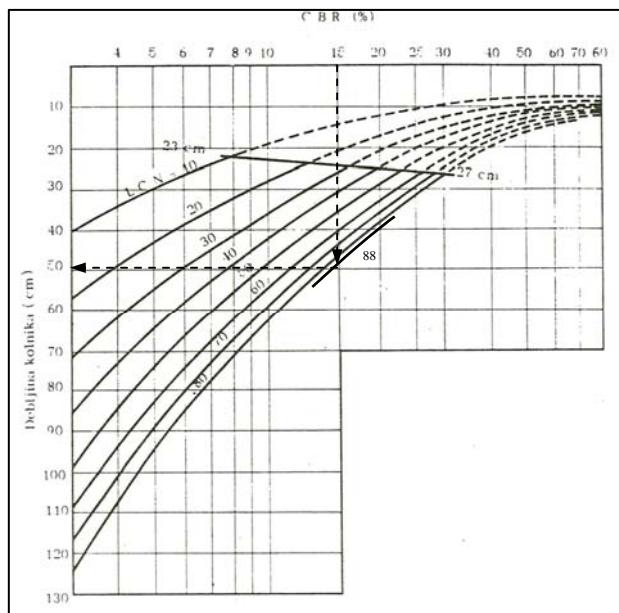
$$G = 982,75 \text{ kN} = 220657 \text{ lb}$$

Za CBR=15% očitana je debljina kolničke konstrukcije 16,5 in = 42 cm.

5.1.2. LCN metoda

Za proračun debljine savitljivih kolnika koristi se nomogram izrađen na temelju CBR metode (slika 6). Uz podatak o vrijednosti CBR-a temeljnog tla, potrebno je poznavati i LCN budućeg kolnika. Vrijednost LCN je određena u točki 3.2. Vrijednost CBR se nanese u nomogram i povuće se pravac do vrijednosti LCN. Na ordinati se od tog sjecišta očita debljina savitljivog kolnika u centimetrima.

Slika 6. Nomogram za određivanje debljine savitljivog kolnika prema LCN



Primjer.

Za vrijednost LCN = 88 i CBR posteljice 15% iz nomograma je očitana debljina kolničke konstrukcije od 50 cm.

5.1.3. FAA metoda

Debljina savitljive kolničke konstrukcije po FAA (Federal Aviation Administration) metodi određuje se primjenom nomograma za kritične površine.

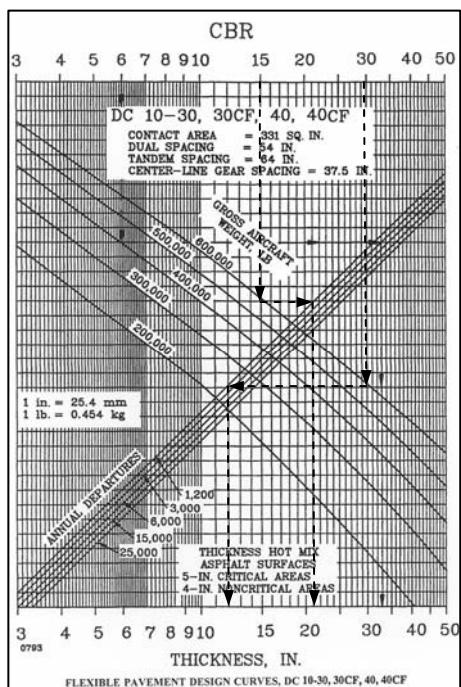
Kritične površine aerodroma su stajanke, rulne staze, krajevi (300 m od ruba) uzletno-sletnih staza i podovi u hangarima. U nekriticne površine spadaju središnji dijelovi USS-a i brze izlazne rulne staze.

Nomogrami za dimenzioniranje izrađeni su za prijenos opterećenja preko podvozja s jednostrukim, dvostrukim te dvostrukim tandem sustavom kotača (sl. 92, 93, 94, Aerodromi, Horvat). Postoje i posebni nomogrami za širokotrupne zrakoplove (slika 7 za zrakoplov DC-10-30, još nomograma ima u prilogu). Primjenom nomograma određuje se ukupna debljina konstrukcije, a za njezino određivanje potrebno je imati podatke o ukupnoj težini zrakoplova, vrijednosti indeksa nosivosti posteljice (CBR) i broju uzlijetanja ekvivalentnog zrakoplova. Nomogrami su izrađeni za predviđeno trajanje konstrukcije od 20 godina.

a) Debljina asfalt-betonskog sloja

Određena je fiksna debljina AB sloja (habajući i vezni). Za kritične površine ona iznosi 10 cm, a za nekriticne 8 cm, za slučaj opterećenja svih zrakoplova, osim širokotrupnih. Za širokotrupne zrakoplove te debljine iznose 13, odnosno 10 cm.

b) Ukupna debljina kolničke konstrukcije



Ova vrijednost se očitava na odgovarajućem nomogramu prema tipu podvozja (za zrakoplov u primjeru-slika 7). Za poznatu vrijednost CBR-a posteljice se na nomogramu povuče vertikalna linija do krivulje koja predstavlja ukupnu težinu ekvivalentnog zrakoplova. Iz tog presjecišta se povuće horizontalna linija do kosog pravca koji predstavlja broj uzlijetanja ekvivalentnog zrakoplova. Od te točke se vertikalno prema dolje povuče linija i na apscisi se očita ukupna debljina kolničke konstrukcije (u inčima). Linije ukupnog opterećenja i uzlijetanja zrakoplova po potrebi interpolirati.

