

9 Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama

Uvodna razmatranja

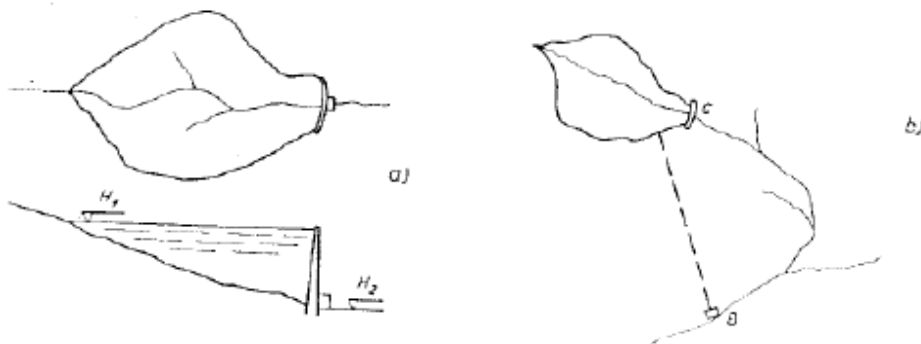
Hidroelektranama nazivamo postrojenja u kojima se gravitacijska potencijalna energija (kraće, potencijalna energija ili energija položaja) vode, pomoću rotacijskih strojeva (turbina, elisa) i električnih generatora (sinkronih i asinkronih), pretvara u električnu energiju bez obzira na to radi li se o energiji Sunčeva zračenja transformiranoj u potencijalnu energiju vode ili o potencijalnoj energiji vodenih masa nastaloj uzajamnim gravitacijskim djelovanjem Sunca i Mjeseca (ali i rotacije Zemlje), energiji plime i oseke. *(S druge strane međutim, energija valova, u konačnici također preobražena energija Sunčeva zračenja, ne pretvara se u hidroelektranama u električnu energiju; zasad ne postoje takve hidroelektrane.)* Takvo je iskorištavanje energije vode ekonomski konkurentno proizvodnji električne energije iz fosilnog i nuklearnog goriva, te je stoga hidroenergija (energija vode) najvažniji obnovljivi izvor energije. U posljednjih je tridesetak godina proizvodnja u hidroelektranama utrostručena, a njezin udio povećan za 50%. U istom je razdoblju proizvodnja u nuklearnim elektranama povećana 100 puta, a udio oko 80 puta. Ti podaci pokazuju da se proizvodnja u hidroelektranama brzo povećava, ali i da zaostaje za proizvodnjom u nuklearnim elektranama i, pogotovo, klasičnim termoelektranama. Razlog je tomu činjenica da iskorištavanje potencijalne energije vode otežavaju (brojnija) tehnička (pogonski zahtjevi), prirodna ali i „životna“ ograničenja. Primjerice, jedno je od ograničenje nužnost raspolaganja s obilnim (golemim) količinama vode, kako bi se raspolagalo s traženom količinom potencijalne energije kada se to zahtijeva, pa je stoga na vodotocima (rijekama) potrebno izgraditi brane i akumulacije (akumulacijska jezera). Njihovom se izgradnjom, ukoliko to uopće omogućuju prirodne okolnosti (topografski i geološki uvjeti), remeti „prirodni“ život rijeke, povećavaju troškovi izgradnje hidroelektrane i negativni utjecaji na okoliš, te i pojavljuje nova (velika) opasnost: mogućnost: razaranja brane prirodnim (potresi, obilne kiše) ili ljudskim djelovanjem (rat, terorizam). Spominjući „životna“ ograničenja mislimo pritom na hidroenergetsko iskorištavanje vodotoka (rijeka) ograničeno potrebama drugih korisnika rijeke: faune i flore u rijeci, odvijanja prometa (plovidbe) rijekom, migracije riba, potrebama poljoprivrede (natapanje, odvodnjavanje) i opskrbe vodom (za piće, napajanje stoke), ribarstva i ekologije, očuvanje i održavanje ekosustava i prirodnih ljepota (ugroženih potapanjem velikih površina) i dr. Gradnju hidroelektrane, izbor njezinog tipa, nemoguće je unificirati zbog toga; svaki konkretni slučaj traži specifično rješenje. Naime, svaka se hidroelektrana gradi na određenom potezu rijeke, kako bi iskorištavala energiju tog dijela vodotoka, koja pak ovisi o količini vode koja protječe koritom rijeke (protok $Q \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_{\text{vode}} \approx \text{konst.}$)) i o visinskoj razlici između dovoda vode u hidroelektranu i odvoda vode iz hidroelektrane ($H \text{ m}$), a koja bi se inače, u prirodnim uvjetima, utrošila u koritu rijeke najvećim dijelom za svladavanje otpora trenja, za razaranje dna i obala, te za prijenos proizvoda tog razaranja. Hidroelektrane moraju stoga sadržavati uređaje i objekte (građevine) poput brane i akumulacije (akumulacijskog jezera) koji će usporavati vodu (podizati razinu vode) i regulirati protok, kanale, tunele i tlačne cijevi koji će dovoditi vodu u i odvoditi vodu iz hidroelektrane (strojarnice s rotacijskim strojevima, u kojima će se potencijalna energija vode transformirati u mehanički rad) i električni generator u kojem će se mehanički rad pretvarati u električnu energiju. Pritom, najjednostavnije, razina se vode podiže gradnjom brane u koritu rijeke gdje su obale dostatno visoke, slika 9-1. Ako su obale relativno niske, moraju se graditi zaštitni nasipi uzduž korita, da se ne poplave velike površine zemljišta. Takva shema energetskog iskorištavanja vodotoka odgovara pribranskoj

