

## Komponente optičkih sistema

---

### 3.1 Sočivo

Sočivo je optički element napravljen od prozračnog optičkog materijala, ograničenog dvema rotacionim prelomnim površinama, koje su obično osno simetrične i centrirane. Najveći broj sočiva je ograničen sa dve sferne površine. Ako je jedna površina ravna, tada ona mora biti normalna na optičku osu.

Sočiva se mogu podeliti na:

- sabirna sočiva,
- rasipna sočiva.

Sabirno sočivo je sočivo koje paralelan ulazni snop zraka skuplja u jednoj tački, odnosno jednoj ravni. Po obliku može biti bikonveksno (dve sferne konveksne površine), plankonveksno (jedna sferna konveksna površina i jedna ravna površina) i menisk (po jedna sferna konveksna i konkavna površina). Osnovna karakteristika sabirnog sočiva je da je ono uvek deblje na osi nego na periferiji. Rasipno sočivo je sočivo kod koga se ulazni paralelni snop zraka posle prolaska kroz sočivo rasipa, odnosno širi, umesto da se skuplja. Po obliku može biti bikonkavno (dve sferne konkavne površine), planokonkavno (jedna sferna konkavna površina i jedna ravna površina) i menisk (po jedna sferna konveksna i konkavna površina). Osnovna karakteristika rasipnog sočiva je da je ono uvek deblje na periferiji nego na osi.

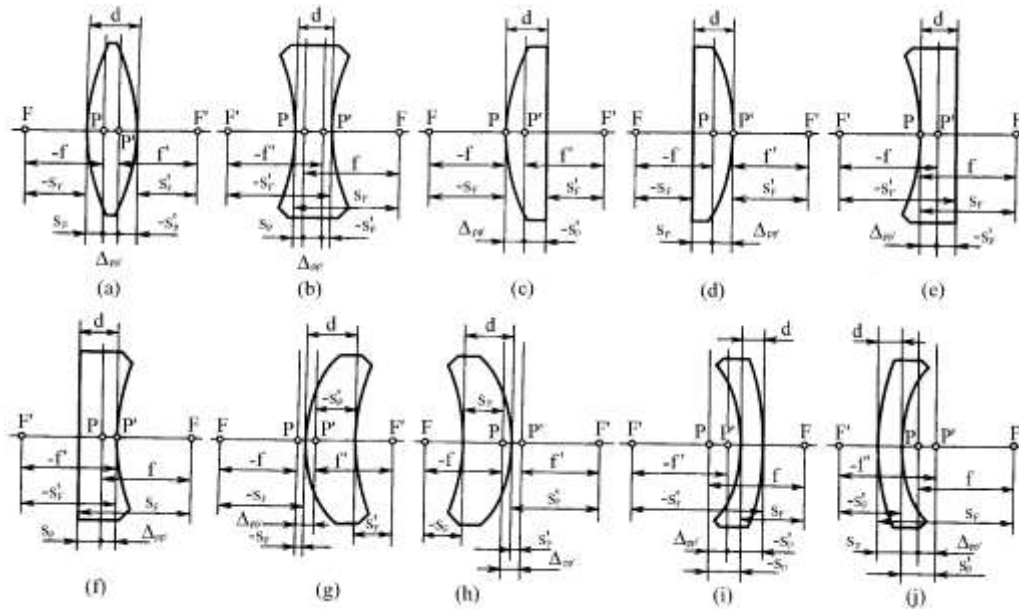
Konstruktivni parametri svakog sočiva su:

- dva radijusa krivine –  $r_1$  i  $r_2$ ,
- debljina sočiva koja se meri duž optičke ose –  $d$ ,
- indeks prelamanja materijala od koga je sočivo napravljeno –  $n_2$  ( $n_1$  i  $n_3$  su indeksi prelamanja sredina ispred i iza sočiva).

