

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet

Helena Prović
**GRAFIČKI POSTUPCI ANALIZE
RAVNINSKIH REŠETKASTIH
NOSAČA
(ZAVRŠNI RAD)**

Zagreb, 2010.

Sadržaj

1. Uvod	2
2. Rešetkasti nosači	3
3. Grafičke metode određivanja sila rešetkastih nosača	6
3.1. Elementarna pravila koja vrijede općenito za rešetkaste nosače	6
3.2. Metoda čvorova	7
3.3. Maxwell Cremonin plan sila	8
3.4. Metode presjeka	18
3.5. Culmannova metoda	18
3.6. Ritterova metoda	20
4. Grafičko određivanje pomaka rešetkastih nosača	24
4.1. Williotov plan pomaka	24
4.2. Pomaci konzolnog rešetkastog nosača	25
4.3. Pomaci grednih rešetkastih nosača	26
5. Primjer	28
5.1. Maxwell –Cremonin plan sila	29
5.2. Ritterova metoda	31
5.3. Culmannova metoda	33
5.4. Williotov plan pomaka	34
6. Zaključak	36
7. Literatura	37

1. UVOD

U ovom ćemo radu obraditi statički određene rešetkaste nosače, grafičko određivanje sila u štapovima te crtanje pomaka čvorova tih nosača.

Uz opću metodu čvorova, kod grafičkog određivanja sila u rešetkastim nosačima, posebno ćemo proučiti određivanje sila pomoću Maxwell Cremoninog plana sila. To je postupak kojeg je 1864. godine pronašao engleski fizičar J.C. Maxwell, a detaljno ga je razradio profesor politehnike u Milanu L. Cremona 1872. godine. U kontinentalnom dijelu Europe taj postupak određivanja sila u štapovima rešetkastih nosača obično se naziva Cremoninim planom sila.

Proučit ćemo rješavanje rešetkastih nosača pomoću metoda presjeka, odnosno u prvom planu bit će Culmannov postupak, a spomenut ćemo još i Ritterovu metodu, jer iako je ona u osnovi analitička, najčešće je u primjeni kao grafoanalitička.

Na kraju ćemo odrediti i pomake rešetkastih nosača primjenom grafičke metode Williotovog plana.

U prvom dijelu rada slijedi teorijska obrada načina rješavanja rešetkastih nosača te pravila konstruiranja Williotovog plana pomaka. U drugom dijelu rada slijedi primjer rješavanja i crtanja rešetkastog nosača za koji ćemo prvo nacrtati Maxwell-Cremonin plan sila, a zatim tako dobivena rješenja provjeriti Ritterovom i Culmannovom metodom. Za kraj ćemo nacrtati Williotov plan pomaka.

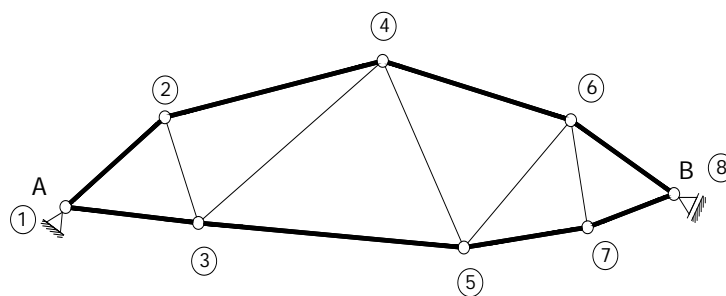
2. REŠETKASTI NOSAČI

U ovom dijelu definirat ćemo neke osnovne pojmove vezane uz rešetkaste nosače, počevši od definicije rešetkastih nosača do osnovnih prepostavki koje je potrebno utvrditi prije nego što se počne s određivanjem vanjskih i sila u štapovima takvih nosača, te njihovim pomacima. Važno je pri tome napomenuti da ćemo se baviti samo ravninskim sustavima i nećemo ulaziti u problematiku prostornih sistema.

Rešetkasti nosači su konstrukcijski sistemi koji su sastavljeni od dovoljnog broja ispravno raspoređenih, međusobno zglobno spojenih štapova, s dovoljnim brojem vanjskih veza. Pri tome se prepostavlja da su ti štapovi pravocrtni, konstantnog poprečnog presjeka, a opterećenja su zadana u osi štapa i u čvorovima sustava.

Uz navedene, jedna od osnovnih prepostavki kod statičkog proračuna (kako analitičkog, tako i grafičkog) jest da je rešetkasti konstruktivni sistem geometrijski nepromjenjiv i statički određen, jer se samo takvi sistemi smatraju nosačima. Prije nego što opišemo postupak ispitivanja geometrijske nepromjenjivosti kod ovakvih nosača, definirat ćemo sam pojam. Geometrijska nepromjenjivim sistemima smatramo one kod kojih može doći do pomaka samo zbog deformacije elemenata. Ispitivanje se može provesti statičkim i kinematičkim metodama.

Kako bi se došlo do nužnog uvjeta geometrijske nepromjenjivosti rešetkastog diska polazi se od najjednostavnije strukture rešetkastog diska. Osnovna geometrijski nepromjenjiva figura sastavljena od štapova je trokut koji se sastoji od tri čvora i tri štapa. Počevši od te figure postupnim spajanjem svakog dodatnog čvora s dvama štapovima dolazi se do geometrijski nepromjenjivog rešetkastog diska. Na slici 1. prikazano je konstruiranje jednog takvog diska: na osnovnu figuru, trokut 1,2,3 prvo se s dva štapa priključio čvor 4, te daljnim postupnim dodavanjem čvorova 5,6,7 i 8 i njihovim vezivanjem dobiva se rešetkasti disk.



Slika 1.

Ako se sa n_s označi broj štapova u rešetki, a sa $n_č$ broj čvorova, tada se može dobiti izraz za broj štapova koji je dovoljan da bi opisana konstrukcija rešetkastog diska bila geometrijski nepromjenjiva. Dakle, slijedi:

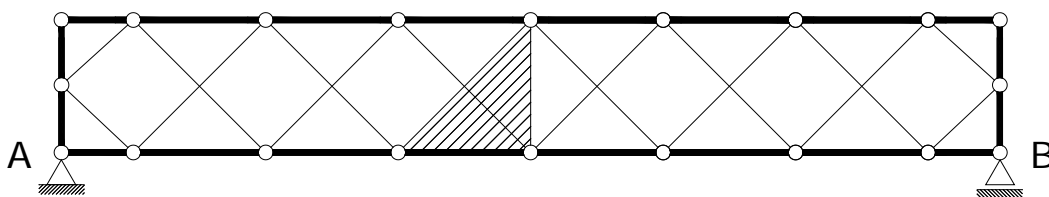
$$n_s = 3 + (n_č - 3) \cdot 2 = 2n_č - 3$$

Da bi ta rešetka postala rešetkastim nosačem, potrebno je dodati tri vanjske veze. Ako te veze pretvorimo u tri štapa slijedi:

$$n_s = 2n_c.$$

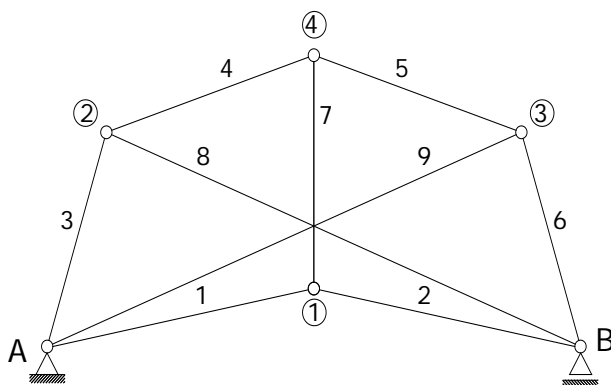
Zaključujemo kako je za geometrijsku i statičku određenost rešetkastog konstruktivnog sistema nužno imati dvostruko više štapova od broja čvorova.

Opisali smo najjednostavniji slučaj kada je rešetkasti nosač sastavljen od elementarnih geometrijskih nepromjenjivih figura tj. trokuta. No, ako i diskovi nisu na prvi pogled sastavljeni od trokuta, može se analognim postupkom dokazati geometrijska nepromjenjivost diska, odnosno konstruktivnog sistema. Na primjeru sistema prikazanog na slici 2 postoji polazni trokut od kojeg može početi konstrukcija postupnim dodavanjem čvorova vezivanjem s po dva štapa koji ne leže na istom pravcu.



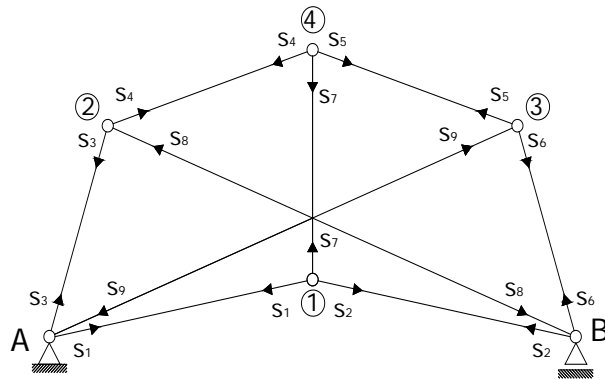
Slika 2.

Moguć je i treći, mnogo složeniji slučaj, kada se opisanim postupkom ne može dokazati da li se radi o geometrijski nepromjenjivom konstruktivnom sistemu, jer nije sastavljen od trokuta, a nema ni osnovnog trokuta od kojeg bi se moglo krenuti. Kao primjer uzimamo sustav na slici 3.



Slika 3.

Kod ispitivanja nepromjenjivosti ovakvog sistema poslužit ćemo se jednom od statičkih metoda, tj. metodom nultog opterećenja. Najprije ćemo formulirati tu metodu: Ako je u statički određenom konstruktivnom sistemu na koji ne djeluje opterećenje trivijalno rješenje jedino moguće, tada je sustav geometrijski nepromjenjiv; u suprotnom, kada su moguća i druga rješenja, sistem je geometrijski promjenjiv.



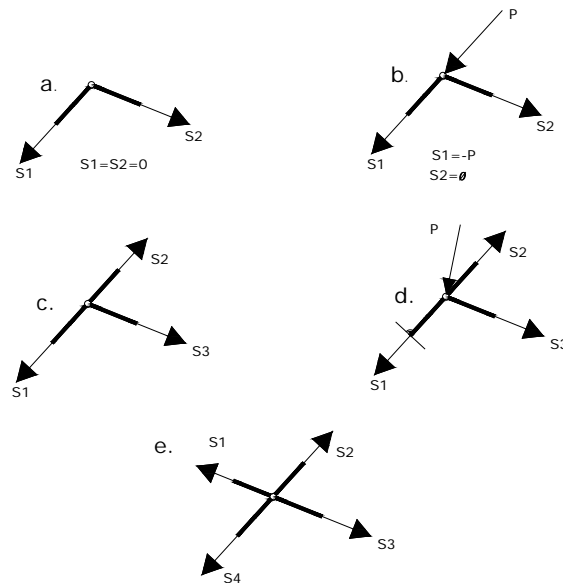
Slika 4.

Ispitivanje nepromjenjivosti započinjemo tako da prepostavimo da postoji sila u štapu 7 bilo koje veličine i krećemo od čvora 1 uspostavljanjem ravnoteže u istom, te na taj način dobivamo sile S_1 i S_2 u štapovima 1 i 2 kao što je prikazano na slici 4. Postupak nastavljamo obilazeći čvorove A, 2 s lijeve strane, odnosno B, 3 s desne strane i rješavajući uvjete ravnoteže u njima. Kada dođemo konačno do čvora 4, svi su smjerovi sila već određeni (S_4, S_5, S_7). Vidimo da u vertikalnom pravcu sve tri sile imaju isti smisao. Zaključujemo da se ravnotežni uvjet može zadovoljiti samo ako su sve tri sile u čvoru jednake nuli. Kako je trivijalno rješenje ovakvog sistema i jedino moguće, zaključujemo da je sustav geometrijski nepromjenjiv. Drugim riječima, nemoguće je postojanje unutarnjih sila bez vanjskog opterećenja.

3. GRAFIČKE METODE ODREĐIVANJA SILA U REŠETKASTIM NOSAČIMA

3.1. Elementarna pravila koja vrijede općenito za rešetkaste nosače

Prije nego nastavimo s metodama grafičkog određivanja sila, korisno je navesti neka elementarna pravila koja bitno mogu pojednostaviti postupak određivanja sila u štapovima rešetkastih nosača:



Slika 5.