hidroelektrani. Naime, s obzirom na izvedbu, možemo hidroelektrane podijeliti u dvije velike grupe: pribranske i derivacijske.



Slika 9-1 Brana hidroelektrane "Hoover Dam" (SAD)

U prvu grupu spadaju hidroelektrane koje imaju strojarnicu smještenu uz branu ili unutar brane ili je strojarnica izvedena kao dio brane, slika 9-1 i 9-2 a). Tada je (teoretski) moguće upotrijebiti sav dotok koji dolazi do mjesta gdje je izgrađena hidroelektrana. Obično radi se o hidroelektranama na velikim rijekama sa širokim koritom, velikim količinama vode, i relativno malim padovima. Ako je pad veći, normalno se gradi derivacijska hidroelektrana, slika 9-2 b), u kojoj se voda kanalom ili tunelom dovodi strojarnici (turbinama) smještenim u poziciji B. Tada, međutim, ostaje neiskorišteni dotok koji se pojavljuje između brane (C) i postrojenja (B), na potezu CB na slici 9-2 b).

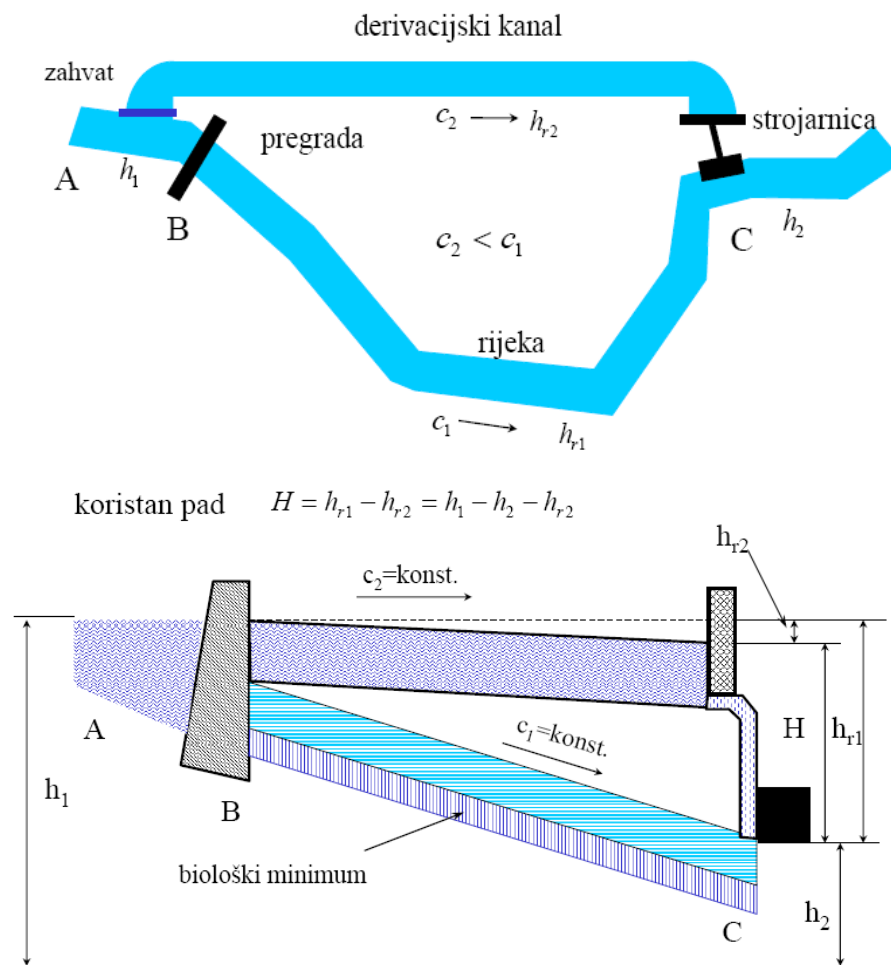


Slika 9-2 Tipovi hidroelektrana: a) – pribranska hidroelektrana, b) – derivacijska hidroelektrana

Derivacijske se hidroelektrane grade, osim u brdovitim predjelima, i u ravnici kad se samo gradnjom brane, a zbog nepovoljnih topografskih uvjeta, ne ostvaruje ekonomična

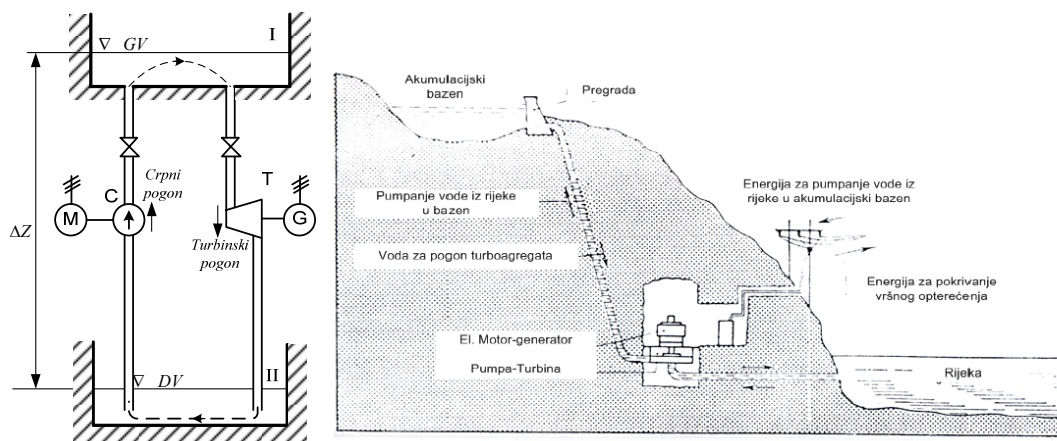