Parametri koje treba odrediti hodom nultog zraka (kvaziparaksijalnog zraka) su:

- prednja i zadnja žižna dužina –  $f$  i  $f'$ ,
- prednje i zadnje temeno rastojanje –  $s_F$  i  $s'_F$ ,
- rastojanje prednje i zadnje glavne ravni –  $s_P$  i  $s'_P$ ,
- rastojanje između glavnih ravni  $\Delta_{PP}$ .

Na slici 3.1 prikazani su različiti tipovi sočiva, sa definisanim parametrima koji se mogu odrediti hodom nultog zraka.



Slika 3.1. Različiti tipovi sočiva  
Preuzeto iz [1]

Svi parametri biće određeni pomoću sistema jednačina, koji se dobija kada se predmet nalazi u beskonačnosti i snop zraka ulazi paralelno sa optičkom osom u sistem. Sistem jednačina se sastoji iz sledećeg skupa jednačina:

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 &= 0, \\
 \sigma_2 &= m \frac{h_1 \cdot (n_2 - n_1)}{n_2 \cdot r_1}, \\
 h_2 &= h_1 - \sigma_2 \cdot d, \\
 \sigma_3 &= \frac{n_2}{n_3} \cdot \sigma_2 + \frac{h_2 \cdot (n_3 - n_2)}{n_3 \cdot r_2}, \\
 f' &= \frac{h_1}{\sigma_3}.
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Konačne formule za proračun prednje i zadnje žiže, dobijene na osnovu sistema jednačina (3.1) su

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{f'} &= \frac{1}{n_3} \cdot \left( \frac{n_2 - n_1}{r_1} + \frac{n_3 - n_2}{r_2} \right) - \frac{(n_2 - n_1) \cdot (n_3 - n_2)}{n_2 \cdot n_3 \cdot r_1 \cdot r_2} \cdot d, \\
 \frac{1}{f} &= \frac{1}{n_1} \cdot \left( \frac{n_1 - n_2}{r_1} + \frac{n_2 - n_3}{r_2} \right) + \frac{(n_1 - n_2) \cdot (n_2 - n_3)}{n_1 \cdot n_2 \cdot r_1 \cdot r_2} \cdot d, \\
 \frac{f'}{f} &= -\frac{n_3}{n_1}.
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

U projektovanju optičkih sistema koristi se pojam optička moć, koji je definisan kao

$$\phi = \frac{n_3}{f'} = -\frac{n_1}{f}. \quad (3.3)$$

Optička moć je jedna od osnovnih karakteristika optičkih komponenti. Što je veća optička moć, to je lik predmeta bliži optičkoj komponenti. Dioptriya je jedinica za izražavanje optičke moći sočiva (naročito kod sočiva za naočare). Dioptriya se definiše kao recipročna vrednost žižne dužine, izražene u metrima za sočivo u vazduhu

$$D = \frac{1}{f'} \quad [\text{m}], \quad \text{odnosno} \quad D = \frac{1000}{f'} \quad [\text{mm}], \quad (3.4)$$

gde je  $D$  dioptriya.

Zadnje temeno rastojanje se računa po formuli

$$s'_F = f' \cdot \left( 1 - \frac{n_2 - n_1}{n_2 \cdot r_1} \cdot d \right). \quad (3.5)$$

Prednje temeno rastojanje se računa po formuli

$$s_F = -f' \cdot \frac{n_1}{n_3} \cdot \left( 1 + \frac{n_2 - n_3}{n_2 \cdot r_2} \cdot d \right). \quad (3.6)$$

Rastojanje zadnje glavne ravni se računa po formuli

$$s'_P = -f' \cdot \frac{n_2 - n_3}{n_2 \cdot r_1} \cdot d. \quad (3.7)$$

Rastojanje prednje glavne ravni se računa po formuli

$$s_P = -f' \cdot \frac{n_1}{n_3} \cdot \frac{n_2 - n_3}{n_2 \cdot r_2} \cdot d. \quad (3.8)$$

Rastojanje između glavnih ravni se računa po formuli

$$\Delta_{PP} = \left[ 1 - \frac{f'}{n_2} \cdot \left( \frac{n_2 - n_1}{r_1} - \frac{n_1}{n_3} \cdot \frac{n_2 - n_3}{r_2} \right) \right] \cdot d. \quad (3.9)$$