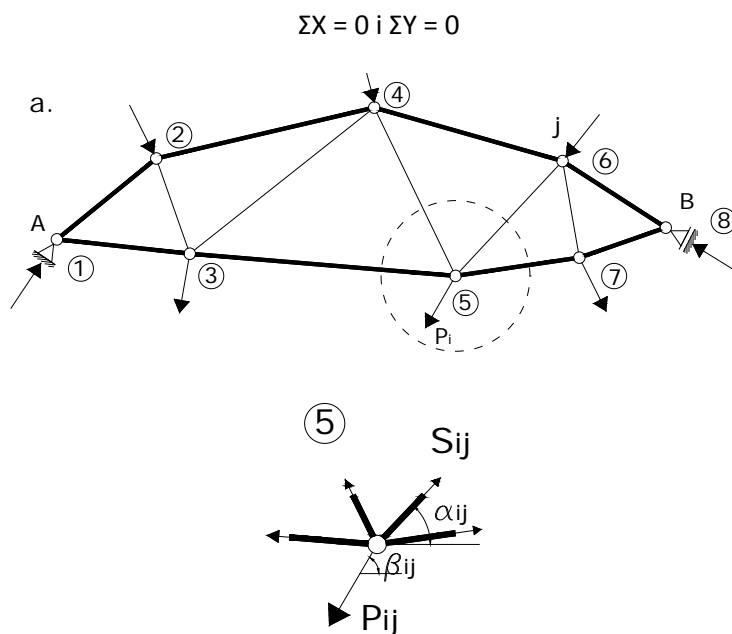
- Ako na čvor u kojem se sastaju dva štapa ne djeluje vanjsko opterećenje, tada su sile u tim štapovima jednake nuli (slika 5 a).
- Ako na čvor u kojem se sastaju dva štapa djeluje sila u pravcu koji se poklapa s jednim od štapa, sila u drugom štapu jednaka je nuli (slika 5 b).
- Ako se u čvoru na koji ne djeluje vanjsko opterećenje sastaju tri štapa od kojih dva leže na istom pravcu, tada je sila u trećem jednaka nuli (slika 5 c).
- Ako na čvor u kojem se sastaju tri štapa od kojih dva leže na istom pravcu djeluje vanjsko opterećenje, sila u trećem pravcu može se odrediti iz zbroja projekcija na os okomitu na pravac na kojem leže dva štapa (slika 5 d).
- Ako postoji neopterećeni čvor u kojem se sastaju četiri štapa od kojih po dva leže na istom pravcu, onda su sile u štapovima koji leže na istom pravcu međusobno jednake (slika 5 e).

3. 2. Metoda čvorova

Ova metoda se naziva još i metodom izrezivanja čvorova ili metodom ravnoteže čvorova. Prema toj metodi čvorovi se izrezuju iz rešetkastog nosača, odnosno, zamišlja se da se to uradilo, pa se postavljaju uvjeti ravnoteže. To uravnoteženje moguće je provoditi grafičkim i analitičkim postupcima, no mi ćemo se zadržati na grafičkim metodama. Određivanje sila u rešetkastom nosaču metodom čvorova moguća su na dva načina:

1. krećući se nekim unaprijed određenim redosljedom od čvora do čvora, crtajući poligone sila neovisno,
2. jedinstvenim planom u kojem se svaka sila pojavljuje jedanput, odnosno Maxwell Cremoninim planom sila.

Važno je napomenuti da se u jednom čvoru mogu postaviti najviše dvije jednadžbe ravnoteže u obliku zbroja projekcija svih sila koje djeluju na dvije neparalelne osi. Najčešće se odabiru horizontalna i vertikalna os i postavljaju se uvjeti ravnoteže :



Slika 6.

Tako za čvor 5 na slici 6 vrijedi:

$$\Sigma S_{ij} \cos \alpha_{ij} = P_i \cos \beta_i$$

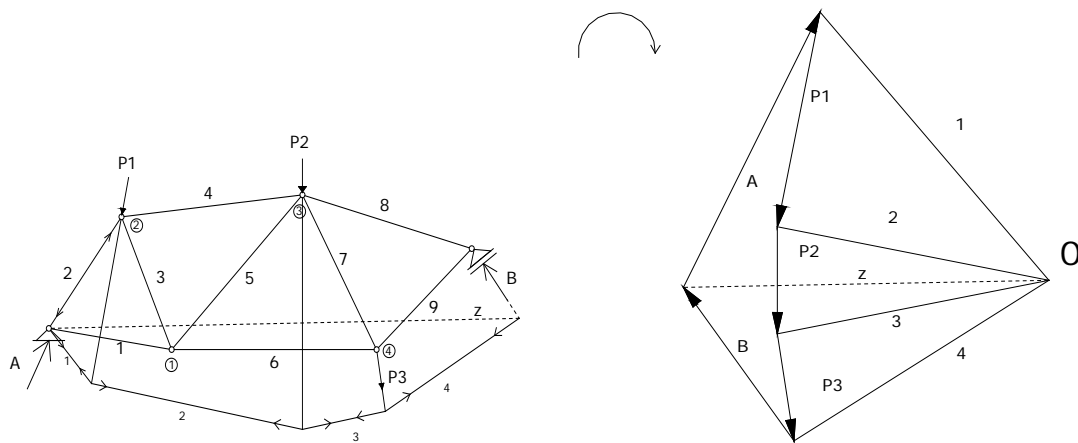
$$\Sigma S_{ij} \sin \alpha_{ij} = P_i \sin \beta_i$$

Zaključujemo da je broj nepoznanica u tako postavljenim jednadžbama jednak broju štapova koji su priključeni u čvor, pa kako se u jednom čvoru mogu postaviti najviše dvije jednadžbe ravnoteže, zaključujemo da ćemo postupak rješavanja rešetkastih nosača (kako grafičkog, tako i analitičkog) započeti u onom čvoru u kojem se sastaju dva štapa (ili veći broj štapova uz uvjet da su u najviše dva štapa sile nepoznate) jer će u tom slučaju broj nepoznanica biti jednak broju jednadžbi. Sljedeći čvor u kojem postavljamo jednadžbe ravnoteže jest onaj u kojem su nepoznate dvije sile u priključenim štapovima. Na taj način dobivamo jednoznačno rješiv sustav jednadžbi. Na slici 6 tako bi smo postupak određivanja sila u rešetkastom nosaču započeli u čvoru 1 ili 8, uz uvjet da smo ranije odredili reakcije koje se javljaju u ležajevima A i B. Čvorovi u rešetki na slici 7 označeni su redosljedom kako bi se i rješavali kada bi se postupak uravnotežavanja započeo u čvoru 1. Tada bi kod grafičkog rješavanja morali za svaki čvor crtati zaseban poligon, što bi značilo da bi se sila u svakom štapu pojavljivala u dva poligona. Takva je grafička konstrukcija neprikladna i nepregledna, pa se javlja veća mogućnost gomilanja pogrešaka.

3.3. Maxwell Cremonin plan sila

Ovaj postupak spada također u metode čvorova, ali za razliku od već spomenutog načina određivanja sila u čvorovima u kojem se svaka sila pojavljuje dva puta, kod Maxwell-Cremoninovog plana sila svi se čvorovi slažu u jedinstveni plan u kojem se svaka sila pojavljuje jedanput, pa je na taj način manje podložan greškama.

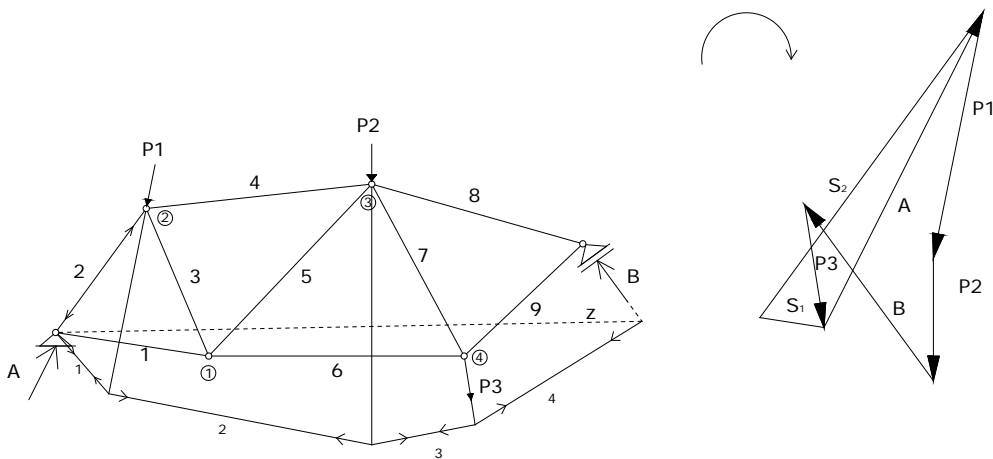
Proučit ćemo detaljnije M-C postupak na primjeru rešetkastog nosača sa slike 7. Rešetkasti je nosač opterećen vanjskim aktivnim silama P_1 do P_3 u čvorovima 2,3,4. Za početak potrebno je odrediti reakcije. Kako je čitav postupak grafički i reakcije se određuju grafički, pomoću verižnoga poligona (slika 7).



Slika 7.

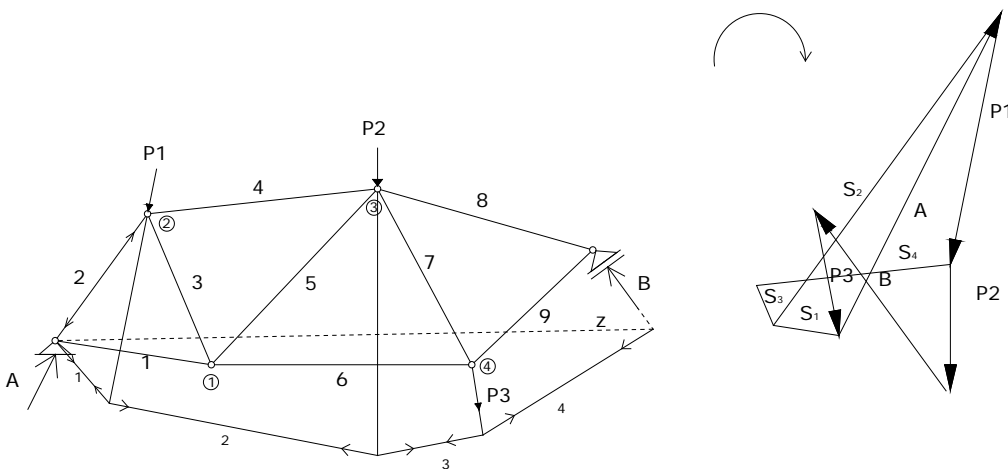
Nakon što smo odredili reakcije, poligon vanjskih sila treba konstruirati tako da je redosljed sila u njemu onakav kakav je redosljed kojim se nailazi na te sile ako se oko rešetke obilazi u unaprijed odabranom smislu, jer će se taj smisao zadržati do kraja konstrukcije M-C plana sila. Preporučljivo je na slici označiti taj smisao. U promatranom primjeru odabran je smisao vrtnje kazaljke na satu, pa je u redosljed vanjskih sila u poligonu: A , P_1 , P_2 , B , P_3 (slika 8).

Kada smo ispravno raporedili sile u poligonu, tražimo čvor u kojem se sastaju dva štapa, kako bi smo odredili sile u njima. Takvi su čvorovi A i B . Započinjemo uravnoteženjem čvora A silama S_1 i S_2 . Znamo iznos i smjer sile A i smjerove sila S_1 i S_2 te možemo zatvoriti poligon sila (slika 8).



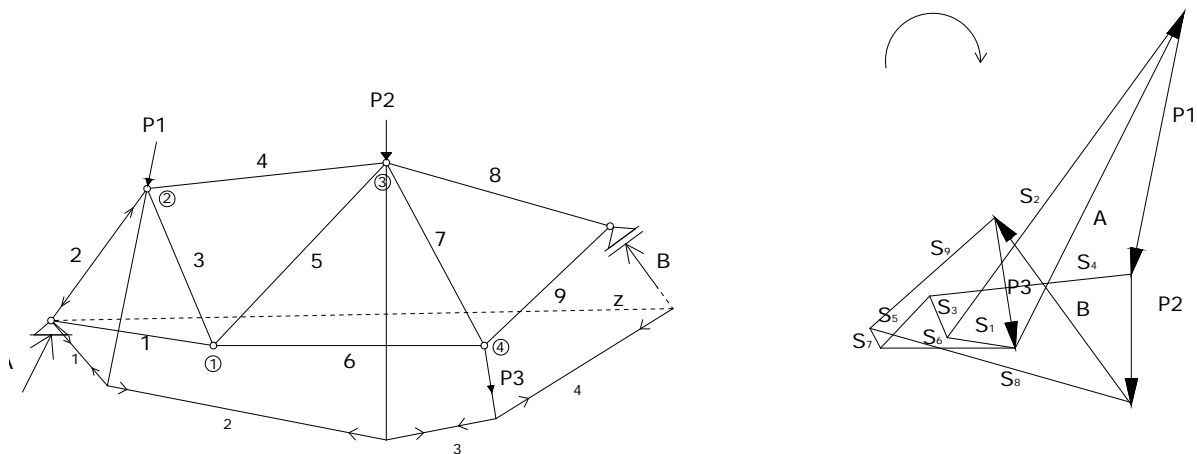
Slika 8.

Kada su određene sile u štapovima S_1 i S_2 , prelazi se na čvor 2 u kojem su sada nepoznate sile u štapovima 3 i 4, jer je sila u štapu 2 određena iz prethodno uravnoteženog čvora. Postupak je identičan kao i u prethodnom čvoru. Polazeći od štapa 2, odnosno sile S_2 , jer je to prva poznata sila na koju se nailazi ako se obilazi oko čvora u smislu kazaljke na satu (unaprijed odabrani smisao) uravnotežuje se čvor 2 i dobivaju se preostale dvije nepoznate sile u štapovima tog čvora (S_3 i S_4) iz četverokuta sile; P_1 , S_4 , S_3 , S_2 (slika 9).