Slika 7. Nomogram za za dimenzioniranje savitljivih kolnika za kritične površine za širokotrupni zrakoplov (DC-10-30)

Primjer.

$$CBR = 15\%$$

$$G_{zrakoplov} = 2593 \text{ kN} = 582207 \text{ lb}$$

godišnji broj uzljetanja – 1296

očitana ukupna debljina kolničke konstrukcije → 21 in = 53,5 cm

c) Debljina donjeg nosivog sloja

Određivanje debljine donjeg nosivog sloja slično je određivanju ukupne debljine kolničke konstrukcije. Koriste se isti nomogrami. Potrebno je odrediti zahtjev za sabijenost planuma donjeg nosivog sloja (min. CBR= 20%). Iz te vrijednosti se sa apscise (gornje) povuče vertikalna linija do ukupne težine zrakoplova. Od sjecišta se povuče horizontalna linija do linije ukupnog broja uzljetanja ekvivalentnog zrakoplova. Od tog sjecišta se prema dolje povuče vertikalna linija i očita se odgovarajuća vrijednost (u inčima).

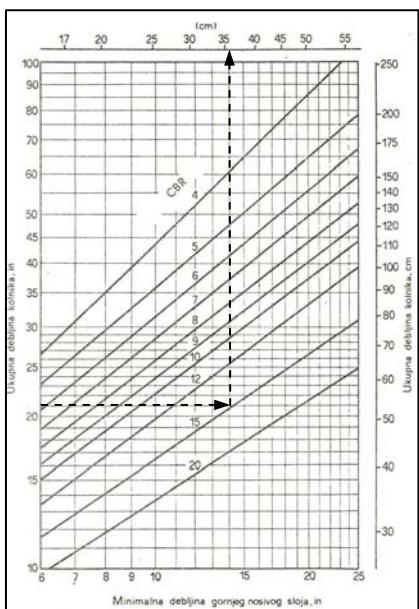
Očitana vrijednost se oduzme od ukupne debljine kolničke konstrukcije očitane u točki b). Ta razlika predstavlja debljinu donjeg nosivog sloja.

Primjer.

Iz nomograma na slici 7 je za zahtjevanu vrijednost sabijenosti planuma donjeg nosivog sloja (CBR = 30%), očitana vrijednost 12 in.

$$\text{debljina donjeg nosivog sloja} = 21 - 12 = 9 \text{ in} = 23 \text{ cm}$$

d) Debljina gornjeg nosivog sloja



Minimalna debljina za kritične površine iznosi 15 cm. Potrebna debljina određuje se iz nomograma na slici 8. U nomogram se ulazi sa podatkom ukupne debljine kolničke konstrukcije na ordinati (lijeva ili desna, ovisno da li se koriste in. ili cm). Od tuda se povuče horizontalna linija do krivulje koja predstavlja CBR posteljice. Spuštanjem na apscisu očitava se minimalna debljina gornjeg nosivog sloja.

Slika 8. Nomogram za određivanje debljine gornjeg nosivog sloja

Primjer.

Očitana je vrijednost gornjeg nosivog sloja od 36 cm

- e) Stvarna debljina kolničke konstrukcije

Ukupna debljina kolničke konstrukcije rezultat je zbroja debljina AB sloja, gornjeg i donjeg nosivog sloja. Dobiva se drugačija debljina nego u točki b).

Ukupnu debljinu konstrukcije trebalo bi provjeriti na smrzavanje, ovisno o klimatskim uvjetima.

Primjer.

Stvarna debljina kolničke konstrukcije iznosi:

asfalt beton	13 cm
BNS (gornji nosivi sloj)	36 cm
<u>MNS (donji nosivi sloj)</u>	<u>23 cm</u>
UKUPNO	72 cm

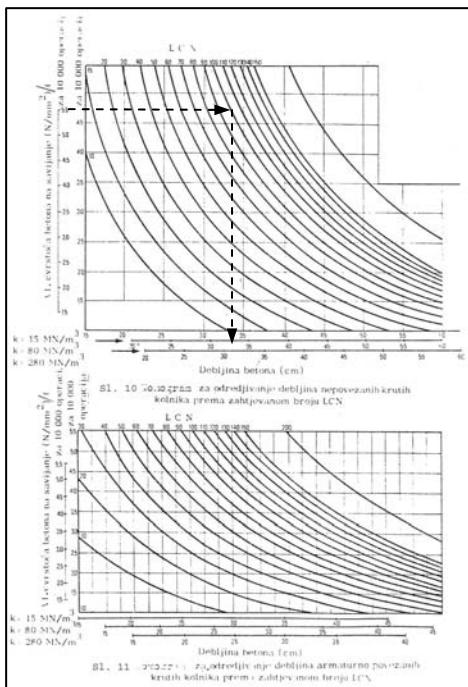
5.2. Krute kolničke konstrukcije

5.2.1. LCN metoda

Metoda se temelji na empirijskoj interpretaciji Westergaardovih formula. Kod ploča koje nisu armaturno spojene, promatra se ugao ploče koji je njezin najslabiji dio. Metoda proračuna pojednostavljena je izradom nomograma prikazanih na slici 10. Ako su ploče spojene armaturom, koristi se nomogram na slici 11.

Nomogrami se temelje na određenim vrijednostima modula reakcije tla (k) i na zadanim broju LCN za određeni broj operacija zrakoplova. Promatrujući broj operacija zrakoplova, uzimaju se mogućnosti 10000 i 40000 operacija godišnje. S obzirom na sve veći porast prometa na aerodromima koristi se skala sa 40000 operacija. Za jednu i drugu skalu obrađene su čvrstoće betona na savijanje do $5,5 \text{ N/mm}^2$.

Postupak dimenzioniranja betonske ploče počinje povlačenjem horizontalne linije sa skale odgovarajućeg broja operacija za čvrstoću betona na savijanje od $5,5 \text{ N/mm}^2$ do krivulje za odgovarajući LCN. Od sjecišta se spušta vertikalna linija i na apscisi se za odgovarajući modul reakcije podlove (k) očita potrebna debljina betonske ploče u cm.



Slike 10 i 11.

Primjer.