Za sočivo koje se nalazi u vazduhu ( $n_1 = n_3 = 1, n_2 = n$ ), jednačine (3.4) do (3.9) svode se na:

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2}{n \cdot r_1 \cdot r_2} \cdot d, \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{f} = (1-n) \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) - \frac{(n-1)^2}{n \cdot r_1 \cdot r_2} \cdot d, \quad (3.11)$$

$$\frac{f'}{f} = -1; \quad f = -f', \quad (3.12)$$

$$s'_F = f' \cdot \left( 1 - \frac{n-1}{n \cdot r_1} \cdot d \right), \quad (3.13)$$

$$s_F = -f' \cdot \left( 1 + \frac{n-1}{n \cdot r_2} \cdot d \right), \quad (3.14)$$

$$s'_P = -f' \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_1} \cdot d, \quad (3.15)$$

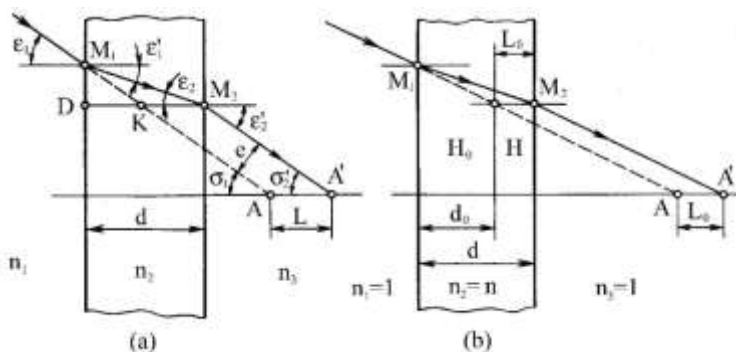
$$s_P = -f' \cdot \frac{n-1}{n \cdot r_2} \cdot d, \quad (3.16)$$

$$\Delta_{PP} = \left[ 1 - \frac{f'}{n} \cdot (n-1) \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right] \cdot d. \quad (3.17)$$

### 3.2 Planparalelna ploča

Planparalelna ploča je optički element ograničen dvema ravnim, međusobno paralelnim prelamajućim površinama. Planparalelna ploča može biti prozračna, poluprozračna i matirana. Planparalelna ploča nalazi široku primenu u optičkim instrumentima. Koristi se za izradu končanica, zaštitnih stakala, svetosnih filtera i ravnih ogledala.

Na slici 5.3 je prikazan hod zraka kroz planparalelnu ploču.



Slika 3.2. Prelamanje na planparalelnoj ploči

Zrak u prostoru predmeta formira sa optičkom osom ugao  $\sigma_1$ . Tačka A, gde bi zrak presekao optičku osu u odsustvu planparalelne ploče se zove virtuelna tačka predmeta. Sa slike 3.2 se vidi da je

$$\varepsilon_1 = \sigma_1 \Rightarrow \sin \varepsilon_1' = \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin \sigma_1, \quad (3.18)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1' \Rightarrow \sin \varepsilon_2' = \sin \sigma_2' = \frac{n_2}{n_3} \cdot \sin \varepsilon_1' = \frac{n_1}{n_3} \sin \sigma_1.$$

Ako se planparalelna ploča nalazi u homogenoj sredini  $n_1 = n_3$ , tada su uglovi  $\sigma_1$  i  $\sigma_2'$  jednaki, tj. zrak koji ulazi u planparalelnu ploču je paralelan sa zrakom koji izlazi iz planparalelne ploče. Aksijalno pomeranje prelomljenog zraka zbog prisustva planparalelne ploče je definisano formulom

$$L = \left( 1 - \frac{\tan \varepsilon_1'}{\tan \varepsilon_1} \right) \cdot d. \quad (3.19)$$