Slika 9.

Sljedeći čvor za koji se konstrira poligon sila je čvor 1. Iz tog poligona dobiju se sile u štapovima 5 i 6 (S_5 , S_6) jer su sile S_1 i S_3 dobivene iz prethodno uravnoteženih čvorova. Dalje se može nastaviti konstruiranje poligona sila za čvor 3 i zatim za čvor 4. Na kraju će se pokazati je li grafička konstrukcija ispravno provedena, kad se dođe do čvora B (ležaj). Kako se u tom čvoru sastaju tri sile (B , S_9 i S_8) koje su prethodno određene – reakcija B pomoću veržnog poligona, a sile S_9 i S_8 iz ravnoteže čvorova- te tri sile moraju zatvarati trokut sila. Na slici 10 prikazana je konačna konstrukcija M-C plana sila.



Slika 10.

Ako se dogodi da prethodno određena reakcija i sile u štapovima ne zatvaraju poligon sila, napravljena je pogreška u postupku. Razlog tome jest što se i uz preciznu grafičku konstrukciju, prave sitne greške koje se gomilaju. Mogu se tolerirati ako su u prihvatljivim granicama. Na kraju se umjesto točke kojom se zatvara poligon dobiva trokutić koji nazivamo trokutom pogreške. Ako je taj trokut toliko velik da se ne može pretvoriti u točku bez posljedica na točnost konstrukcije, postupak treba ponoviti. Također je važno napomenuti da se mogućnost pogreške povećava ako se sistem rješava od početka do kraja krećući se samo s jedne strane, naročito kad nosač ima veći broj štapova. Da bi se to u što većoj mjeri izbjeglo, najbolje je postupak provoditi tako da se rješava s obje strane.

Prikazana je grafička konstrukcija Maxwell- Cremonina plana postupnim uravnoteživanjem čvorova u čemu je sadržano i statičko objašnjenje problema. Postoji, međutim, geometrijski odnos između zadanog nosača s opterećenjem i plana sila, pa se zahvaljujući tom odnosu može pojednostaviti konstruiranje Maxwell-Cremonina plana sila. Taj plan je figura recipročna zadanom nosaču s opterećenjem. Uvođenjem nekih dodatnih oznaka na prethodnom primjeru (slika 11) pokušat ćemo objasniti te recipročnosti te odnose koji ih karakteriziraju.

1. Svakom polju rešetkastog nosača odgovara u M-C planu sila jedna točka

U rešetkastom nosaču postoje unutarnja i vanjska polja. Unutarnja su omeđena štapovima rešetke, a vanjska štapovima rešetke i vanjskim silama. Uobičajeno je da se vanjska polja označavaju velikim, a unutarnja malim slovima. Tako je u prethodnom primjeru sa slike 11 unutarnje polje omeđeno sa štapovima 1,2,3, označeno malim slovom a. Isto to polje u M-C planu sila predstavlja točka u kojoj se sijeku sile iz štapova 1,2,3. Polje G je četvorkut kojeg omeđuju sile u štapovima 1 i 6 te pravci djelovanja sile A i P_3 , dakle vanjsko polje, koje u M-C planu predstavlja točku u kojoj se sijeku upravo one sile koje ga omeđuju. Između dva polja u rešetkastom nosaču nalazi se ili štاپ, odnosno sila u štapu ili vanjska sila tako da se u

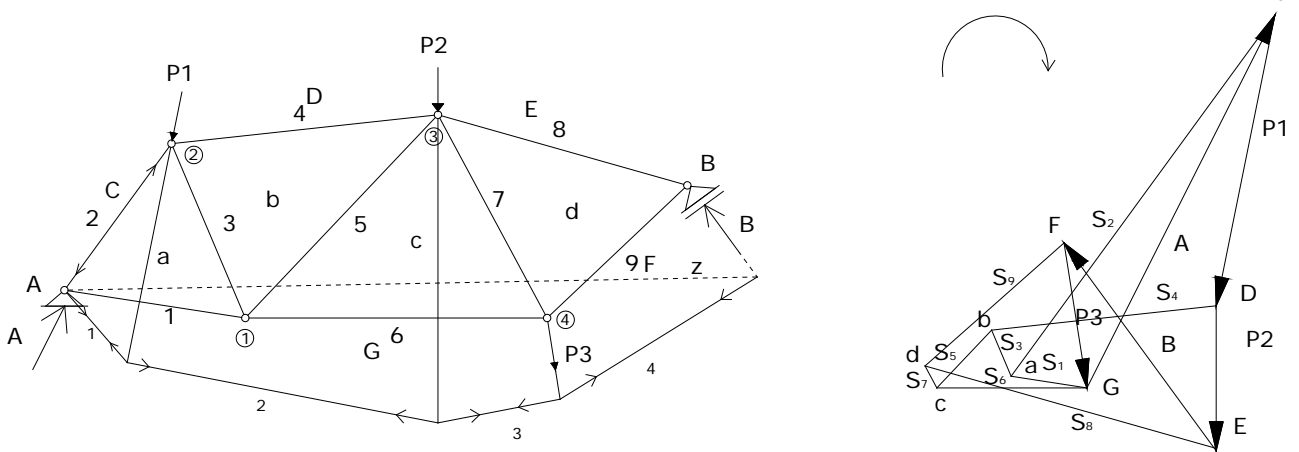
recipročnoj figuri između dvije točke nalazi sila. U M-C planu stoga i nije potrebno još posebno označavati sile, pa čak ni na zadanom nosaču, jer su one obilježene oznakama polja u nosaču, odnosno točkama u planu. Da pojasnimo određivanje predznaka sile u M-C planu promotrit ćemo silu S_3 , koja se nalazi između polja a i b jer ona nailaze tim redosljedom. Naime, polazimo u ranije odabranom smisao (smisao kazaljke na satu) i promatramo čvor 1. Smisao $a \rightarrow b$ iz M-C plana određuje predznak sile u štapu. Strelica ide prema čvoru, što znači da je sila negativna, odnosno tlačna.

Opisani sistem označavanja polja i točaka, a time i sila, uveo je engleski inženjer Bow (Bou) pa je pod imenom Bowov način i poznat.

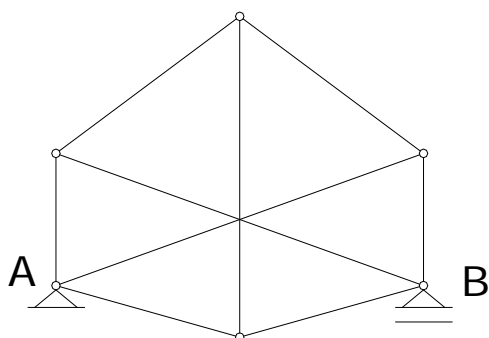
2. Svakoj točki (čvoru) rešetkastog nosača odgovara u Maxwell- Cremoninom planu sila jedno polje, tj. poligon. Stranice poligona recipročne figure paralelne su s pravcima štapova, odnosno sila koje djeluju u čvoru rešetke.

Statički je ovo logično, jer se u svakom čvoru rešetkastog nosača sastaju štapovi čije sile čine uravnoteženi sistem sila zajedno s vanjskim silama koje djeluju na taj čvor.

3. Ako se površina nosača s pripadajućim vanjskim silama može podijeliti na dijelove ograničene pravcima sila, tako da svaka točka koja ne leži na pravcima koji omeđuju polja pripada samo jednom polju, onda je za takav nosač moguće pronaći Maxwell-Cremonin plan sila.

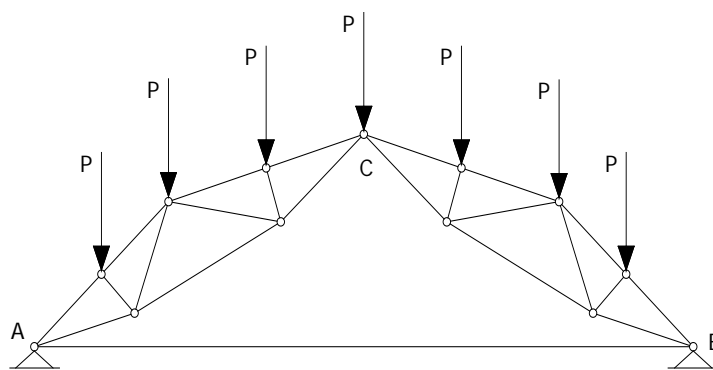


Slika 11.



Slika 12.

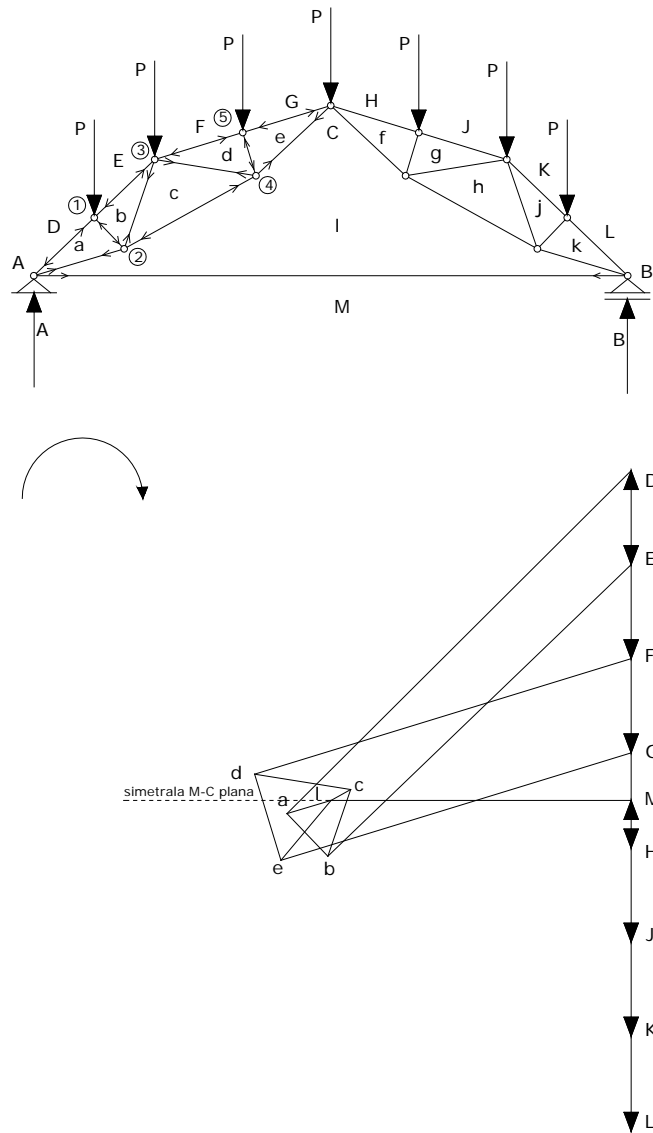
Kao i kod postupka u kojem se rješavanje sila u štapovima započinje u čvoru u kojem se sastaju samo dva štapa, tako je i konstrukcija M-C plana sila moguća samo ako u nosaču postoji takav čvor. Naiđe li se na nosač u kojem nema čvorova s dvije nepoznate sile od kojih bi se moglo krenuti (slika 12) ili se unutar rešetke naiđe na čvor u su nalazi više od dvije sile nepoznate, tada je potrebno ispitati postoji li mogućnost da se uz predhodnu intervenciju ipak primijeni ovaj grafički postupak ili treba na neki drugi način tražiti sile u štapovima.



Slika 13.

Promotrit ćemo rešetkasti nosač na slici 13. Iako na prvi pogled ne postoji čvor od kojeg bismo započeli konstrukciju M-C plana sila, ako zadani nosač promatramo kao sistem sa zategom, iz uvjeta da je moment u zglobu C jednak nuli, možemo izračunati silu u štapu AB, te ju zajedno s vanjskim silama unijeti u poligon.

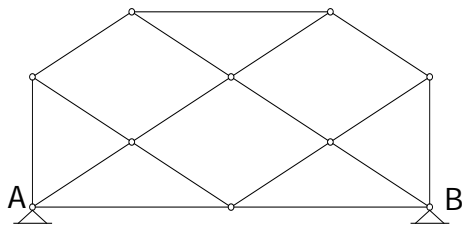
Daljni je postupak konstrukcije M-C plana jednostavan. Idući u smislu kazaljke na satu (odabrani smisao), može se postupno konstruirati recipročna figura. Kako su zadano opterećenje i zadani rešetkasti nosač geometrijski simetrični, M-C plan sila crtati ćemo samo do osi simetrije. Pri tome ćemo maksimalno pojednostaviti postupak, tako da u ovom primjeru, za razliku od prethodnog nećemo označavati sile u štapovima.



Slika 14.