Za kruti kolnik sa nepovezanim pločama, uz vrijednosti, $\text{LCN}=101$ i modul reakcije podlove $k=150 \text{ MN/m}^3$, očitana je debljina betonske ploče od 32,5 cm.

5.2.2. PCA metoda

PCA (Portland Cement Association) metoda je poluempijska metoda kod koje se kao ulazni podaci pojavljuju prometno opterećenje, radno naprezanje betona (σ_{vl}) i kvaliteta posteljice (k).

Prometne površine aerodroma dijele se na kritične i nekritične (opis u točki 5.1.3.). Za kritične površine koristi se faktor sigurnosti od 1,7 do 2,0, a za nekritične od 1,4 do 1,7. Ovaj faktor služi za određivanje dopuštenog radnog naprezanja betona u kolničkoj konstrukciji.

$$\sigma_{dop} = \frac{\sigma_{vl}}{F_s}; \quad \sigma_{vl} = 4,0 - 6,5 \text{ MN/m}^2$$

$$F_s = 1,70 - 2,00$$

primjer: $\sigma_{dop} = \frac{5,5}{1,85} = 2,97 \text{ MN/m}^2 = N/mm^2$

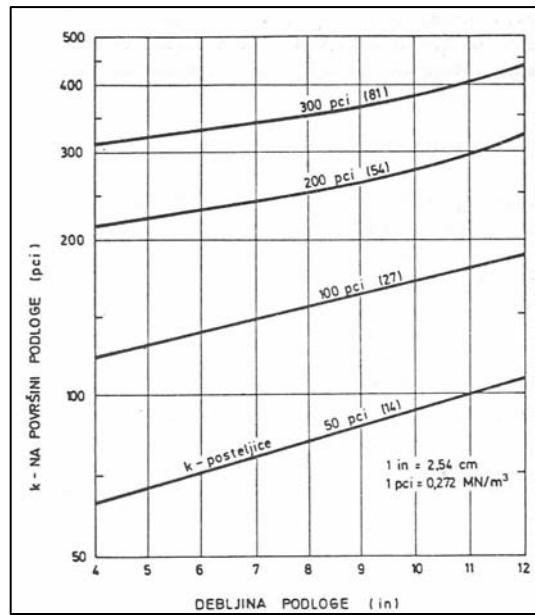
O kvaliteti posteljice ovisi izbor podloge od nevezanog materijala. Zahtjeva se minimalna vrijednost modula reakcije posteljice k=50 MN/m³. Ako ta vrijednost nije zadovljena, posteljicu treba stabilizirati. Zahtjevane karakteristike podloge od nevezanog materijala izražene su modulom stišljivosti M_s=100 MN/m², što otprilike odgovara modulu reakcije k=120 MN/m³. Preko nomograma na slici 12 određuje se debljina podloge u ovisnosti od zahtjevanog modula reakcije na površini podloge i modula reakcije posteljice.

Smrzavanje nepovoljno djeluje na kolničku konstrukciju i zbog toga treba spriječiti smrzavanje posteljice. To se postiže dovoljnom debljinom podloge i betonske ploče te upotrebom materijala otpornih na smrzavanje. Više o proračunu i sprečavanju smrzavanja u programu iz Kolničkih konstrukcija.

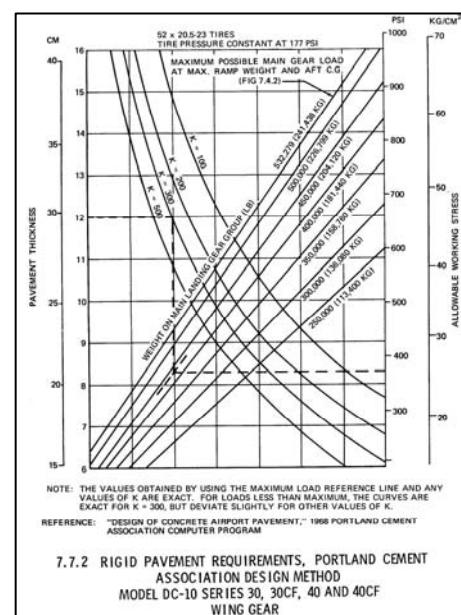
Dimenzioniranje betonske ploče vrši se preko nomograma na slici 13. Započinje se povlačenjem horizontalne linije od vrijednosti dopuštenog naprezanja betona do linije koja predstavlja ukupnu težinu zrakoplova na glavnim podvozjima (2×G ili 4×G). Zatim se povlači vertikala do krivulje odgovarajućeg modula reakcije podloge (ne modula posteljice!). Iz ovog presjecišta se povuče horizontalna linija do ordinate na kojoj se očita potrebna debljina betonske ploče.

NAPOMENA:

- 1 pci = 0,272 MN/m³, 100 psi = 0,69 N/mm²
- Za svaki tip zrakoplova postoji nomogram za dimenzioniranje.
- Kod zrakoplova DC-10-30 glavno podvozje se sastoji od dva krilna sustava kotača sa dvostrukim tandemom i jednog centralnog sustava sa dvostrukim kotačem. Težina glavnog podvozja, kao ulazni podatak za nomogram, je u tablici napisana za krilno podvozje (37,9% težine je na jednom krilnom podvozju).