Za paraksijalnu oblast, uglovi  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_1'$  su mali, pa važi sledeća aproksimacija

$$\frac{\tan \varepsilon_1'}{\tan \varepsilon_1} \approx \frac{\varepsilon_1'}{\varepsilon_1} \approx \frac{n_1}{n_2}.$$

Ako se planparalelna ploča nalazi u vazduhu, aksijalno pomeranje u paraksijalnoj oblasti je definisano formulom

$$L_0 = d \cdot \frac{n-1}{n}. \quad (3.20)$$

Poprečno pomeranje prelomljenog zraka zbog prisustva planparalelne ploče koja se nalazi u vazduhu je

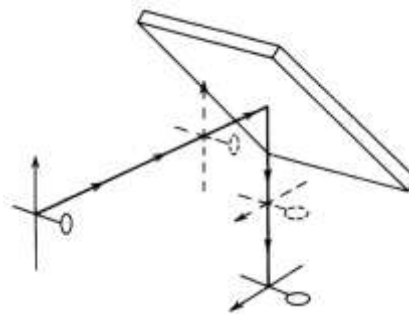
$$e = \sin \varepsilon_1 \cdot \left( 1 - \frac{\cos \varepsilon_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varepsilon_1}} \right) \cdot d. \quad (3.21)$$

Debljina planparalelne ploče zavisi od prečnika i kvaliteta izrade. Za planparalelne ploče visoke tačnosti koje se postavljaju ispred objektivna, debljina treba da bude 1/10 do 1/8 prečnika, dok za planparalelne ploče srednje tačnosti, od kojih se prave končanice, debljina treba da bude od 1/15 do 1/12 prečnika.

### 3.3 Ravno ogledalo

Ravno ogledalo je optički element koji ima ravnu refleksnu površinu. Namenjeno je za promenu pravca zraka i za promenu položaja ose optičkog sistema. Kombinacija ravnih ogledala postavljanih pod određenim uglom omogućava obrtanje lika.

Na slici 5.3 je prikazana orijentacija lika posle odbijanja od ravnog ogledala.



Slika 3.3. Orijetacija lika posle odbijanja od ravnog ogledala  
Preuzeto iz [16]

Uobičajeno je da se kao predmet posmatra krst sa strelicom i kružićem, koji omogućava da se sagleda kompletna orijentacija predmeta i lika u prostoru.

Ravno ogledalo se pravi tako što se refleksni sloj nanosi na spoljnu, ili unutrašnju površinu planparalelne ploče. U slučaju kada je refleksni sloj nanešen na unutrašnju površinu, mogu se pojaviti parazitski likovi od spoljne površine planparalelne ploče. Kod ogledala visoke tačnosti refleksni slojevi se uvek nanose na spoljnu površinu.

Veličina ravnog ogledala sa refleksnim slojem na spoljnoj površini, određuje se formulom

$$c = \frac{D}{\cos \varepsilon}, \quad (3.22)$$

gde je:

$c$  –potrebna dimenzija ogledala,

$D$  –prečnik svetlosnog snopa,

$\varepsilon$  –upadni ugao zraka na ogledalo.

Veličina ravnog ogledala sa refleksnim slojem na unutrašnjoj površini (slika 3.4), određuje se formulom

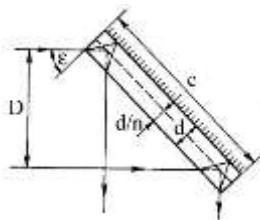
$$c = \frac{D}{\cos \varepsilon} + 2 \cdot \frac{d}{n} \cdot \tan \varepsilon, \quad (3.23)$$

gde je:

$d$  –debljina planparalelne ploče na koju je nanet refleksni sloj,

$n$  –indeks prelamanja materijala planparalelne ploče,

$\frac{d}{n}$  –redukovana debljina planparalelne ploče.



Slika 3.4. Određivanje dimenzija ravnog ogledala

Za kvalitetne refleksne slojeve primenjuju se: srebro, aluminijum, hrom i zlato.