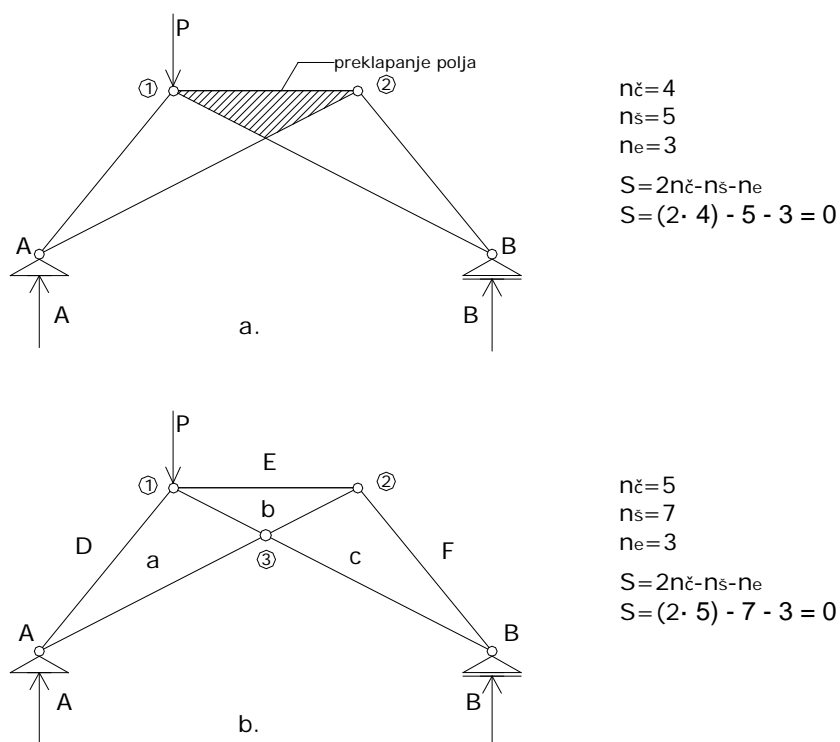
Nakon što smo odredili reakcije u ležajevima i u štapu AB, odabiremo smisao obilaska sila (u našem slučaju u smislu kazaljke na satu) i crtamo poligon sila. Određivanje sila u štapovima započinjemo ili u ležaju A ili B. U našem slučaju krenuli smo od ležaja A. Znamo reakciju i silu u štapu AB koju smo predhodno odredili, tako da ostaju dvije nepoznate sile u dva priključena štapa. Nakon što uravnotežimo taj čvor, prelazimo na čvor 1, i nastavljamo onim redosljedom kojim su čvorovi i označeni. Kada dođemo do polja e na crtežu, lako ćemo provjeriti jesmo li postupak izveli točno. Naime, dvije sile u tom polju već smo odredili uravnotežavajući čvorove 4 i 5, tako da ostaje samo jedna nepoznata sila, pa ako postavimo paralelu s njom na planu sila u točku e (recipročna figura polja e na slici) ona bi trebala zatvarati poligon sila s predhodno određenim silama iz čvora 4.

U predhodnom primjeru promotrili smo slučaj kada se u jednom čvoru sastaju više od dva štapa kod kojeg je moguće nacrtati recipročnu figuru u M-C planu sila, no to nije uvijek slučaj (slika 15).



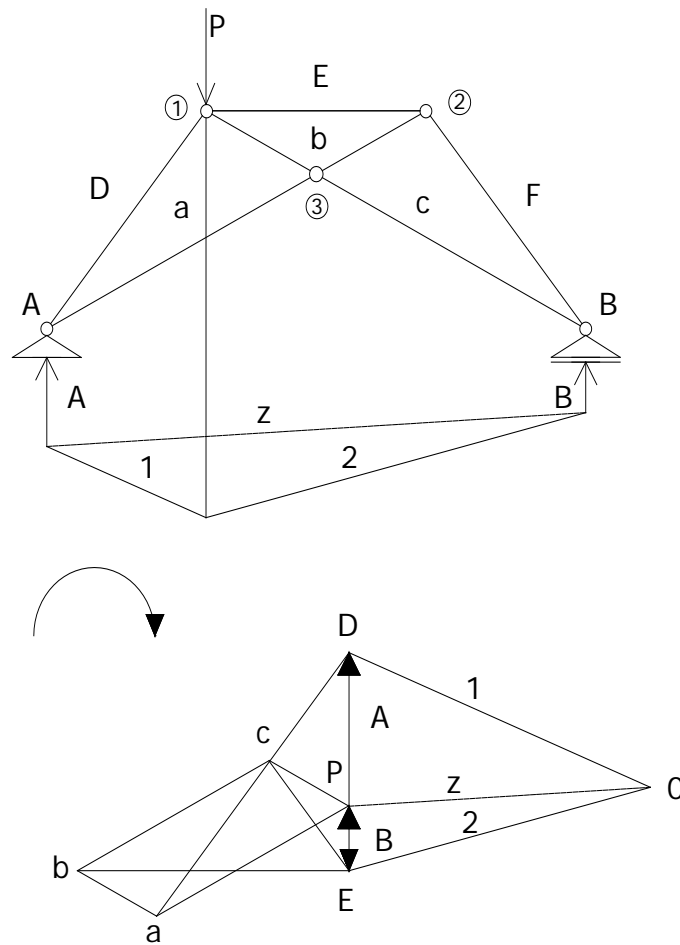
Slika 15.

Također treba razmotriti i slučaj kada na prvi pogled nije moguće konstruirati recipročnu figuru zbog već spomenutog uvjeta da svaka točka koja ne leži na pravicima koji omeđuju polja pripada samo jednom polju, tj. drugim riječima, da je moguće napraviti M-C plan samo za one sisteme kod kojih se polja ne preklapaju. Međutim, ako se križaju samo po dva štapa, može se naći način da se takav nosač pretvori u onaj za koji je moguće nacrtati M-C plan sila. Činjenica je da se sile u štapovima ne mijenjaju ako se pretpostavi da su štاپovi na mjestima križanja prekinuti i međusobno zglobno vezani. Naime, izvršavanjem takve zamjene ne mijenja se geometrijska nepromjenjivost niti statička određenost, jer se ubacivanjem zgloba broj čvorova povećava za jedan, a broj štapova za dva. Takvom zamjenom, koja je prikazana na slici 16, umjesto rešetkastog nosača s ukrštenim štapovima, dobiva se rešetkasti nosač čiji se štاپovi ne križaju i za koji se može nacrtati recipročna figura.



Slika 16.

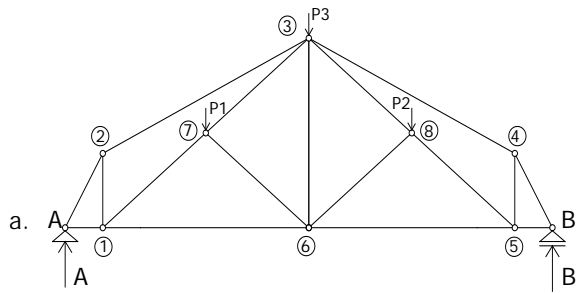
Nakon ubacivanja zgloba, nastavljamo postupak kao što smo to već opisali u prethodna dva primjera i kao što je prikazano na slici 17.



Slika 17.

Potrebno je napomenuti da prekidanje štapova i ubacivanje zglobne veze na mjestima gdje se mimoilaze tri ili više štapova ne može vršiti jer se time mijenja konstrukcijski sistem, odnosno statički određeni sistem postaje neodređen.

Obradit ćemo još jedan primjer nosača kod kojeg su opterećeni unutarnji čvorovi. Naime, na nosaču sa slike 18 unutarnja i vanjska polja se preklapaju, no dodavanjem pomoćnih štapova 7-7' i 8-8' u pravcima djelovanja sila P_1 i P_2 i prepostavljanjem da su stvoreni novi čvorovi 7' i 8' nosač ostaje i dalje statički određen i geometrijski nepromjenjiv.



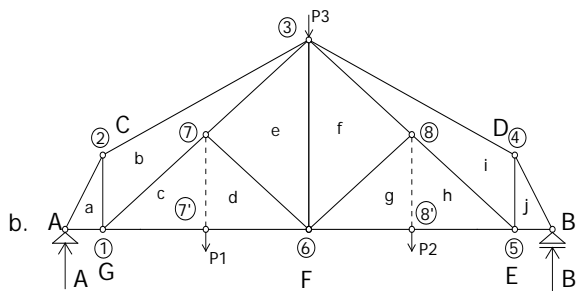
$$n_{\check{c}}=10$$

$$n_s=17$$

$$n_e=3$$

$$S=n_{\check{c}} - n_s - n_e$$

$$S=(2 \cdot 10) - 17 - 3=0$$



$$n_{\check{c}}=12$$

$$n_s=21$$

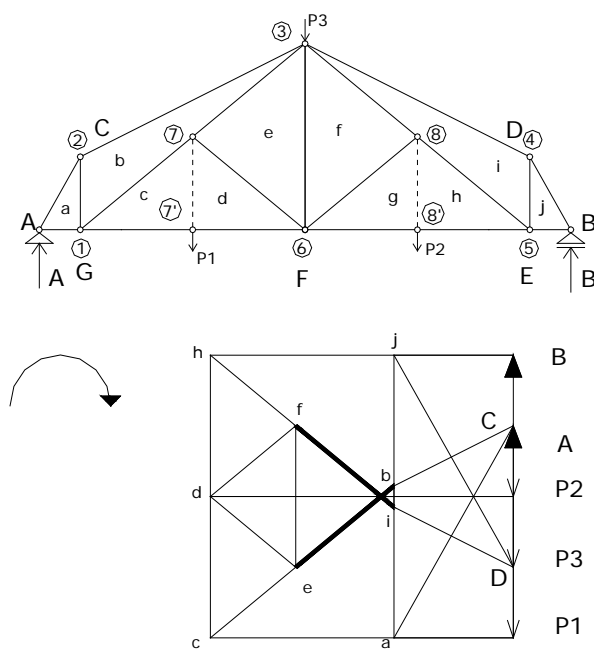
$$n_e=3$$

$$S=n_{\check{c}} - n_s - n_e$$

$$S=(2 \cdot 12) - 21 - 3=0$$

Slika 18.

Na ovakvom, zamjenskom nosaču moguće je odrediti sile u štapovima pomoću M-C plana sila. Jedina je korekcija koju na kraju proračuna treba napraviti da se stavi da su sile u dodanim, pomoćnim štapovima jednake nuli te da štapovi 1-6 i 5-6 nisu podjeljeni u po dva štapa. Crtanje recipročne figure za ovakav nosač prikazan je na slici 19.



Slika 19.

3.4. Metode presjeka

Metode presjeka su metode u kojima presjekom dijelimo nosač na dva djela ili izdvajamo dio nosača, tako da se presijeku najviše tri štapa čiji se pravci ne sjeku u istoj točki. Moguće je presjeći i više štapova, ali među njima samo tri s nepoznatim silama. Kod ove metode određivanja sila u rešetkastim nosačima, jedan se dio nosača promatra, a drugi odbacuje. Promatrani dio mora biti u ravnoteži pod djelovanjem vanjskih sila i sila kojima odbačeni dio djeluje na njega. Razlika kod određivanja unutarnjih sila kod punostjenih i rešetkastih nosača jest ta što se kod rešetkastih nosača umjesto momenta savijanja, poprečne i uzdužne sile u presjeku pojavljuju samo uzdužne sile kao unutarnje sile, koje se jednostavno nazivaju silama u štapovima.

Metode presjeka mogu biti analitičke, grafičke, te grafoanalitičke. Prikladno ih je primjenjivati kada treba odrediti sile samo u nekim štapovima rešetkastog nosača.

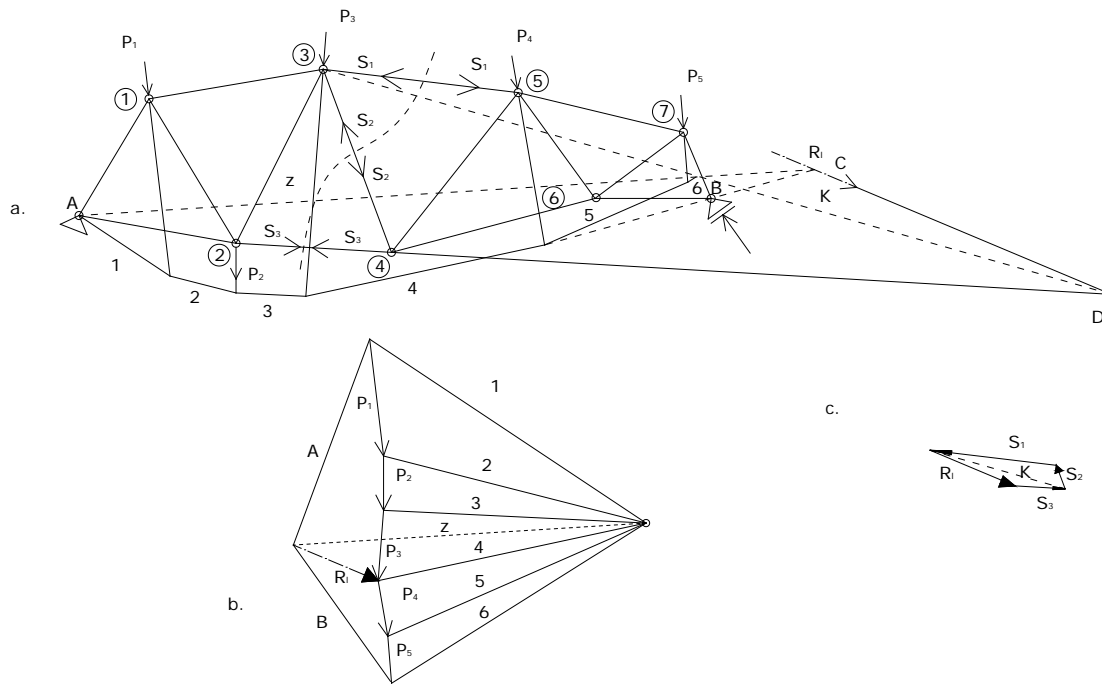
Iz uvjeta ravnoteže u ravnini proizlazi da se iz jednog presjeka mogu odrediti najviše tri sile, pa ako se dogodi da neki presjek ima četiri štapa, zadatak je rješiv ako je u jednom od tih štapova mogla biti prethodno određena sila iz nekog drugog presjeka ili na neki drugi način. Moguć je i slučaj kada se iz presjeka kojim su presječena više od tri štapa mogu odrediti sile u nekim štapovima, a da prethodno ni jedna sila u presječenim štapovima nije određena, ali samo onda kada se svi štapani presjeka, osim jednoga, sijeku u jednoj točki.