koncentracija pada. U takvim se slučajevima voda dovodi hidroelektrani tunelom ili umjetnim koritom, crtkana linija na slici 9-2 b), uz manje gubitke, zbog tehničke doradenosti dovoda, nego u prirodnom koritu, pa je nagib umjetnog korita manji od prirodnog, slika 9-3 (9-31 i 9-33).

Derivacijske hidroelektrane mogu biti „gravitacijske“ ili „tlačne“. (Što to znači, razjasnit ćemo kasnije.) U njima se najveći dio koncentracije pada postiže tunelima ili kanalima, a samo manji branama. Kad se znatan dio pada ostvaruje branom, govori se o kombiniranoj hidroelektrani (kombinacija pribranske i derivacijske). U gravitacijskoj elektrani voda se dovodi turbinama kanalom ili gravitacijskim tunelom. Iz strojarnice se voda vraća u korito rijeke odvodnim kanalom.



Slika 9-3 Shema „nizinske“ derivacijske elektrane: h_{r2} – dio potencijalne energije vode kojom se svladava trenje u derivacijskom kanalu (omogućuje strujanje vode); h_{r1} – dio potencijalne energije koji omogućuje strujanje vode u prirodnom koritu rijeke; H – potencijalna energija vode u derivacijskom kanalu (veći dio koje će u strojarnici biti preobražen u električnu energiju); određena je, u što ćemo se uvjeriti, raspoloživim padom (visinskom razlikom između dovoda vode u hidroelektranu i odvoda vode iz hidroelektrane, H m, i količinom raspoložive vode, $Q \text{ m}^3$)