### 3.4 Prizma

Prizma je optički element sa ravnim poliranim stranicama, postavljenim pod određenim uglom. Postoji nekoliko tipova prizmi:

- refleksione prizme, koje se primenjuju za promenu pravca prostiranja zraka u instrumentima, promenu pravca optičke ose i za obrtanje lika,
- prizme za otklon, koje služe da podele svetlosni snop na dve ili više komponenti,
- spektralne prizme, koje se primenjuju za dobijanje spektra,
- polarizacione prizme, koje ostvaruju linearnu polarizaciju svetlosti.

Prizme koje se primenjuju u optičkim sistemima mogu da imaju sledeće namene:

- puno ili ogledalno obrtanje lika,
- menjanje pravca ose optičkog sistema,
- sjedinjavanje ili razdvajanje formiranih likova, što se najviše koristi kod mernih instrumenata,
- deljenje upadnog snopa (kod instrumenata sa jednim objektivom, sistem prizama omogućuje delu snopa na dva dela, odnosno, na dva okulara),
- reflektovanje snopa strogo pod  $180^\circ$ , nezavisno od pravca upadnog snopa na površinu prizme,
- panoramsko osmatranje bez okretanja posmatrača,
- promena rastojanja optičkih osa kod binokularnih uređaja,
- izoštravanje lika koje se postiže raster prizmom Fresnela, ili ekranom sa prizmenim rasterom,
- razlaganje svetlosti u spektralnim uređajima.

Refleksione prizme u principu rešavaju iste zadatke kao i ravna ogledala. One imaju sledeće prednosti nad sistemom ogledala:

- ugao između stranica prizme je nepromenljiv, dok se ugao između ogledala mora stalno podešavati,
- prizma je konstruktivno prostiji element,
- kod prizme nema gubitaka usled odbijanja svetlosti, kada je ispunjen uslov totalne refleksije.

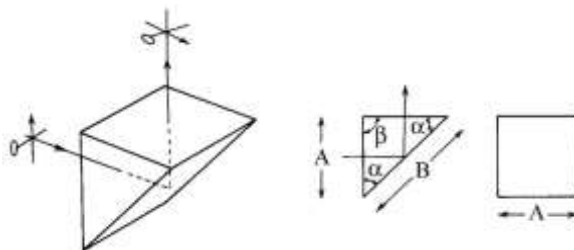
Nedostaci obrtnih sistema od prizama u odnosu na ogledala su:

- prizmeni obrtni sistemi uvode aberacije u optički sistem dok ogledalski obrtni sistemi ne uvode aberacije,
- prizmeni obrtni sistemi imaju veću masu od odgovarajućih ogledalskih obrtnih sistema.

Prizma ne sme narušavati simetriju centriranih optičkih sistema. Da bi to ispunila, prizma mora da se u optičkom sistemu ponaša kao kombinacija planparalelne ploče i sistema ravnih ogledala, čiji je broj jednak broju refleksionih stranica prizme.

Svaka refleksiona prizma se može napraviti sa krovom ili bez krova. Krov nastaje kada se na refleksnoj površini napravi ugao od  $90^\circ$ .

Jedna od najčešće korišćenih prizama u optičkom sistemu je pravougaona prizma, koja je prikazana na slici 3.5. Njena osnovna uloga je da skrene snop zraka za  $90^\circ$ . Druga uloga se postiže, ako se pravougaona prizma postavi ispred objektiva u paralelni snop svetlosti. Tada se može omogućiti panoramsko posmatranje, tj. posmatranje u krugu od  $360^\circ$ , bez okretanja glave posmatrača, tako što se pravougaona prizma obrće oko svoje ose. Pravougaonu prizmu može da zameni ravno ogledalo, i obrnuto, svako ravno ogledalo može biti zamenjeno pravouglom prizmom.