3.5. Culmannova metoda

Grafički postupak određivanja sila u štapovima rešetkastih nosača naziva se Culmannovom metodom, a svodi se na rastavljanje sile u tri pravca koji se ne sijeku u jednoj točki. Zapravo se radi o primjeni grafičkog uvjeta ravnoteže četiriju sila. Sile u trima štapovima su nepoznate, a poznata je rezultanta vanjskih sila koje djeluju na promatrani, isječeni dio nosača. Grafički uvjet ravnoteže za četiri sile formuliran je tako da su četiri sile u ravnoteži ako rezultanta dviju sila leži na istom pravcu s rezultantom drugih dviju sila, jednaka je s njom po veličini, a suprotna po smjeru. Taj se pravac naziva još i Culmannovim pravcem.

Culmannov način određivanja sila u štapovima prikazan je na slici 20. Prvo su određene reakcije grafički pomoću verižnog poligona i poligona sila (slika 20 a i b). Odabran je za promatranje lijevi dio nosača, a desni je "odbačen".

Na promatrani (lijevi) dio nosača djeluju vanjske sile A , P_1 , P_2 i P_3 te sile u presječenim štapovima S_1 , S_2 i S_3 , kojima "odbačeni" dio djeluje na promatrani. Kod grafičkog rješavanja nije potrebno pretostaviti pozitivne predznake u sila u štapovima i označavati orijentacije. Treba sačekati konačan rezultat i onda označiti orijentacije i tako dobiti i predznake u sila u štapovima.



Slika 20.

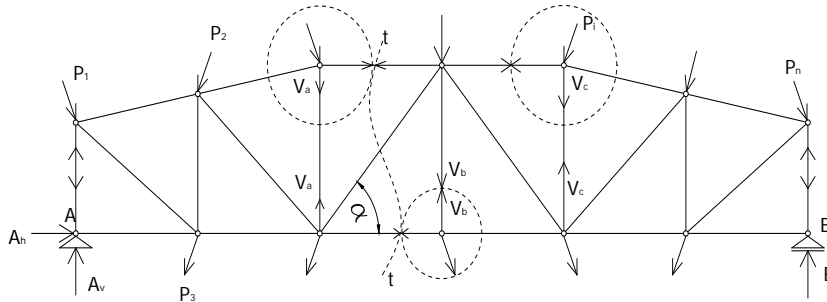
Nakon što smo odredili reakcije, tražimo rezultantu svih sila koje djeluju na lijevi dio i označavamo je sa R_1 . Položaj rezultante određen je pomoću verižnog poligona (slika 20 b). Iz poligona sila vidi se da je rezultanta R_1 rezultanta sila u zrakama z i 4, pa će sila u planu sila (slika 20 a) prolaziti kroz točku u kojoj se sijeku te dvije zrake verižnog poligona (točka C). Tako se došlo do četiri sila koje djeluju na promatrani dio nosača.

Na temelju već rečenog određeno je presjecište pravaca sila R_1 i S_3 i dobivena točka kroz koju prolazi njihova rezultanta (točka D, slika 20 a). Rezultanta sila S_1 i S_2 prolazi kroz točku 3, a kako te dvije rezultante moraju biti u ravnoteži, leže na istom pravcu, pa je time dobiven pravac D-3 na kojem leže rezultante sila R_1 i S_3 te S_1 i S_2 (Culmannov pravac). Taj se pravac označava slovom K. Da bi se dobile sile u štapovima potrebno je konstruirati zatvoreni poligon sila. Bit će to četverokut, jer se radi o četiri sile. Prvo se uravnoteži rezultanta R_1 sa silom S_3 i pravcem K, tako se dobije trokut R_1 , S_3 i K, a zatim se sila K sa suprotnom orijentacijom uravnoteži sa silama S_1 i S_2 .

Tako se sila K poništava i ostaje zatvoreni četverokut iz kojeg se mogu očitati veličine sila u štapovima. Orijentacije sila su dobivene iz poligona sila i preneseni su u plan sila (na štapove). Dobiveno je da je sila S_3 pozitivna (vlačna), dok su sile u ostala dva štapa (S_1 i S_2) negativne (tlačne).

3.5. Ritterova metoda

U ovom dijelu spomenut ćemo Ritterovu metodu, koja je u osnovi analitička, ali najčešće je u primjeni kao grafoanalitička, zbog toga što se neke geometrijske veličine obično ne određuju analitički već se direktno mjere iz nacрта nosača s opterećenjem. Geometrijske veličine do kojih se na taj način dolazi najčešće su krakovi sila. Ova metoda naziva se i metodom momentnih točaka.



Slika 21.

Ukoliko se dogodi da su od triju štapova dva paralelna, nije moguće Ritterovom metodom odrediti silu u trećem štapu, jer se tada Ritterova točka nalazi u beskonačnosti (na presjeku dvaju paralelnih štapova). U takvim slučajevima primjenjuje se metoda projekcija. Primjena te metode prikazana je na nosaču sa slike 21, koji je opterećen u svim čvorovima silama proizvoljnog pravca i smisla djelovanja. Promatran je dio nosača lijevo od presjeka t-t. Sila u dijagonali može se odrediti iz sume projekcija na os y svih sila koje djeluju na promatrani dio nosača. Kad se ta suma postavi, dobiva se:

$$D \sin \alpha + A_V - \sum P_i \sin \beta_i = 0,$$

odnosno:

$$D \sin \alpha = -(A_V - \sum P_i \sin \beta_i).$$

Izraz u zagradi na desnoj strani gornje jednačbe poprečna je sila proste grede istog raspona i opterećenja kao zadani rešetkasti nosač, pa je opći izraz za silu u dijagonali:

$$D_i = \pm \frac{1}{\sin \alpha_i \cdot T_i^\circ}$$

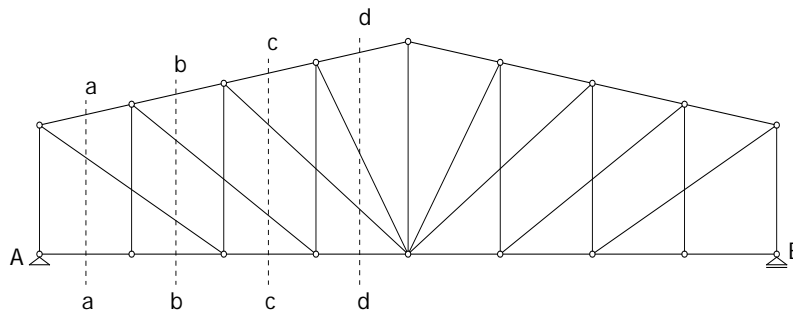
Za promatrani primjer i za silu u dijagonali u odabranom presjeku predznak na desnoj strani je negativan. Ako bi, međutim, presječena dijagonala bila silazna, a ne uzlazna kao što je u odabranom presjeku, predznak na desnoj strani bio bi pozitivan. Zbog toga su u općem izrazu na desnoj strani stavljeni alternativni predznaci. Unutar presječenog polja poprečna je sila konstantna i ne ovisi o mjestu gdje je slučajno naznačen presjek.

Sile u štapovima vertikala (V_a, V_b, V_c) u primjeru na slici 21 ne bi trebalo tražiti niti Ritterovom metodom niti metodom projekcija, iako bi i to bilo moguće nakon prethodnog određivanja sile u četvrtom presječenom štapu. Te sile treba određivati metodom čvorova. Način izrezivanja čvorova prikazan je na slici.

Sile u vertikalama nad ležajevima također bi se određivale iz ravnoteže čvorova, ali to su jednostavni slučajevi kada su u čvoru samo dvije nepoznate sile, a vanjske su projicirane u smjeru štapova.

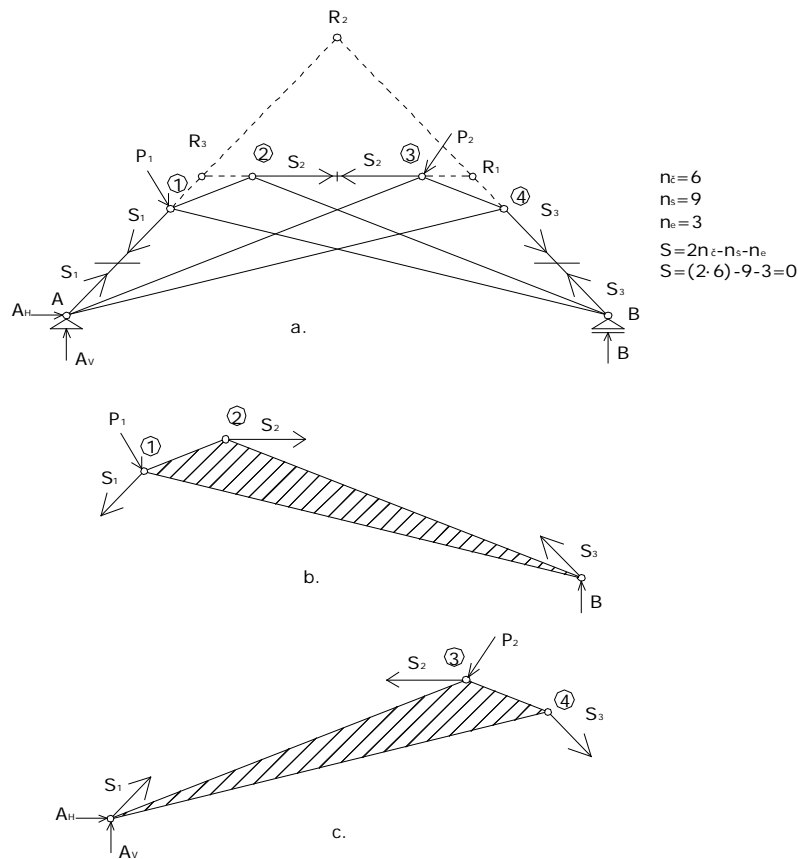
Direktno se dobiva da su te sile jednake vertikalnim komponentama reakcija. U ostalim vertikalama sile bi se trebale odrediti Ritterovom metodom.

Na primjeru sa slike 22, prikazana je mogućnost određivanja sila u nekim štapovima metodom momentnih točaka i kada se ne može napraviti presjek kroz samo tri štapa. U rešetkastom nosaču prikazanom na slici 22 moguće je odrediti silu u štapu gornjeg pojasa presjeka d-d iako su presječena četiri štapa zbog toga što se sva tri preostala štapa sijeku u jednoj točki koja je momentna točka za taj štap. U istom primjeru očito je da se ni jednom metodom presjeka direktno ne mogu odrediti sile u štapovima presjeka b-b i c-c jer su presječena po četiri štapa, a tri od njih se ne sijeku u istoj točki, no ako se krene iz presjeka a-a u kojem je, između ostalog, moguće odrediti i silu u dijagonalnom štapu koja se pojavljuje i u presjeku b-b, lako možemo odrediti preostale sile u presjeku b-b. Nakon određivanja sila u b-b, analogno možemo odrediti sile iz presjeka c-c.



Slika 22.

Primjer na slici 23 posebno je zanimljiv, jer na prvi pogled izgleda da je kod njega nemoguće odrediti sile u štapovima metodom presjeka s obzirom na to da se ne može napraviti presjek kroz tri štapa koji se ne sijeku u jednoj točki niti kroz četiri, a da se tri od njih sijeku sijeku u jednoj točki. Pored toga, kod tog nosača u svim se čvorovima sastaju po tri štapa s nepoznatim silama u njima. Inače, lako je dokazati geometrijsku nepromjenjivost i statičku određenost nosača.