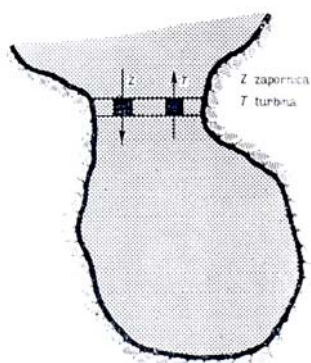
Poseban su tip pumpno (crpno)-akumulacijske (reverzibilne) hidroelektrane i hidroelektrane na plimu i oseku. U prvim se razlika razine vode stvara crpljenjem (pumpanjem) vode iz donjeg u gornji bazen (akumulaciju), slika 9-4, obično tijekom noći kada elektrane koje proizvode „temeljnu“ električnu energiju raspolažu s viškom energije. Tako podignuta voda iskorištava se u razdoblju „vršnog“ opterećenja za proizvodnju skuplje „varijabilne“ električne energije. Razlika u vrijednosti tih električnih energija čini pothvat rentabilnim, iako se za crpljenje (pumpanje) vode troši, približno, 40% više električne energije nego što se može s njom proizvesti.



Slika 9-4 Shema crpno-akumulacijske hidroelektrane: *I* - gornji akumulacijski bazen, *GV* – gornja voda, *M* – električni motor; *C* – crpka, *T* – vodna turbina, *G* – sinkroni generator, *II* - donji akumulacijski bazen, *DV* – donja voda

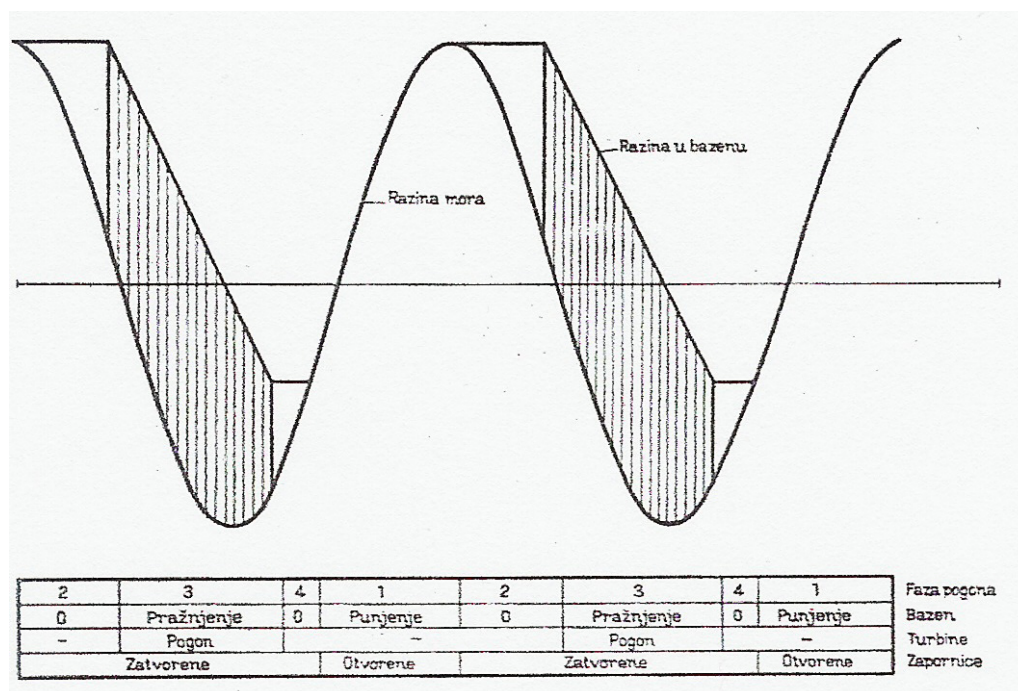
Plima i oseka posljedica su Sunčeva i Mjesečeva djelovanja na vodu u oceanima. Pritom su učestalosti pojave plime i oseke različite na pojedinim obalama. Na zapadnoeuropskoj atlantskoj obali vremenski razmak između dvije plime je 12 sati i 25 minuta, na Tahitima 12 sati, a na obalama Indokine 24 sata. Slično, amplitude plime i oseke nisu svugdje jednake, a niti su konstantne. Ovisi o položaju Sunca, Mjeseca i Zemlje, površini i dubini mora, konfiguraciji obale, smjeru vjetra. U Sredozemnom moru amplituda je samo 10 cm (slično je i na našoj obali), u Baltičkom moru nekoliko desetaka centimetara, a u Atlantskom, Tihom i Indijskom oceanu prosječno 6 do 8m. Na pojedinim mjestima obale u zapadnoj Francuskoj i u jugozapadnom dijelu Velike Britanije amplituda dostiže i više od 12m, a na istočnoj obali Kanade nešto preko 16m (16,27m što je najviša zabilježena plima). Obično se razlikuje vrlo visoka plima, koja se pojavljuje za vrijeme proljetnog i jesenskog ekvinocija, visoka plima, koja se pojavljuje dvaput u tijeku 29,5 dana, jedan ili dva dana nakon mladog i punog mjeseca, te niska plima, koja se javlja također dvaput tijekom 29,5 dana, jedan ili dva dana nakon prve i druge mjesečeve četvrti.