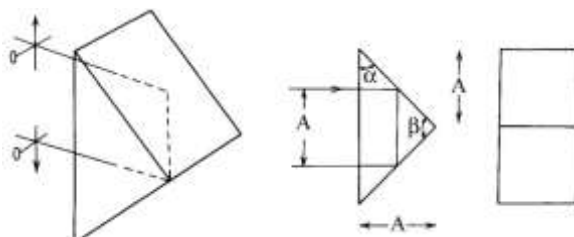


Slika 3.5. Pravougaona prizma  
Preuzeto iz [16]

Osnovni podaci za proračun pravougaone prizme su:

$$\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ, B = A \cdot \sqrt{2}, k = 1, d = k \cdot A.$$

Druga pravougaona prizma koja se često primenjuje, prikazana je na slici 3.6. Za razliku od prethodne pravougaone prizme, kod nje zraci ulaze kroz hipotenuzu i izlaze sa nje. Ova pravougaona prizma se često zove i prizma sa konstantnim uglom skretanja. Osnovna uloga ove prizme je, da bez obzira pod kojim uglom zraci uđu u prizmu, oni izlaze paralelni sa ulaznim zracima i pomereni za rastojanje  $A$ . To se postiže pomoću dve refleksije na katetama prizme.



Slika 3.6. Pravougaona prizma  
Preuzeto iz [16]

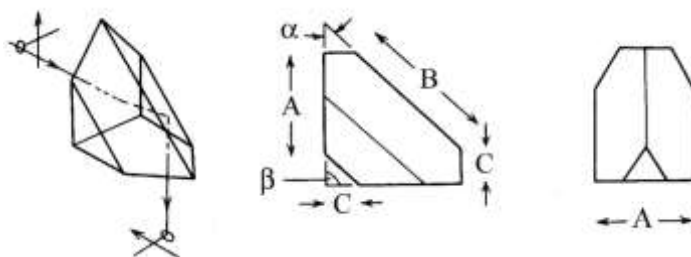
Osnovni podaci za proračun pravougaone prizme su:

$$\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ, k = 2, d = k \cdot A.$$

Pravougaona prizma sa krovom, prikazana na slici 3.7, je najjednostavnija prizma koja omogućava potpuno obrtanje lika i njegovo skretanje za  $90^\circ$ . Kod nišanskih sprava ona može da posluži kao najjednostavniji obrtni sistem. Krov na ovoj prizmi nastaje kada se hipotenuza, koja



je refleksna površina, zameni sa dve refleksne površine pod uglom od  $90^\circ$ . Pravougaona prizma sa krovom, u literaturi se često označava i kao Amici prizma.



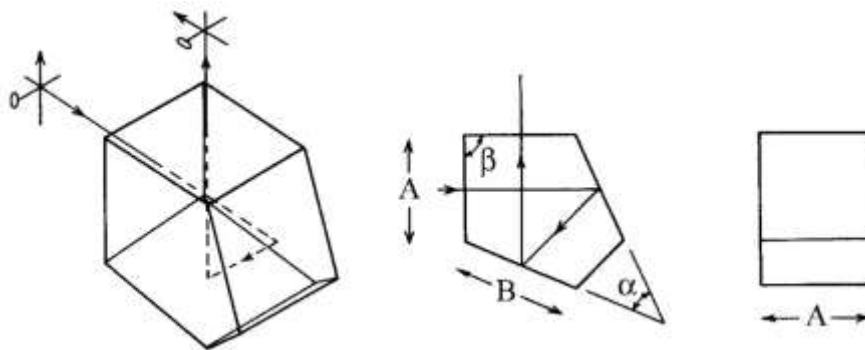
Slika 3.7. Pravougaona prizma sa krovom  
Preuzeto iz [16]

Osnovni podaci za proračun pravougaone prizme sa krovom su:

$$\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ, B = A \cdot \sqrt{2}, C = \frac{A}{\sqrt{8}}, k = 1.707, d = k \cdot A.$$

Kao što se sa slike 3.7 može videti, u praksi je uobičajeno da se pravougaona prizma sa krovom proizvodi sa odsečenim krajevima, da bi se smanjile veličina i težina prizme. Krov sa uglom od  $90^\circ$  mora se napraviti sa visokom tačnošću. Ako postoji greška u uglu krova, upadni snop zraka se deli na dva snopa zraka, koji divergiraju. Veličina ugla divergencije izlaznih snopova zraka je šest puta veća od ugla greške, koja nastaje prilikom izrade ugla krova. Zbog toga, da bi se izbeglo primetno dupliranje lika, ugao krova na prizmi se pravi sa tačnošću od 1 do 2 lučne sekunde.