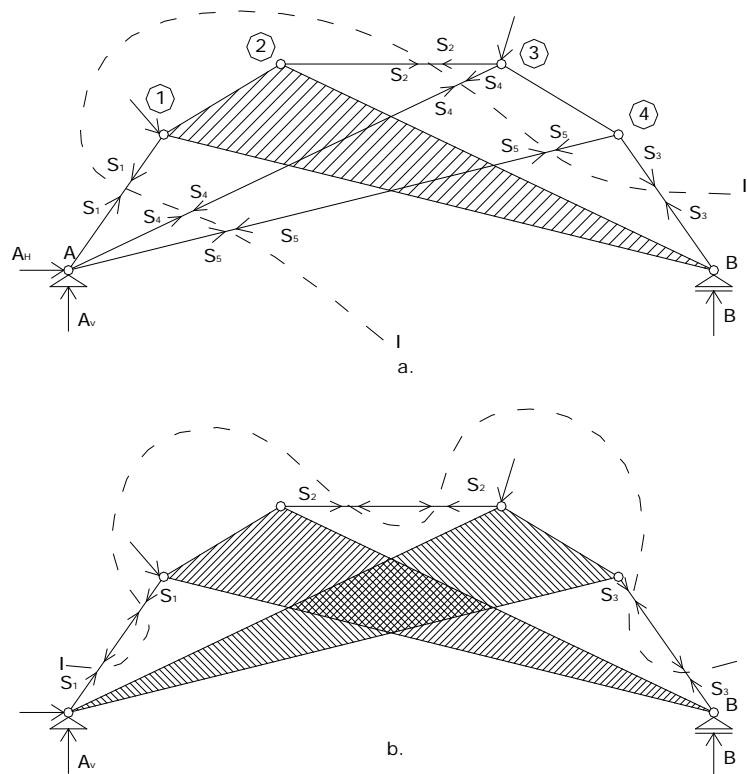


Slika 23.

Štapovi A-3 i A-4 mimoilaze se sa štapovima B-1 i B-2 i nisu na mjestima križanja međusobno spojeni. Do određenih dilema kod promatranog nosača dolazi se zbog toga što se često šablonski smatra da presjek treba napraviti jednom neprekinutom linijom. Kada se to napravi nosač je podijeljen na dva djela prikazana na slici 23 b i c, te je moguće odrediti sile u štapovima Ritterovom metodom. Na slici 21 prikazane su Ritterove (momentne) točke.

Ovaj je primjer zanimljiv stoga što se s njime proširuje pojam određivanja presjeka. Zaključujemo kako nije nužno da se presjek pravi neprekinutom linijom, već je bitno da se štapovi nosača mogu sijeći na taj način da se jedna dio nosača odijeli od ostalih.

U promatranom primjeru moguća su još dva presjeka kojima se pokazuje da se sile u štapovima mogu odrediti Ritterovom metodom, a načinjeni su neprekinutim linijama. Ti su presjeci prikazani na slikama 24 a i b.



Slika 24.

Presjekom I-I na slici 24 a, odbacuje se dio izvan presjeka, a zadržava se dio unutar presjeka. Na slici 23 je prikazano da na promatrani disk B,1,2 djeluju iste sile kao i u načinu presjecanja na slici 24. Presjekom I-I (slika 24 a) štapovi A-3 i A-4 dva puta su presječeni, pa one sile koje su u tim presjecanjem ostale unutar presjeka (S_4 i S_5) u ravnoteži, tako da ih se može eliminirati iz daljnjeg razmatranja.

Očito je da presjek na slici 24 b daje iste rezultate kao i presjek na slici 23.

4. GRAFIČKO ODREĐIVANJE POMAKA REŠETKASTIH NOSAČA

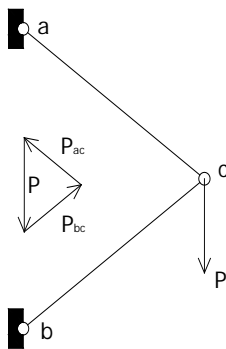
4.1. Williotov plan pomaka

Određivanje pomaka temelji se na konstruiranju plana pomaka iz poznatih promjena duljina štapova Δl i pomaka susjednih čvorova. Postupak je analogan crtanju plana brzina.

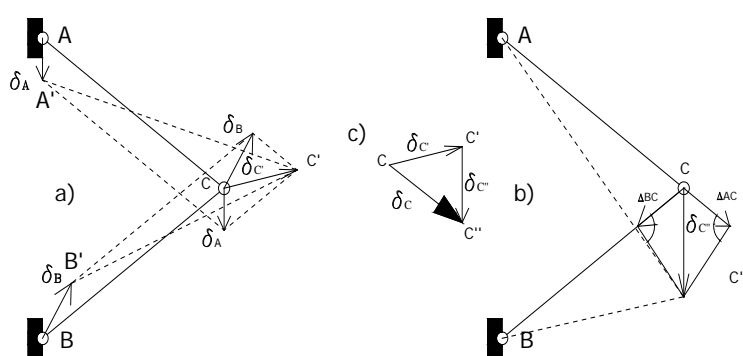
Za ilustraciju samog postupka promatra se jednostavan sistem sastavljen od dva štapa i jednog čvora u kojem djeluje sila P (slika 25). Iz ravnoteže čvora C određuju se sile u štapovima AC i BC , i promjene duljina štapova :

$$\Delta L_{AC} = \frac{S_{AC} \cdot L_{AC}}{E \cdot A_{AC}} \quad \text{i} \quad \Delta L_{BC} = \frac{S_{BC} \cdot L_{BC}}{E \cdot A_{BC}}.$$

Točke A i B mogu biti susjedni čvorovi ili ležajevi koji imaju poznate pomake. Pomak točke C od pomaka točaka A i B , δ_c' prikazan je na slici 26 a.



Slika 25.



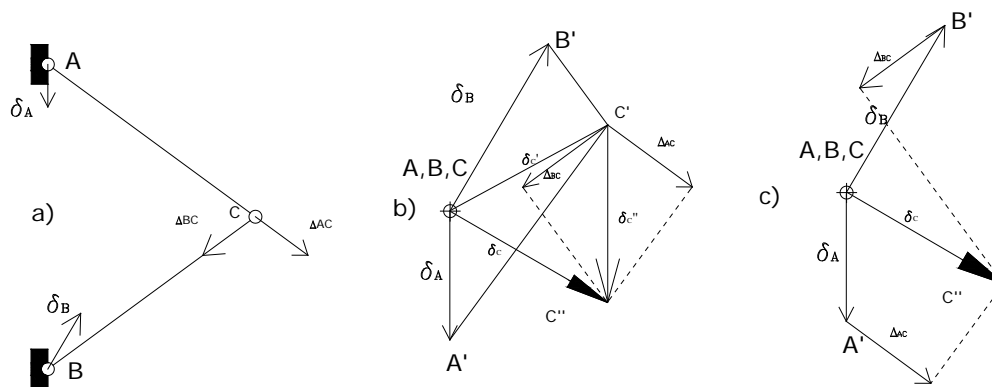
Slika 26.

Na pravac AC nanese se produljenje štapa ΔL_{AC} , a na pravac BC skraćenje štapa ΔL_{BC} i povuku se okomice iz krajeva vektora pomaka. Dobit ćemo pomaknuti položaj čvora C u točki C'' (slika 26 b). Vektor CC'' predstavlja pomak točke C , δ_c'' , od promjene duljina štapova AB i BC . Isprekidanim linijama označen je pomaknuti položaj štapova.

Ukupni pomak točke C bit će $\delta_c = \delta_c' + \delta_c''$ (slika 26 c)

Slika pomaka točke C ovisit će o mjerilu slike nosača. Kako su pomaci vrlo male veličine u odnosu na duljine štapova, odnosno veličinu nosača, to će i rezultati ovakvog načina određivanja pomaka biti nepouzdati.

Na slici 27 prikazan je postupak određivanja pomaka točke C neovisno o mjerilu slike nosača čime se postiže dostatna točnost.



Slika 27.

Odabere se početni položaj točaka A, B i C u planu pomaka (sl.27 b). Iz početnog položaja nanose se vektori pomaka δ_A i δ_B . Iz kraja vektora δ_A povlači se okomica na pravac AC, a iz kraja vektora δ_B okomica na pravac BC. Na sječištu okomica dobiva se položaj C' . Iz točke C' nanosi se vektor ΔL_{AC} paralelno pravcu AC i vektor ΔL_{BC} paralelno pravcu BC. Pri tome treba obratiti pozornost na to da li se radi o produljenju ili skraćenju štapova kako bismo te vektore nanijeli u pravom smislu. Iz kraja vektora ΔL_{AC} povlači se okomica na pravac AC, a iz kraja vektora ΔL_{BC} okomica na BC. Na siječištu ovih okomica nalazi se položaj točke C'' . Vektor CC' određuje pomak točke C zbog pomaka točaka A i B, a vektor $C'C''$ određuje pomak točke C zbog promjene duljine štapova. Ukupni pomak točke C određen je vektorom CC'' δ_C (slika 27 b). Na slici 27 c prikazan je plan pomaka bez određivanja položaja C' .

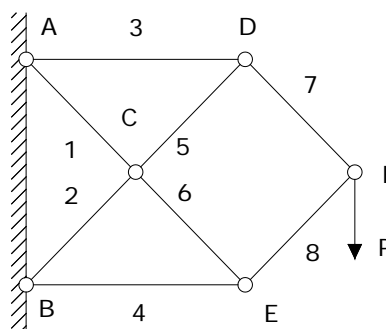
4.2. Pomaci konzolnog rešetkastog nosača

Za određivanje linije pomaka nosača u osnovi se koristi prethodno opisan postupak. Na analogan se način konstruira plan pomaka čvorova rešetkastog nosača neovisno o slici nosača.

Promotrit ćemo primjer sa slike 28. Pretpostavit ćemo da je rešetkasti nosač sa slike opterećen silom P, te kako bi dodatno pojednostavili primjer pretpostavit ćemo da su i produljenja, odnosno skraćenja štapova rešetke predhodno određeni (tablica 1).

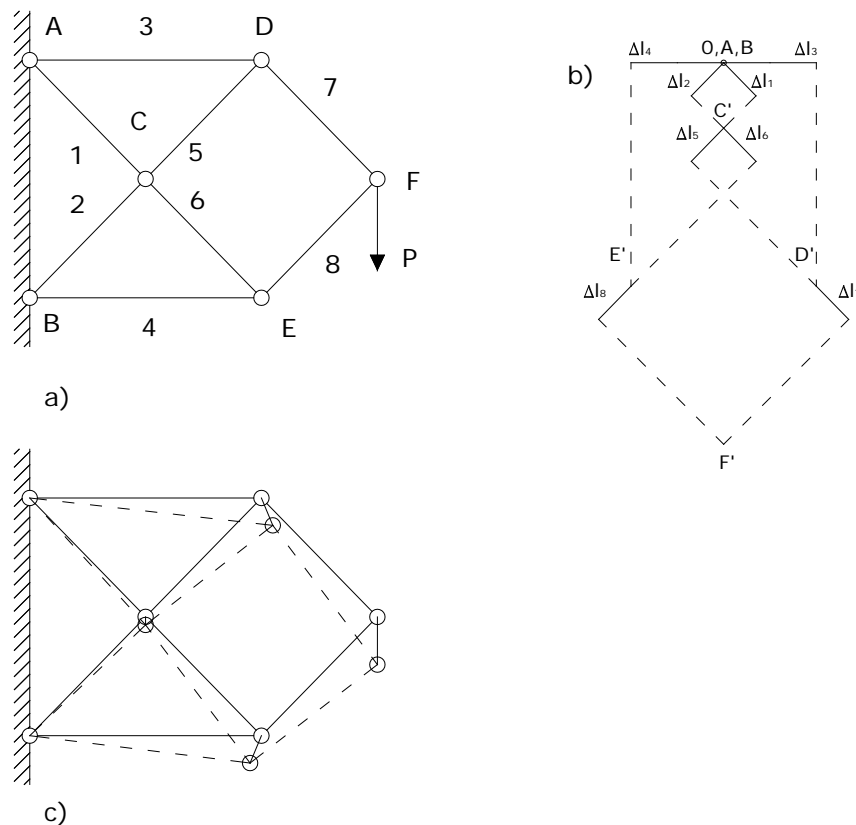
Štap	Δl_i , cm
1	+0,05
2	-0,05
3	+0,10
4	-0,10
5	-0,05
6	+0,05
7	+0,05
8	-0,05

Tablica 1.



Slika 28.