Slika 12. Nomogram za određivanje debljine podlage



Slika 13. Nomogram za određivanje debljine bet. ploče za zrakoplov DC-10-30

5.2.3. FAA metoda

Metoda FAA (Federal Aviation Administration) za dimenzioniranje krutih kolnika primjenjuje se od 1974. godine. Dimenzioniranje se sastoji u određivanju ukupne debljine konstrukcije i debljine sloja podloge. Na debljinu kolničke konstrukcije utječu:

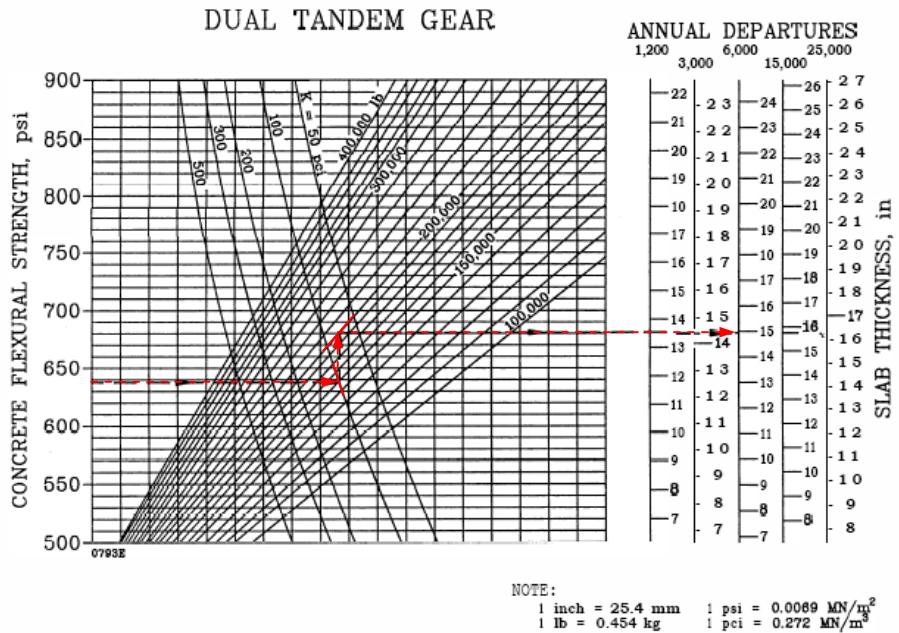
- veličina i karakter opterećenja,
- opseg prometa,
- koncentracija prometa na određenim površinama,
- kvaliteta podtla i materijala pojedinih slojeva konstrukcije.

Nomogrami kojima se dimenzionira kolnička konstrukcija izvedeni su na temelju Westergaardovih analiza. Ulagani podaci za dimenzioniranje betonske ploče su dopušteno radno naprezanje betona pri savijanju (kao u točki 5.2.2.), modul reakcije podloge (k) i ukupna težina zrakoplova. Nomogrami su konstruirani posebno za podvozja s jednostrukim kotačem, dvostrukim kotačima te dvostrukim tandem sustavom kotača (slike 14, 15, 16 prilog). Postoje i posebni nomogrami za širokotrupne zrakoplove (slike 17-27 prilog). Način očitanja debljine betonske ploče označen je na slici 14.

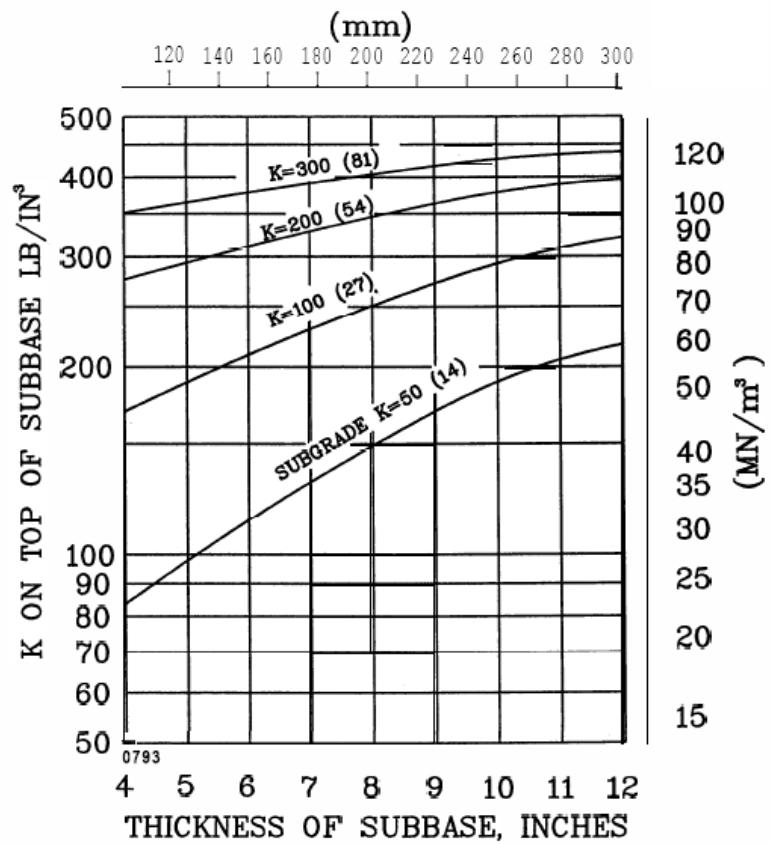
U nomogram se ulazi sa podatkom o dopuštenom radnom naprezanju betona. Povuče se horizontalna linija do pravca odgovarajućeg modula reakcije podloge. Od sjecišta se povlači vertikalna linija do krivulje koja predstavlja ukupnu težinu zrakoplova. Od te točke povuče se horizontalna linija do desne ordinate, gdje se očita potrebna debljina betonske ploče u inčima, ovisno o godišnjem broju prijelaza mjerodavnog zrakoplova.

Postoje i posebni nomogrami za dimenzioniranje betonskih ploča opterećenih na uglu ili rubu ploče, ali to u okviru ovog programa neće biti razmatrano.

Debljina podloge iznad posteljice ne bi trebala biti tanja od 10 cm. Za određivanje debljine podloge koriste se nomogram na sl. 15. U dijagram se ulazi sa podatkom o zahtjevanom modulu reakcije na površini podloge (preporučena vrijednost je $k=120 \text{ MN/m}^3$). Horizontalno se povuče linija do krivulje vrijednosti modula reakcije posteljice i vertikalno gore se očita vrijednost debljine podloge.