Za energetska iskorištavanje plime i oseke potrebno je odabrati pogodno mjesto na morskoj obali na kojem je velika amplituda plime i na kojem postoji mogućnost, izgradnjom brane (pregrade), izolirati dio morske površine radi stvaranja akumulacijskog bazena. Najjednostavniji se način korištenja energije plime i oseke ostvaruje sustavom jednog bazena s turbinama koje rade samo u jednom smjeru strujanja, slika 9-5. U tom se slučaju bazen puni za vrijeme plime kroz zapornice, a prazni za vrijeme oseke kroz turbine. Drugim riječima, energetska se korištenje razlike razina vode bazena i mora provodi za vrijeme oseke.



Slika 9-5 Shema korištenja energije plime i oseke sustava jednog bazena s turbinama koje iskorištavaju strujanje samo u jednom smjeru

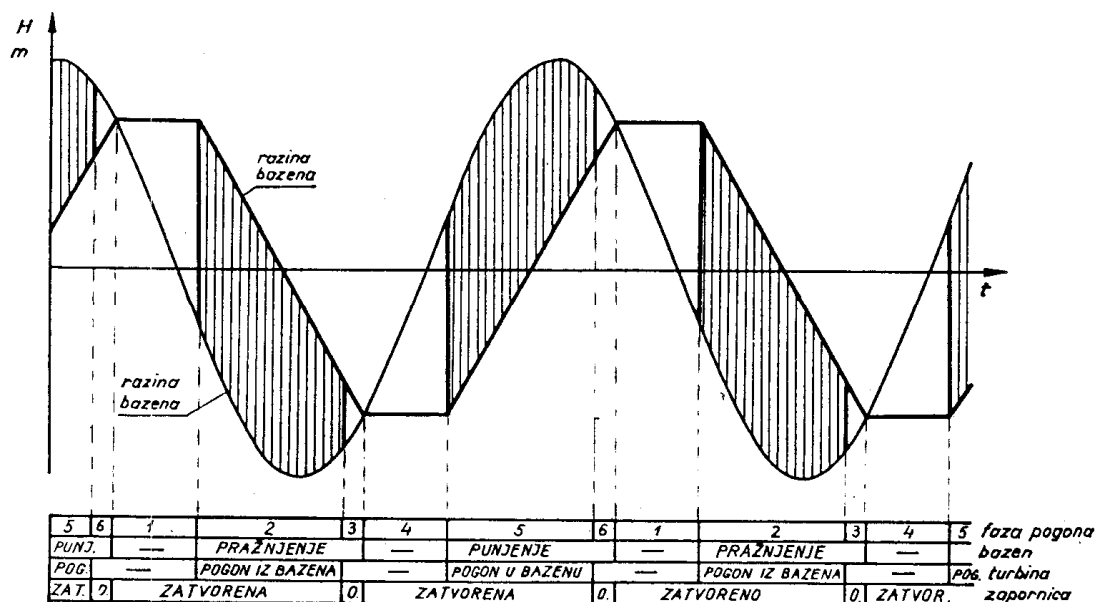
Dakako, moguć je i zrcalni pogon: za vrijeme plime puni se bazen prolazom vode kroz turbine, a prazni za vrijeme oseke kroz zapornice. Međutim, budući da obale bazena nisu okomite, to je energetsko korištenje razlike razina voda povoljnije za vrijeme oseke nego li za vrijeme plime jer, uz istu količinu vode, turbine kroz dulje vrijeme rade s većim padom u slučaju korištenja za vrijeme oseke. Naime, razlikuju se četiri faze pogona, slika 9-6.