Prije konstruiranja plana pomaka potrebno je odrediti mjerilo u kojem ćemo nanositi pomake. Crtanje plana pomaka počinjemo od čvora C, koji je povezan štapovima 1 i 2 za čvorove A i B. Kako su ti čvorovi nepomični, tako se točke A i B poklapaju s polom O. Polazeći od pola nanosimo vektore Δ_1 i Δ_2 u odabranom mjerilu, koji predstavljaju produljenje štapa 1, odnosno skraćenje štapa 2. Iz kraja vektora Δ_1 i Δ_2 povlače se okomice na štap 1, odnosno štap 2. U sjecištu okomica nalazi se točka C'. Vektor OC' prestavlja pomak čvora C. Sljedeći čvor za koji možemo odrediti pomak je D. U točki C' nanosimo vektor Δ_5 , a u točki A Δ_3 . U sjecištu okomica na štapove 5 i 3, koje postavljamo na krajeve vektora Δ_5 i Δ_3 nalazi se točka D'. Pomak čvora D određen je vektorom OD' . Analogno određujemo pomak čvora E i F, te na taj način konstruiramo konačan Williotov plan pomaka iz kojeg možemo očitati veličinu pomaka svakog čvora promatrane rešetke. Pri očitavanju pomaka treba obratiti pozornost na mjerilo u kojem je plan crtan. Cijeli postupak prikazan je na slici 29. U našem smo primjeru nakon crtanja plana pomaka prenijeli pomake čvorova (OC' , OD' , OE' , OF') u nešto manjem mjerilu (radi preglednosti) na crtež nosača (slika 29 c) radi ilustrativnog prikaza deformiranog oblika cijelog nosača.



Slika 29.

4.3. Pomaci grednih rešetkastih nosača

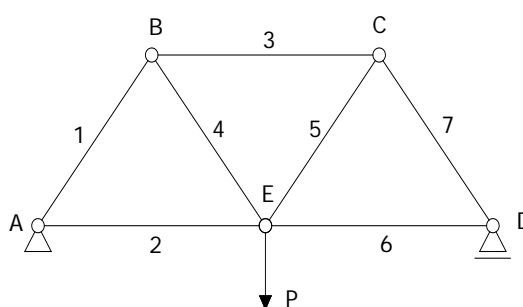
Pri određivanju plana pomaka konzolnog rešetkastog nosača s obzirom na poznate pomake dviju točaka (A i B) mogao se jednoznačno odrediti položaj svakog čvora.

Za rešetkasti nosač na slici 30 poznat je pomak jedne točke tj. za nepomičan ležaj A i pravac pomaka točke D. Za konstruiranje plana pomaka potrebno je uvesti dodatnu prepostavku. Prepostavljamo da štap AE ostaje horizontalan i nakon deformacije. Dakle, čvor E ima samo horizontalan pomak.

Kako je nosač statički određen, produljenja (skraćenja) štapova lako je izračunati, pa nećemo ulaziti u detalje njihovog proračuna već ćemo uzeti vrijednosti zadane u tablici 2.

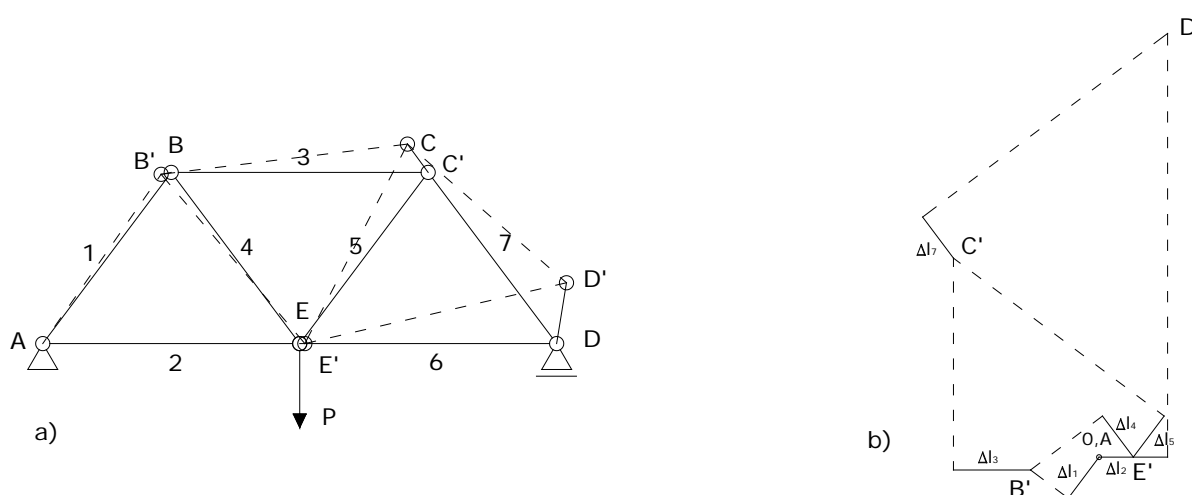
Štap	Δl_i , cm
1	-0,006
2	0,004
3	-0,009
4	0,006
5	0,006
6	0,004
7	-0,006

Tablica 2.



Slika 30.

Nakon što smo odredili mjerilo u kojem ćemo crtati plan pomaka, uzimamo da točka A pada u pol plana. Kako smo već zaključili da će čvor E imati samo horizontalni pomak (zbog navedene pretpostavke koju smo morali uvesti), znamo pomake dviju točaka (A i E) tako da možemo odrediti pomak čvora B, povezanog za ova dva para preko štapova 1 i 4. Postupajući kao i u prethodnim primjerima nastavljamo s konstruiranjem plana pomaka pazeći pritom da smo produljenja, odnosno skraćenja nanijeli u odgovarajućem smislu (slika 31 b).

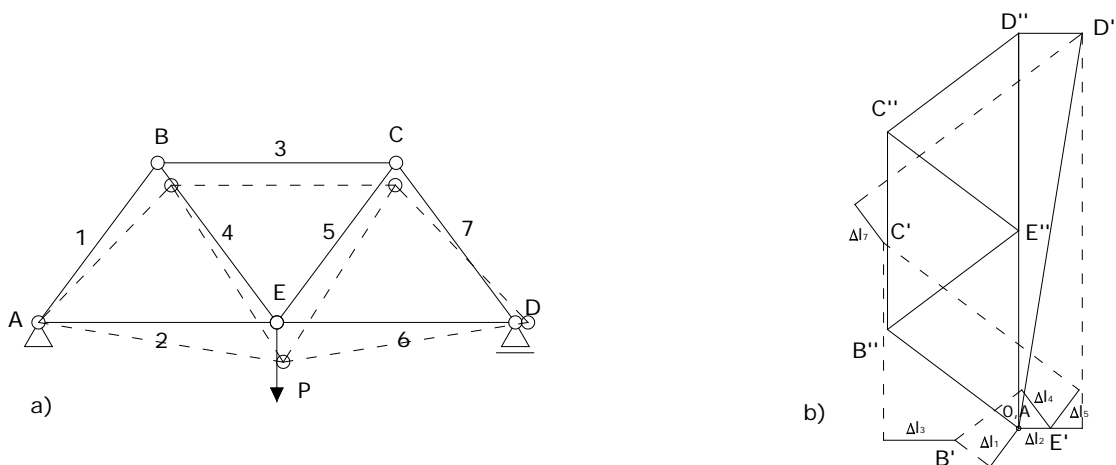


Slika 29.

Ako vektore, odnosno pomake čvorova OB', OC', OE', OD' u nekom manjem mjerilu vratimo na nosač očit je da deformirani oblik nosača nije moguć tj. u ležaju D nije moguć vertikalni pomak. To se dogodilo stoga što smo konstruiranje započeli s netočnom prepostavkom da štap AE ostaje horizontalan. Potrebno je ispraviti ovu netočnu prepostavku da zadovoljimo uvjet na ležaju D. Kako bismo to korigirali, treba zaokrenuti deformiranu rešetku oko nepomičnog ležaja A sve dok točka D' ne dođe u položaj horizontalne linije AD. Dakle "pravi" pomaci čvorova jednaki su zbroju pomaka s Williotovog plana pomaka i pomaka zbog zaokretanja rešetkastog nosača.

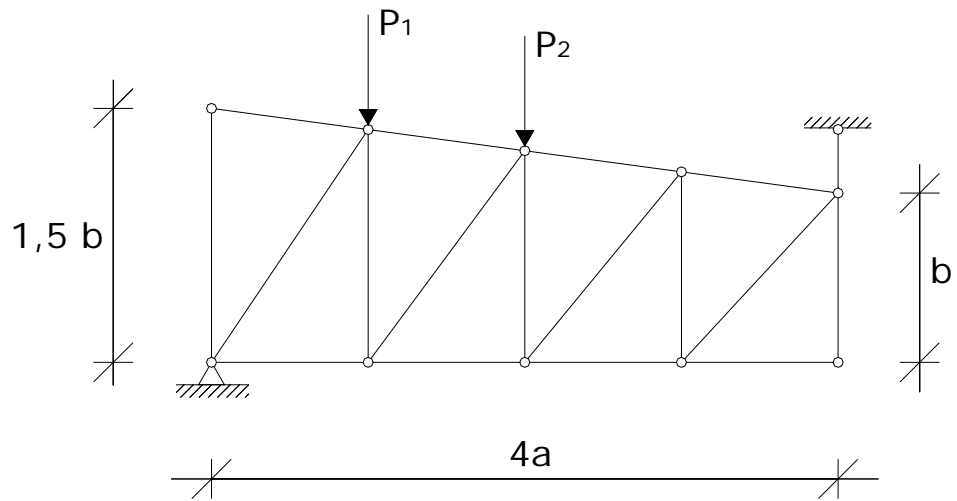
Pomaci zbog zaokretanja određuju se na sljedeći način: Kako je deformirani oblik rešetke $AB'C'D'E'$ zapravo jako blizak svom prvobitnom obliku, sa dovoljnom točnošću možemo pretpostaviti da se čvor D' za vrijeme rotacije kreće okomito na pravac AD, da se čvor C' kreće okomito na pravac AC itd. Dakle, veličina ovih pomaka biti će proporcionalna s radiusima AD, AC itd. Traženi zaokret točke D' očigledno je jednak vertikalnoj komponenti pomaka vektora DD' određenog vektorom OD' na planu pomaka. Kako smo na ovaj način dobili zaokret točke D', dalje lako određujemo odgovarajuće pomake ostalih čvorova (slika 32). OD'' jednak je vertikalnoj komponenti vektora OD' , a ostali se pomaci zbog zaokreta nosača određuju ucrtavanjem figure $OB''C''D''E''$, geometrijski slične figuri ABCDE same rešetke, ali zaokrenute za 90° . Vektori OB'', OC'', OD'', OE'' predstavljaju pomake zbog zaokreta nosača. Ovo proizlazi iz geometrijske sličnosti i zaokrenutosti figura za 90° ; vektori su proporcionalni duljinama odgovarajućih radiusa, a okomiti su na njih.

Kada smo odredili pomake zbog zaokreta zbrajamo ih s onima iz Williotovog plana pomaka, pa je očit da su konačni pomaci čvorova prestavljeni vektorima $B'B'', C'C'', D'D'', E'E''$.



Slika 30.

5. PRIMJER



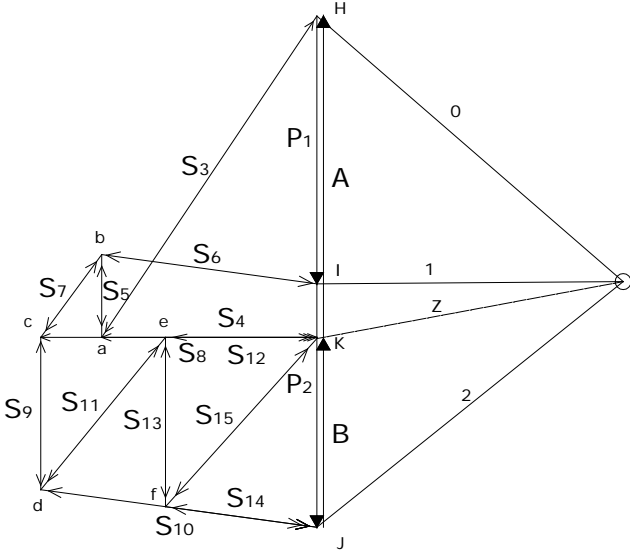
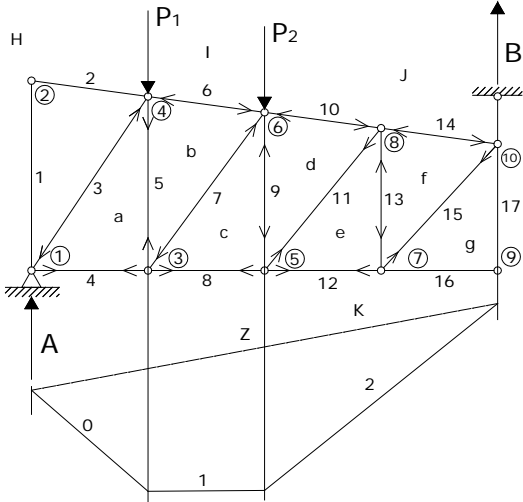
$$P_1=110 \text{ kN}$$

$$P_2=100 \text{ kN}$$

$$a=2,4\text{m}$$

$$b=2,6\text{m}$$

5.1. Maxwell –Cremonin plan sila



MJERILO
 1 cm : 20 kN

OČITANE SILE U ŠTAPOVIMA:

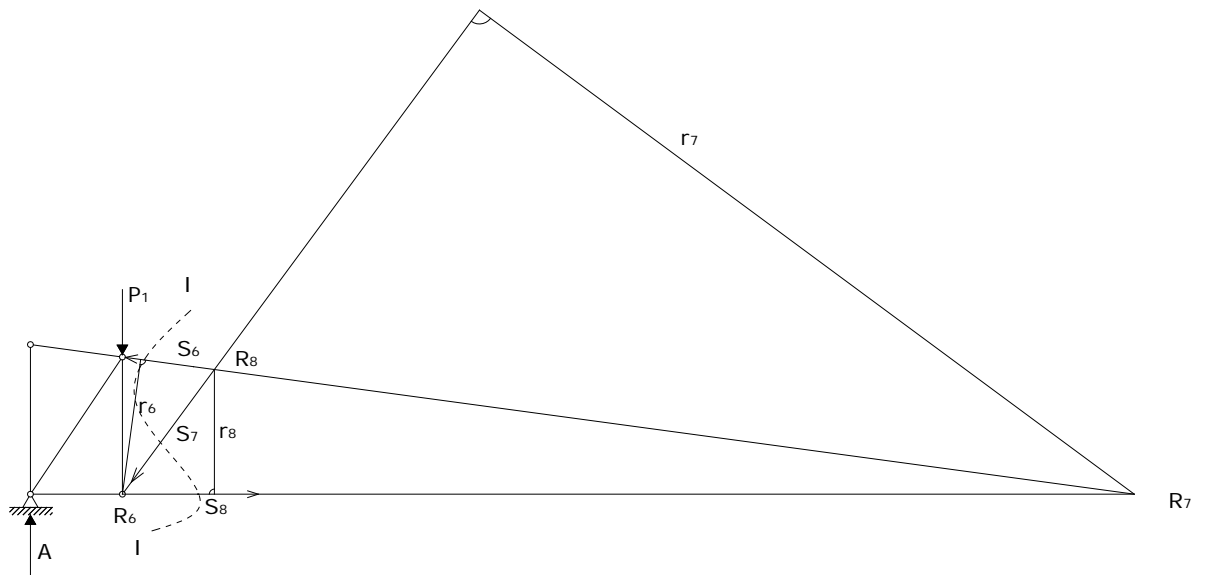
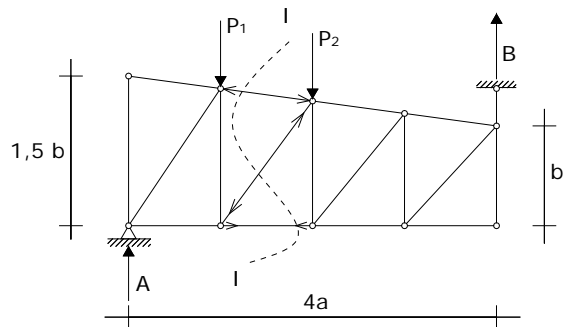
ŠTAP	DULJINA (m)	SILA (kN)
1	3,9	0
2	2,42	0
3	4,31	-159,0
4	2,40	86,6
5	3,58	34,0
6	2,43	-89,4
7	4,04	-42,2
8	2,4	113,7
9	3,25	-62,6
10	2,43	-115,8
11	3,75	81,0
12	2,4	62,2
13	2,93	-69,6
14	2,43	-62,9
15	3,54	93,0
16	2,4	0
17	2,6	0

OČITANE REAKCIJE LEŽAJEVA:

$$A = 132,5 \text{ kN}$$

$$B = 77,5 \text{ Kn}$$

5.2. Ritterova metoda



OČITANI KRAKOVI SILA:

$$r_6 = 3,54 \text{ m}$$

$$r_7 = 21,24 \text{ m}$$

$$r_8 = 3,25 \text{ m}$$

$$\underline{\Sigma M_A = 0}$$

$$- P_1 \cdot a - P_2 \cdot 2a + B \cdot 4a = 0$$

$$B = 0,25 (P_1 \cdot 1 + P_2 \cdot 2) = 0,25 (110 + 200) = 77,5 \text{ kN}$$

$$\underline{\Sigma M_B = 0}$$

$$- A \cdot 4a + P_1 \cdot 3a + P_2 \cdot 2a = 0$$

$$A = 0,25 (P_1 \cdot 3 - P_2 \cdot 2) = 0,25 (330 + 200) = 132,5 \text{ kN}$$

$$\underline{\Sigma M_{R6} = 0}$$

$$- A \cdot a + S_6 \cdot r_6 = 0$$

$$S_6 = 0,282 \cdot (2,4 \cdot 132,5) = 89,8 \text{ kN}$$

$$\underline{\Sigma M_{R7} = 0}$$

$$- A \cdot 28,77 + P_1 \cdot 26,40 + S_7 \cdot r_7 = 0$$

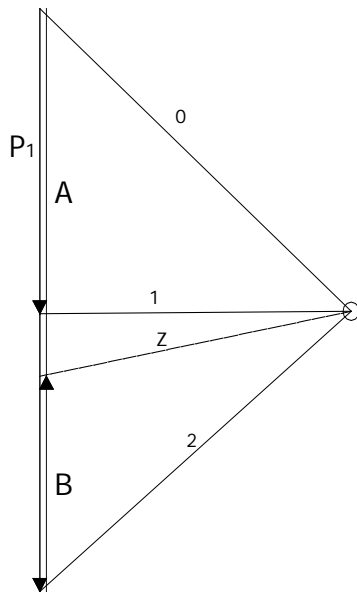
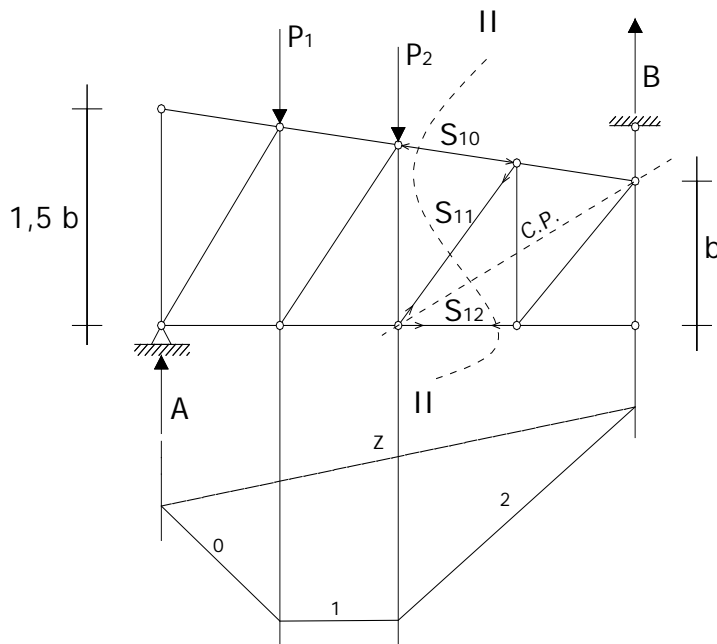
$$S_7 = 0,047 \cdot (28,77 \cdot 132,5 - 26,40 \cdot 110) = 42,68 \text{ kN}$$

$$\underline{\Sigma M_{R8} = 0}$$

$$- A \cdot 2a + P_1 \cdot a + S_8 \cdot r_8 = 0$$

$$S_8 = 0,31 \cdot (4,8 \cdot 132,5 - 2,4 \cdot 110) = 114,46 \text{ kN}$$

5.3. Culmannova metoda



MJERILO

1 cm : 20 kN

$$R_d = B$$

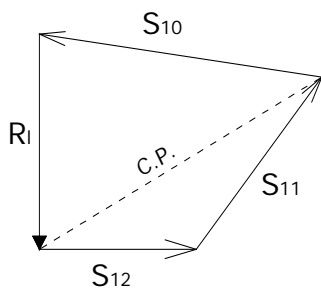
$$R_l = - R_d = - B$$

OČITANE SILE U ŠTAPOVIMA

$$S_{10} = 115,5 \text{ kN}$$

$$S_{11} = 80,2 \text{ kN}$$

$$S_{12} = 63,6 \text{ kN}$$



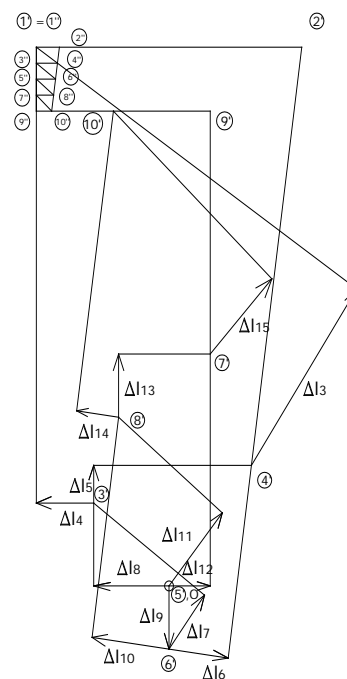
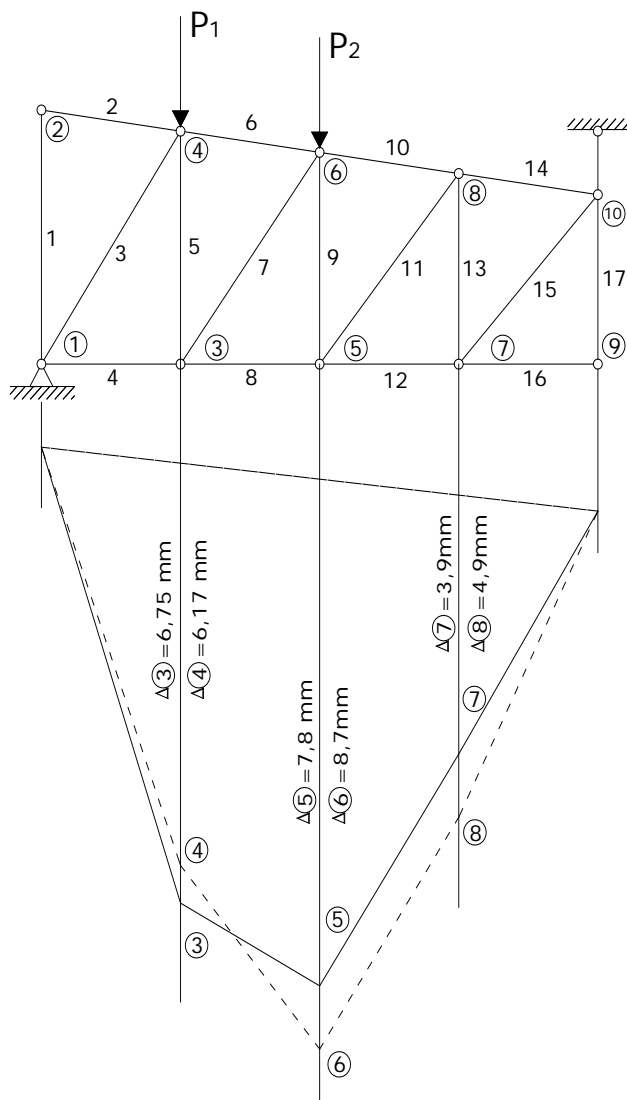
5.4. Williotov plan pomaka

$$\Delta l_i = \frac{S_i \cdot l_i}{E \cdot A}$$

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

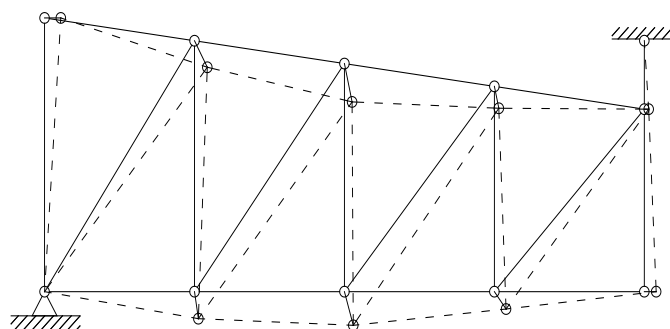
$$A = 1000 \text{ mm}^2$$

ŠTAP	DULJINA (m)	SILA (kN)	Δl_i (mm)
1	3,9	0	0
2	2,42	0	0
3	4,31	-159,0	-3,26
4	2,40	86,6	0,99
5	3,58	34,0	0,58
6	2,43	-89,4	-1,03
7	4,04	-42,2	-0,81
8	2,4	113,7	1,30
9	3,25	-62,6	-0,97
10	2,43	-115,8	-1,34
11	3,75	81,0	1,45
12	2,4	62,2	0,71
13	2,93	-69,6	-0,97
14	2,43	-62,9	-0,73
15	3,54	93,0	1,57
16	2,4	0	0
17	2,6	0	0



----- GORNJI POJAS

_____ DONJI POJAS



DEFORMIRANI OBLIK NOSAČA

6. ZAKLJUČAK

Nakon rješavanja zadatka M-C planom sila te zatim Ritterovom i Cullmanovom metodom, dobili smo približno jednaka rješenja. Možemo zaključiti da su sve tri metode zadovoljavajuće točne te da nije bilo grešaka u postupku.

Willotovim planom pomaka pokazali smo kako se rešetka deformira za zadana opterećenja i konstruirali progibne linije gornjeg i donjeg pojasa rešetkastog nosača.

7. LITERATURA

1. V. Simović: Građevna statika I, Građevinski institut Zagreb 1988.
2. M. Anđelić: Građevna statika II, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2005
3. S. Timosenko & D. H. Young: Statika inženjerskih konstrukcija, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1956.