Slika 14. Nomogram za određivanje debeline betonske ploče prema FAA metodi



Slika 15. Nomogram za određivanje debeline podlage prema FAA metodi

6. Westergaardova metoda za dimenzioniranje krutih kolnika

6.1. Osnovne pretpostavke metode

Kruti kolnici sastoje se od betonske ploče položene na relativno tanku podlogu. Ploča prenosi opterećenje na veliku površinu posteljice. Pod opterećenjem se kruti kolnici ponašaju kao kruta ploča oslonjena na elastičnu podlogu.

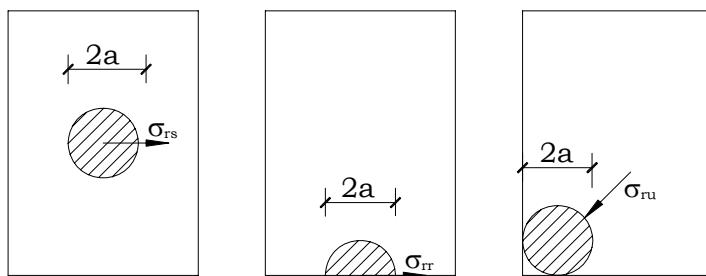
Osnovne pretpostavke Westergaardove metode su:

- betonska ploča ponaša se kao homogeno, izotropno i elastično tijelo,
- reakcija posteljice je samo vertikalna i proporcionalna progibu ploče,
- reakcija posteljice na jedinici površine u bilo kojoj točki jednaka je produktu konstante k (modul reakcije) i progiba u odgovarajućoj točki,
- debljina ploče je nepromjenjiva,
- opterećenje na ploču se prenosi ravnomjerno preko kružne površine.

6.2. Naprezanje betonske ploče (opterećenje od prometa)

Westergaard je promatrao tri kritična položaja opterećenja (slika 16.):

- a) unutar ploče, na velikoj udaljenosti od rubova,
- b) na rubu, na dovoljnoj udaljenosti od uglova,
- c) na uglu ploče



Slika 16. Položaj opterećenja prema Westergaardu

Ploča opterećena u sredini i na rubu ima vlačna naprezanje na donjoj strani, dok opterećenje na uglu izaziva vlačno naprezanje gornjeg dijela ploče. Opterećenje u sredini ploče nije mjerodavan slučaj. Veća vlačna naprezanja izazivaju opterećenja na rubu i na uglu. Za svaki slučaj opterećenja postoje formule za proračun maksimalnog vlačnog naprezanja:

a) sredina ploče

$$\sigma_{rs} = \frac{0,275 \cdot P}{h^2} \cdot (1 + \nu) \cdot \left[\log\left(\frac{E \cdot h^3}{K \cdot b^4}\right) - 0,436 \right] \quad [MN/m^2]$$

b) rub ploče

$$\sigma_{rr} = \frac{0,529 \cdot P}{h^2} \cdot (1 + 0,54 \cdot \nu) \cdot \left[\log\left(\frac{E \cdot h^3}{K \cdot b^4}\right) + \log\left(\frac{100 \cdot b}{1 - \nu^2}\right) - 1,08 \right] \quad [MN/m^2]$$

c) ugao ploče

$$\sigma_{ru} = \frac{3 \cdot P}{h^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{12 \cdot (1 - v^2) \cdot K}{E \cdot h^3 \cdot 10^8} \right)^{0,3} \cdot (100 \cdot a \cdot \sqrt{2})^{1,2} \right] \quad [MN / m^2]$$

P – ekvivalentno opterećenje [MN]

p – inflacijski tlak [MPa]

polumjer ekvivalentnog kruga nalijeganja kotača:

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi \cdot p}} \quad [m]$$

$$b = \sqrt{1,6 \cdot a^2 + h^2} - 0,675 \cdot h \quad [m], \text{ za } a < 1,724h$$

$$b = a \quad [m], \quad \text{za } a > 1,724h$$

h – debљina betonske ploče (ili ekvivalentnog sustava $-h_0$) [m]

K – modul reakcije podlage ispod betonske ploče (ili ekvivalentnog sustava) [MN/m³]

E – modul elastičnosti betona [MN/m²]

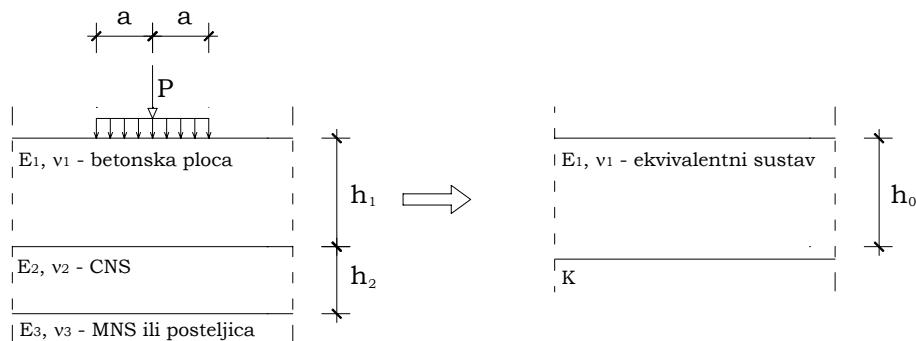
v – Poissonov koeficijent

6.3. Ekvivalentni sustav i naprezanja

Ispod betonske ploče izvodi se podloga koja može biti:

- nevezani, mehanički zbijeni zrnati materijal,
- zrnati materijal stabiliziran vezivom (cementom ili bitumenom) ili
- kombinacija stabiliziranog i nevezanog materijala.

Za potrebe ovog programa pretpostaviti će se da je ispod betonske ploče izvedena podloga od cementom stabiliziranog materijala (slika 17).