Penta prizma, prikazana na slici 3.8, služi za skretanje snopa zraka za tačno  $90^\circ$ . Ona ima važnu osobinu da skreće nišansku liniju za isti ugao, bez obzira na orijentaciju nišanske linije. Penta prizma formira uspravan lik.

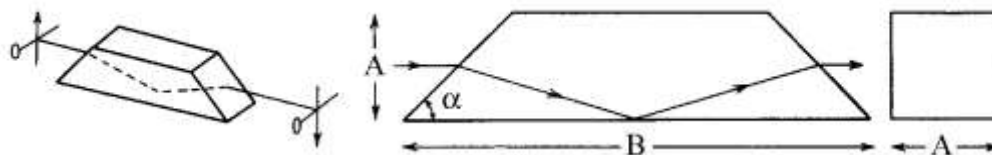


Slika 3.8. Penta prizma  
Preuzeto iz [16]

Osnovni podaci za proračun Penta prizme su:

$$\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ, B = 1.0824 \cdot A, k = 3.4142, d = k \cdot A.$$

Dove prizma je prikazana na slici 3.9. Ona skoro isključivo radi u paralelnom snopu svetlosti i tada formira ogledalski lik. Interesantna osobina Dove prizme je, da kada se ona okreće oko uzdužne ose, lik koji formira Dove prizma, se okreće sa dva puta većom brzinom od brzine okretanja prizme. Ova osobina Dove prizme se koristi prilikom konstrukcije panoramskih nišana.

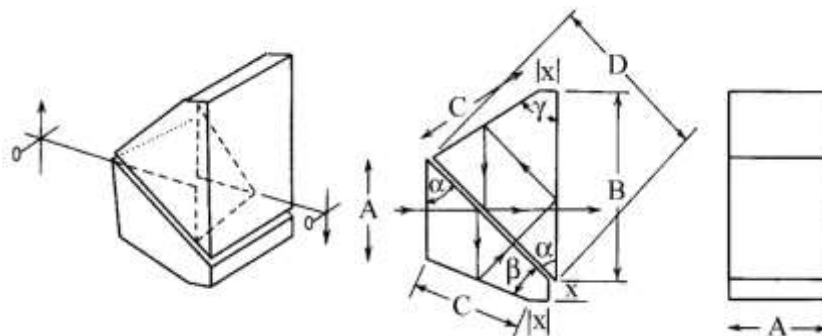


Slika 3.9. Dove prizma  
Preuzeto iz [16]

Osnovni podaci za proračun Dove prizme su:

$$\alpha = 45^\circ, B = 4.2271 \cdot A, k = 3.3787, d = k \cdot A.$$

Pechanova prizma je prikazana na slici 3.10. Pechanova prizma je, ustvari, sistem od dve prizme, ima sličnu namenu kao Dove prizma, samo što omogućava rad i u neparalelnom snopu svetlosti. Pechanova prizma formira ogledalski lik, a ako bi joj se dodao krov, tada bi ona mogla da postane obrtni sistem. Glavna karakteristika Pechanove prizme je kompaktna konstrukcija i velika optička dužina puta kroz prizmu.



Slika 3.10. Pechanova prizma  
Preuzeto iz [16]

Osnovni podaci za proračun Pechanove prizme su:

$$\alpha = 45^\circ, \beta = 22.5^\circ, \gamma = 67.5^\circ$$

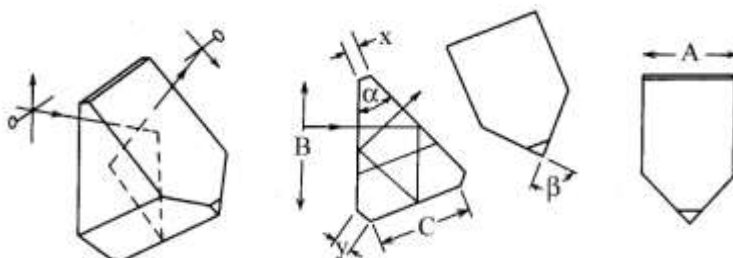
$$B = 1.8284 \cdot A, C = 1.0824 \cdot A, x = 0.2071 \cdot A, L = 1.2071 \cdot A, k = 4.6213, d = k \cdot A.$$