Slika 9-6 Iskorištavanje energije plime i oseke turbinom koja radi u jednim smjeru strujanja vode

U prvoj fazi, za vrijeme plime, bazen se puni kroz zapornice. Nakon što je postignuta maksimalna razina vode u akumulacijskom bazenu, zatvaraju se zapornice i kroz izvjesno vrijeme održava se bazen pun (druga faza). U trećoj fazi pogona stavljaju se u pogon turbine, voda kroz njih otječe iz bazena u more dok se ne postigne minimalni pad uz koji još mogu raditi turbine. Nakon toga pogon turbina se obustavlja (četvrta faza), zapornice još ostaju

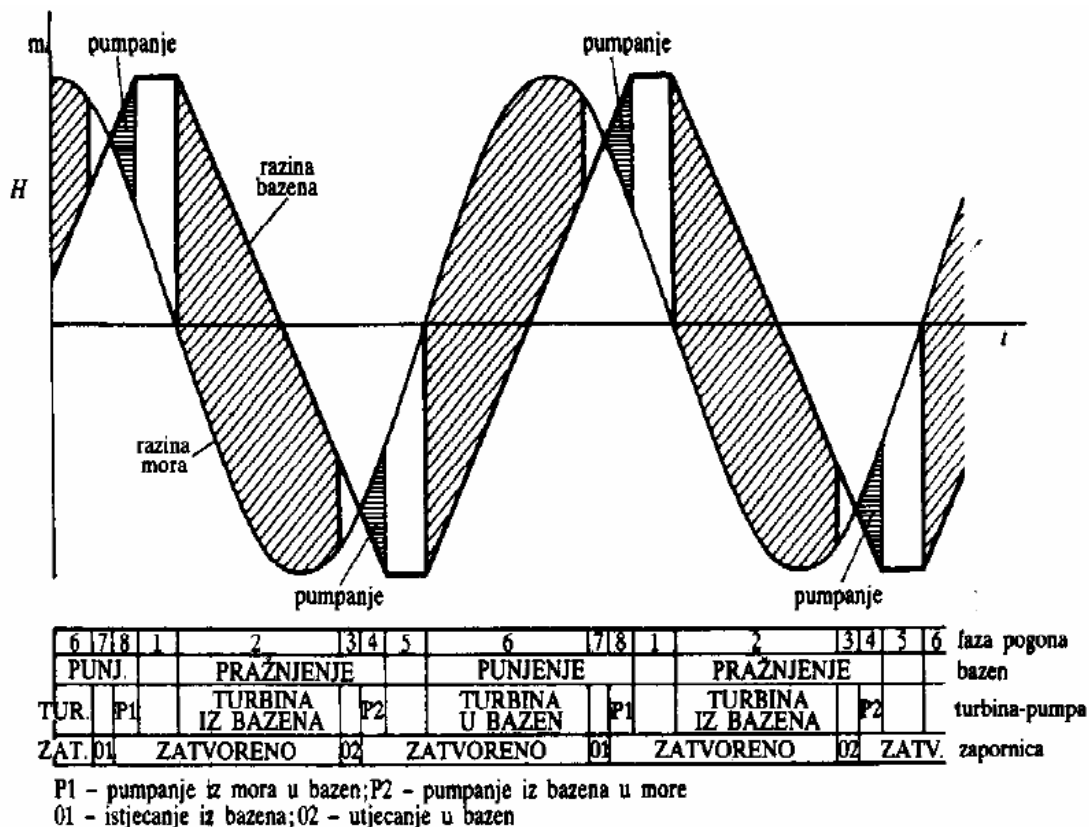
zatvorene dok se ne izjednači razina u bazenu s razinom mora, a onda ponovo počinje punjenje bazena, što odgovara prvoj fazi pogona. Voda akumulirana u bazenu može se iskorištavati uz veće ili manje padove, odnosno uz polaganije ili brže sniženje razine u bazenu. Ako se, naime, kroz turbine propušta manje vode, u bazenu će se održavati viša razina, pa će se voda iskorištavati pri većim padovima. S povećanjem protoka kroz turbine razina će više brže opadati, a posljedica će toga biti manja razlika između razine vode u bazenu i otvorenom moru. Količina iskorištene potencijalne energije vode ovisi o produktu količine vode i pada, pa je moguće odrediti maksimalnu količinu energije koja se može postići, a na taj način i optimalno vođenje pogona. Za opisani pogon na slici 9-6 trajanje rada turbine (samo faza 3) iznosi oko 45% vremena trajanja jedne periode plime i oseke. Ostalo je vrijeme turbina izvan pogona, pa se za to vrijeme ne proizvodi ni električna energija. Da bi se produžilo vrijeme pogona, može se postaviti turbina koja radi u oba smjera strujanja vode: i za vrijeme plime i za vrijeme oseke, slika 9-7, tj. strujanja vode i u bazen i iz bazena.