Slika 17. Zamjena krute kolničke konstrukcije ekvivalentnim sustavom

Kada je poznat koeficijent K, moguće je izračunati vlačna naprezanja u betonskoj ploči, ovisno o položaju opterećenja (σ_{rs} , σ_{rr} i σ_{ru}). Mjerodavno naprezanje je ono koje je najveće.

Debljina ekvivalentne konstrukcije je:

$$h_0 = \sqrt[3]{\frac{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}{E_1}}$$

Moment savijanja koji prenosi ekvivalentna konstrukcija je

$$M_0 = (\sigma_{r_{max}}) \cdot W = (\sigma_{r_{max}}) \cdot \frac{h_0^2}{6}$$

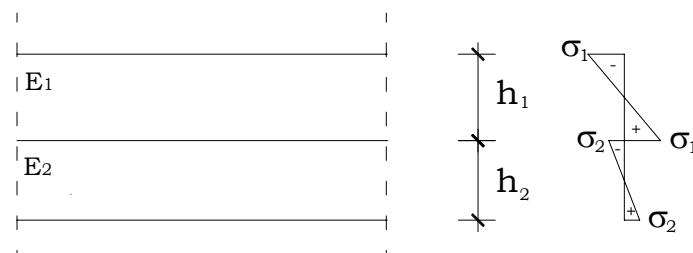
Momenti savijanja koje prenose pojedini slojevi za pretpostavljenu "glatku" vezu su:

$$M_1 = M_0 \frac{E_1 \cdot h_1^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3} \quad \text{i} \quad M_2 = M_0 \frac{E_2 \cdot h_2^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3},$$

a naprezanja su:

$$\sigma_1 = \pm \frac{M_1}{W_1} \quad \text{i} \quad \sigma_2 = \pm \frac{M_2}{W_2}, \quad \text{gdje su}$$

$$W_i = \frac{h_i^2}{6} \quad \text{momenti otpora pojedinih slojeva.}$$



Slika 18. Stvarni dvoslojni kolnik sa naprezanjima

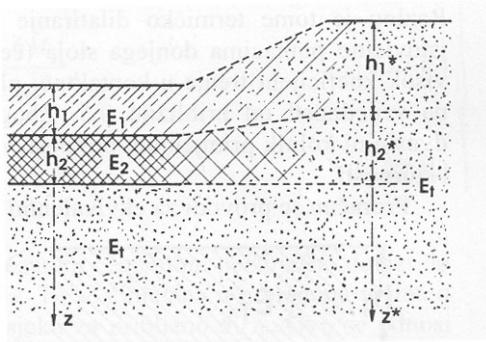
Pretpostavljena je "glatka" veza između slojeva, odnosno trenje između slojeva se ne uzima u obzir.

Naprezanja σ_1 i σ_2 (slika 18) **su naprezanja od prometnog opterećenja** u stvarnoj kolničkoj konstrukciji koja se sastoji od betonske ploče debljine h_1 i CNS-a debljine h_2 .

Da bi izračunali naprezanja σ_1 i σ_2 potrebno je još izračunati modul reakcije podloge ispod ekvivalentnog sustava (K).

- proračun reakcije podloge ispod ekvivalentnog sustava (K)

Prema Odemarkovoj teoriji sustav kolničke konstrukcije se svodi na sustav koji ima karakteristike materijala podloge (slika 19).



Slika 19. Pretvorba višeslojnog sustava u jednoslojni sustav prema Odemarku

Vrijednosti debljina slojeva prema Odemarkovoj teoriji ekvivalencije su:

$$h_1^* = n \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3}} \quad [m] \quad h_2^* = n \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}} \quad [m]$$

$$h^* = h_1^* + h_2^* \quad [m]$$

koeficijent n uzima se:

n = 0,90 – za slojeve vezane bitumenom ili nevezane slojeve

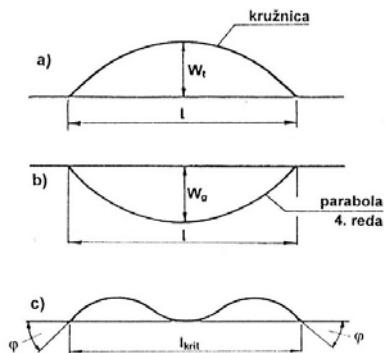
n = 0,83 – za slojeve vezane cementom.

Vrijednost modula reakcije podloge K, računa se prema sljedećoj formuli:

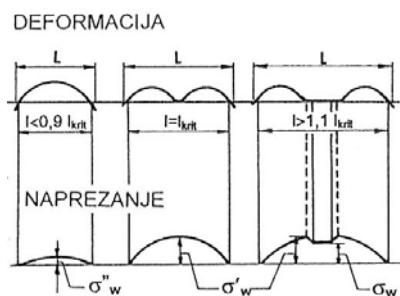
$$K = \frac{E_3}{(h_1^*)^2 \left[\frac{1}{h^*} - \frac{h_2}{h_2^*} \left(\frac{1}{h^*} - \frac{1}{h_1^*} \right) \right]} \quad [MN/m^3]$$

6.4. Temperaturna naprezanja betonske ploče

Betonska ploča kolnika se pod utjecajem promjena temperature okoliša u kojem se nalazi deformira. Najopasniji utjecaj temperature je onaj kada se ploča nejednoliko zagrijava (sa gornje strane ploče je veća temperatura nego sa donje). Tada se ploča izdiže, pri čemu je deformacija u obliku kružnice. Vlastita težina ploče pokušava ju "vratiti" u početni položaj, tako da smanjuje nastalu deformaciju (slika 20). Dužina ploče pri kojoj ploča (ponovno) dotakne podlogu zove se *kritična dužina* (l_{krit}).



Slika 20. Deformiranje betonske ploče zbog nejednolikog zagrijavanja (veća temp. s gornje strane).