Schmidtova prizma je prikazana na slici 3.11 i služi za skretanje zraka za  $45^\circ$ . Ona se koristi u sistemima kod kojih optička osa treba da bude skrenuta za  $45^\circ$ . U nišanskim spravama se koristi verzija Schmidtove prizme sa krovom, koja pored skretanja optičke ose za  $45^\circ$ , služi i kao obrtni sistem.

Osnovni podaci za proračun Schmidtove prizme sa krovom su:

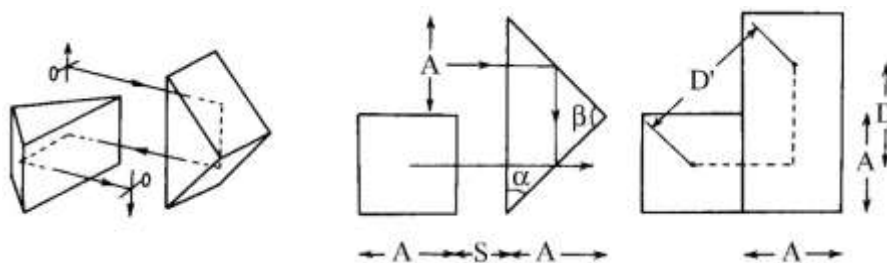
$$\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ, B = 1.4142 \cdot A, C = 1.0824 \cdot A$$

$$x = 0.1 \cdot A \text{ (proizvoljno)}, y = 1.8478 \cdot x = 0.1848 \cdot A, k = 3.4142, d = k \cdot A.$$



Slika 3.11. Schmidtova prizma sa krovom  
Preuzeto iz [16]

Porro sistem I reda prikazan na slici 3.12, sastoji se od dve pravougaone prizme, koje se nalaze pod uglom od  $90^\circ$ . Prva prizma obrće lik odozgo nadole, dok druga prizma obrće lik s leva na desno. Optička osa se poprečno pomera, ali se ne zaokreće. Porro sistem I reda je jedan od najjednostavnijih obrtnih sistema za proizvodnju.

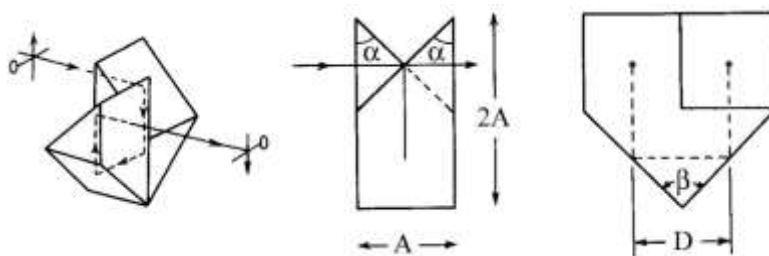


Slika 3.12. Porro sistem I reda  
Preuzeto iz [16]

Osnovni podaci za proračun Porro sistema I reda su:

$$\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ, D = A, D' = A \cdot \sqrt{2}, k = 4, d = k \cdot A.$$

Porro sistem II reda prikazan na slici 3.13, sastoji se od tri pravougaone prizme. On ima istu namenu kao i Porro sistem I reda, s tim da ima nešto kompaktniju konstrukciju. Dve manje pravougaone prizme se mogu zalepiti za hipotenuzu treće pravougaone prizme.



Slika 3.13. Porro sistem II reda  
Preuzeto iz [16]

Osnovni podaci za proračun Porro sistema II reda su:

$$\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ, D = A, k = 4, d = k \cdot A.$$