Slika 9-7 Iskorištavanje energije plime i oseke turbinom koja radi u oba smjera strujanja vode

Turbina (turbine) sada rade za vrijeme faze 2 i faze 5. Za pražnjenja bazena (faza 2) iste su prilike kao na slici 9-6. Turbina se zaustavlja kad se postigne minimalni pad, ali se bazen nakon toga i dalje prazni (faza 3 na slici 9-7) kroz zapornicu, da bi se u njemu postigla što niža razina, kako bi se ostvario što veći pad za fazu pogona kad se prijeđe na smjer strujanja od mora prema bazenu. Zapornica se zatvara kad se izjednače razine bazena i mora. Pri zatvorenoj zapornici razina u bazenu ostaje konstantna (faza 4), sve dok se ne postigne dovoljno velika razlika razina koja će osigurati dostatan pad. Nakon toga stavlja se u pogon turbina, ali sa smjerom strujanja od mora prema bazenu (faza 5). Turbina se zaustavlja kad se postigne minimalni pad, nakon toga otvara se zapornica da bi se i dalje punio akumulacijski bazen (faza 6). Nakon izjednačenja razina, zatvara se zapornica, pa tada započinje prva faza pogona. Usporedba načina rada na slici 9-6 (turbina s jednim smjerom strujanja) i na slici 9-7 (turbina s dva smjera strujanja) pokazuje da se u drugom slučaju energija vode koristi na nižem padu jer je razina u bazenu niža. Na taj se način smanjuje efekt postavljanja turbine s dva smjera strujanja. Ako bi se naime željela postići ona kota vode u bazenu koja odgovara

amplitudi plime ili amplitude oseke, moralo bi se skratiti trajanje pogona turbine, što bi uzrokovalo smanjenje iskorištenja potencijalne energije vode. Da bi se ta mana dvostrukog korištenja smanjila, rješenje je tako konstruirana turbina koja može raditi ne samo s dva smjera strujanja, nego i kao pumpa (crpka) bilo za prebacivanje vode iz bazena u more, bilo iz mora u bazen. Takva turbina-pumpa omogućuje realizirane pogona prikazanog na slici 9-7a. Faze pogona od 1 do 3 odgovaraju istoimenim fazama na slici 9-7. Ali kad se zatvori zapornica, počinje pumpanje iz bazena u more (faza 4 na slici 9-7a) da bi se što više snizila razina vode u bazenu. Kad je postignuta kota koja odgovara najnižoj razini mora, obustavlja se pumpanje, pa bazen ostaje na konstantnoj razini (faza 5) sve dok ne počne pogon turbine. Faze 5 do 7 odgovaraju fazama 4 do 6 na slici 9-7. Kad se, međutim, izjednače razine bazena i mora na kraju faze 7 pogona, ponovno počinje pumpanje, ali sada iz mora u bazen. Korist takvog postupka ogleda se u činjenici da se voda podiže na znatno manju visinu od one na kojoj će se upotrijebiti. (Potrebna energija za pumpanje dobiva se iz drugih elektrana.) Na taj se način bolje iskorištava potencijalna energija plime i oseke.



Slika 9-7a Iskorištavanje energije plime i oseke turbinom koja radi kao turbina i kao pumpa u oba smjera strujanja vode

Međutim, kakav god sustav za iskorištavanje energije plime i oseke odabrali, ne će biti moguće postići ni konstantnu proizvodnju ni konstantnu snagu, pa su za zadovoljavanje potreba potrošača pokraj takvih elektrana potrebne i dopunske elektrane. Pritom se elektrane na plimu i oseku mogu uključiti u elektroenergetski sustav samo ako ostale elektrane imaju ukupnu snagu nekoliko desetaka puta veću od snage tih elektrana.