Slika 21. Mogući slučajevi deformacije betonske ploče zbog nejednolikog zagrijavanja i stanja naprezanja.

Na slici 21. Prikazani su mogući slučajevi deformacije betonske ploče uslijed nejednolike temperature ploče nastale zagrijavanjem odozgo (prema Eisenmannu).

L – dužina ploče [m]

l_{krit} – kritična dužina ploče [m]

$I = L - a$ – računska dužina ploče [m]

a – dužina nalijeganja krajeva ploče [m] ($\sim 0,4$ m)

Ako se usvoje vrijednost modula elastičnosti betona $E=30000 \text{ MN/m}^2$ i temperaturnog gradijenta $\Delta t=90^\circ\text{C}/\text{m}$, kritična dužina se računa po formulama:

- za pravokutne ploče ($0,8 > (L:B) > 1,2$) – $l_{krit} = 33 \times h$ [m]
- za kvadratične ploče ($0,8 < (L:B) < 1,2$) – $l_{krit} = 37 \times h$ [m]

Naprezanja za tri slučaja deformacije:

a) $1 > l_{krit}$

$$\sigma_w = \frac{1}{1-\nu} \cdot \frac{h \cdot \Delta t}{2} \cdot \alpha \cdot E \quad [MN / m^2]$$

za $E=30000 \text{ MN/m}^2$, $\nu=0,15$ i $\alpha=1 \times 10^{-5}$, za kvadratične i pravokutne ploče naprezanje je:

$$\sigma_w = 16,3 \cdot h \quad [MN / m^2]$$

b) $1 = l_{krit}$

$$\sigma_w = 1,2 \cdot \sigma_w = 19,6 \cdot h \quad [MN / m^2]$$

c) $1 < 0,9 l_{krit}$

za pravokutne ploče $\sigma_w = 0,0186 \frac{(L-0,4)^2}{h} \quad [MN / m^2]$

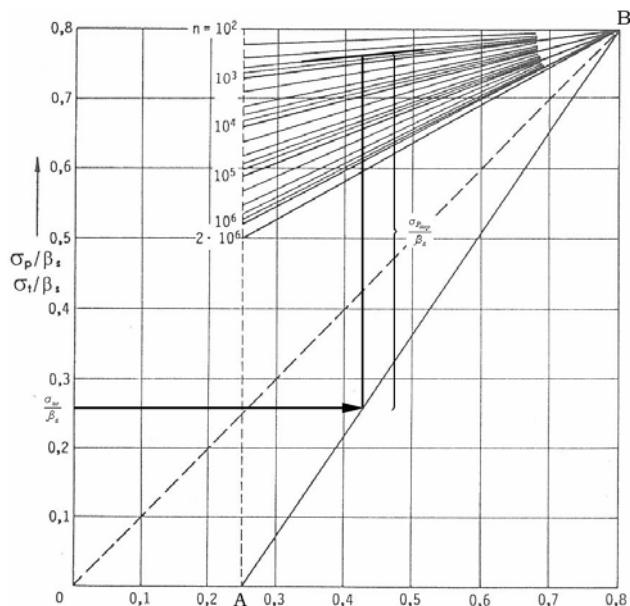
za kvadratične ploče $\sigma_w = 0,0148 \frac{(L-0,4)^2}{h} \quad [MN / m^2]$

6.5. Dopuštena naprezanja u betonskoj ploči

Naprezanja od prometnog opterećenja i naprezanja od nejednolikog zagrijavanja ploče ne mogu se izravno uspoređivati s vlačnom (statičkom) čvrstoćom betona pri savijanju. Za određivanje dopuštenog naprezanja u betonskoj ploči mora se uzeti u obzir tzv. trajna čvrstoća betona, koja ovisi o broju prijelaza ekvivalentnog prometnog opterećenja i o nejednolikom zagrijavanju ploče.

Ako nema prometnog opterećenja te na betonsku ploču djeluje samo nejednoliko zagrijavanje, trajna čvrstoća iznosi 0,8 vlačne čvrstoće pri savijanju. Ako uz nejednoliko zagrijavanje postoji i prometno opterećenje, trajna čvrstoća pada, ovisno o broju prijelaza opterećenja, na 0,8 do 0,5 vlačne čvrstoće pri savijanju.

Dopušteno naprezanje u betonskoj ploči određuje se iz Smithovog dijagrama, slika 22.



Slika 22. Dijagram za određivanje dopuštenog naprezanja betona po Smithu

Mjerodavno prometno opterećenje σ_1 je ono dobiveno iz formula za naprezanje na rubu ploče (σ'_{rr}), a temperaturno naprezanje (σ_w , σ'_w ili σ''_w) je najveće u sredini ploče. Zbog različitog položaja ta dva naprezanja uvode se koeficijenti kako bi se naprezanja mogla uspoređivati i koristiti u Smithovom dijagramu za određivanje dopuštenih naprezanja u betonskoj ploči.

Računat će se naprezanje na rubu ploče. Zbog toga se temperaturno naprezanje množi koeficijentom 0,85. Smatra se da je temperaturno naprezanje 15% manje na rubu nego u sredini ploče.

Prometno opterećenje (σ_p), koje se uspoređuje s dopuštenim ($\sigma_{p\text{ dop}}$) se na rubu ploče smanjuje 30% jer dio naprezanja preuzima susjedna ploča, budući da su povezane armaturom. Zbog toga se σ_p množi koeficijentom 0,7.

Postupak određivanja dopuštenog naprezanja:

- odredi se naprezanje od nejednolikog zagrijavanja σ_w (σ_w' ili σ_w'') i izračuna $\frac{\sigma_w}{\beta_s}$, (uvrsti se $0,85\sigma_w$) gdje je β_s čvrstoća betona pri savijanju ($\beta_s=4,0$ do $6,5$ Mpa),
- vrijednost $\frac{\sigma_w}{\beta_s}$ nanosi se na ordinatu i povlači horizontala do crte A-B,
- vertikalni odsječak od tog presjecišta do pravca odgovarajućeg broja prijelaza ekvivalentnog opterećenja u projektnom razdoblju, predstavlja odnos dopuštenog naprezanja betonske ploče i vlačne čvrstoće pri savijanju $\left(\frac{\sigma_{P_{dop}}}{\beta_s}\right)$.

Mora biti zadovoljen uvjet:

$$f \frac{\sigma_P}{\beta_s} < \frac{\sigma_{P_{dop}}}{\beta_s}$$

σ_P – radijalno vlačno naprezanje zbog prometnog opterećenja (koristi se $0,7\sigma_P$)

$\sigma_{P_{dop}}$ – dopušteno naprezanje u betonskoj ploči (trajna čvrstoća)

f – faktor sigurnosti sljedećih vrijednosti

- 1,0 za prometne površine s malim prometnim opterećenjem
- 1,1 za prometne površine sa srednjim prom. opt. i gradske ulice
- 1,2 za prometne površine sa teškim i vrlo teškim prometnim opterećenjem i autoceste

Ako se traženi uvjet ne zadovoljava, treba obaviti ponovni proračun sa promijenjenim elementima (većom debljinom betonske ploče).

*Primjer***Ulazni podaci:**

P _{ekv}	=	0,322	MN	ekvivalentno opterećenje
h ₁	=	0,3	m	debljina betonske ploče
E ₁	=	30000	MN/m ²	modul betonske ploče
v ₁	=	0,15		Poissonov koef.
h ₂	=	0,15	m	debljina CNS-a
E ₂	=	10000	MN/m ²	modul CNS-a
E ₃	=	100	MN/m ²	modul podloge
p _i	=	1,22	Mpa	inflacijski tlak u gumama

proračun modula reakcije K

$$h_1^* = n \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3}} \quad [m] \quad h_2^* = n \cdot h_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}} \quad [m]$$

$$h^* = h_1^* + h_2^* \quad [m]$$

$$K = \frac{E_3}{(h_1^*)^2 \left[\frac{1}{h^*} - \frac{h_2}{h_2^*} \left(\frac{1}{h^*} - \frac{1}{h_1^*} \right) \right]} \quad [MN/m^3]$$

$$h_1^* = 1,667 \text{ m}$$

$$h_2^* = 0,578 \text{ m}$$

$$\mathbf{h^* = 2,245 \text{ m}}$$

$$\mathbf{K = 74,12 MN/m^3}$$

$$h_0 = \sqrt[3]{\frac{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}{E_1}}$$

$$\mathbf{h_0 = 0,304 \text{ m}}$$

Naprezanja u betonskoj ploči**rub ploče**

$$\sigma_{rr} = \frac{0,529 \cdot P}{h^2} \cdot (1 + 0,54 \cdot v) \cdot \left[\log\left(\frac{E \cdot h^3}{K \cdot b^4}\right) + \log\left(\frac{100 \cdot b}{1 - v^2}\right) - 1,08 \right] \quad [MN / m^2]$$

$$\sigma'_{rr} = 7,468 \text{ MPa}$$

sredina ploče

$$\sigma_{rs} = \frac{0,275 \cdot P}{h^2} \cdot (1 + v) \cdot \left[\log\left(\frac{E \cdot h^3}{K \cdot b^4}\right) - 0,436 \right] \quad [MN / m^2]$$

$$\sigma'_{rs} = 3,274 \text{ MPa}$$

Momenti i naprezanja u slojevima

$$M_0 = (\sigma_{r_{\max}}) \cdot W = (\sigma_{r_{\max}}) \cdot \frac{h_0^2}{6}$$

$$M_0 = 0,115 \text{ MNm}$$

$$M_1 = 0,1105 \text{ MNm} \quad \Rightarrow \quad \sigma_1 = 7,37 \text{ MPa}$$

$$M_2 = 0,0046 \text{ MNm} \quad \Rightarrow \quad \sigma_2 = 1,23 \text{ MPa}$$

Temperaturna naprezanja

dimenzije ploča su $5 \times 5 \text{ m} \Rightarrow L = 5 \text{ m}$

$$l_{\text{krit}} = 37 \times h = 11,1 \text{ m}$$

$$1 < 0,9 l_{\text{krit}}$$

$$\text{kvadratične ploče } \sigma_w'' = 0,0148 \frac{(L - 0,4)^2}{h} \quad [MN / m^2]$$

$$\sigma''_w = 1,044 \text{ MPa}$$

Dopuštena naprezanja

Mjerodavna su naprezanja na rubu ploče. Budući da se najveće temperaturno naprezanje izračunalo za sredinu ploče, potrebno ga je za rub ploče smanjiti za 15%. U Smithov dijagram ulazi se sa smanjenim temperaturnim naprezanjem $\frac{0,85\sigma_w}{\beta_s}$. Za β_s uzima se vrijednost 4,0 do 6,0 MPa.

$$\frac{0,85\sigma_w}{\beta_s} = \frac{0,85 \cdot 1,044}{5,0} = 0,18$$

Iz Smithovog dijagrama očitano je $\frac{\sigma_{P_{dop}}}{\beta_s} = 0,55$

$$f \frac{\sigma_P}{\beta_s} < \frac{\sigma_{P_{dop}}}{\beta_s}$$

Naprezanje od prometnog opterećenja smanjuje se (koeficijent 0,7) jer se pretpostavlja da 30% preuzima susjedna ploča.

$$1,2 \frac{0,7 \cdot 7,37}{5} < 0,55$$

1,24 > 0,55 **NE ZADOVOLJAVA!** Potrebno je ponoviti proračun s većom debljinom betonske ploče