Proizvodnja je električne energije u elektranama, koje se koriste plimom i osekom, proporcionalna površini bazena, koji se dobiva izgradnjom brane, i kvadratu amplitude plime. Smatra se da je neekonomično iskorištavanje plime i oseke kad je amplituda manja od 2 m. Maksimalna je teorijska količina mehaničkog rada jednog ciklusa plime i oseke jednaka $W_{\max} = \rho g H^2 A$ [J], gdje je ρ gustoća vode, g ubrzanje Zemljine teže, H srednja amplituda, a A površina bazena, koja se dobiva uz pretpostavku da će se sva akumulirana voda iskoristiti na padu jednakom srednjoj amplitudi plime, što se, dakako, u stvarnosti ne može postići jer za vrijeme pogona raste razina mora uz istodobno smanjivanje razine vode u bazenu i jer postoje gubici u turbini i generatoru.

Danas je u pogonu samo pet elektrane koje iskorištavaju energiju plime i oseke. Najveće je takvo postrojenje, u pogonu od 1966. godine, izgrađeno na ušću rijeke La Rance kod St. Malo u Francuskoj, slika 9-7b. (Ostale tri elektrane, s obzirom na njihovu snagu, mogu se smatrati eksperimentalnima.) Postavljene su 24 turbine koje mogu raditi i kao turbine i kao pumpe za oba smjera strujanja vode. Ukupna snaga turbina je 240 MW, godišnja proizvodnja iznosi oko 600 GWh, a za pumpanje je potrebno oko 60 GWh. Maksimalni je protok kroz turbinu $260 \text{ m}^3/\text{s}$, odnosno $6.240 \text{ m}^3/\text{s}$ za elektranu. Iskoristivi je volumen bazena $184 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, površina bazena 22 km^2 , a duljina oko 22 km. Brana je dugačka 720m.



Slika 9-7b Iskorištavanje energije plime i oseke: hidroelektrana na ušću rijeke La Rance

Ako se usporedi moguća proizvodnja elektrane La Rance (oko 600 GWh godišnje) s teorijskom mogućnošću proizvodnje od oko 3.000 GWh godišnje, pokazuje se da je iskorištenje plime i oseke tek 20%.

Vrlo veliki investicijski troškovi govore protiv gradnje elektrana za iskorištavanje energije plime i oseke. Osim toga ukupno moguća proizvodnja električne energije u postrojenjima na poznatim povoljnim lokacijama predstavlja samo marginalnu količinu potrebne električne energije, pa se, zasad, ne pomišlja gradnja novih elektrana takvog tipa.

9.1 Značajke proizvodnje električne energije

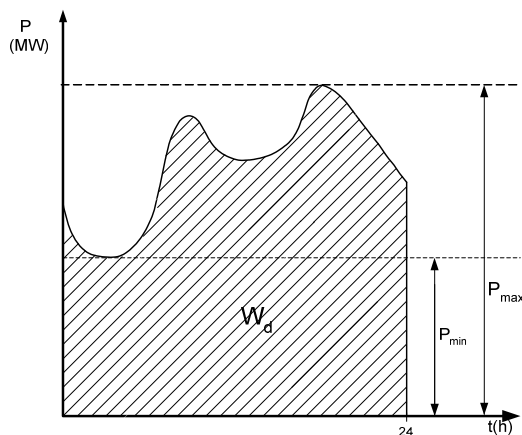
U elektroenergetskom sustavu postoji veliki broj potrošača koji troše električnu energiju na način, u količinama i u doba dana kako to najbolje odgovara njihovim potrebama. Radi toga se i potražnja tijekom dana mijenja i tu promjenu prikazujemo „dnevnom dijagramom potražnje“ ili „dnevnom dijagramom opterećenja“.

(Govorimo o dnevnom dijagramu potražnje kada promatramo promjenu sa strane potrošača (trošila), a o dnevnom dijagramu opterećenja kada gledamo sa strane elektrana, rasklopnih postrojenja ili vodova.)

Osim dnevnih promjena potražnje ili dnevnih promjena opterećenja postoje i tjedne promjene, jer ni svi dnevni dijagrami opterećenja unutar tjedna nisu međusobno jednaki. Primjerice, nedjeljni dijagram opterećenja znatno se razlikuje od dijagrama opterećenja radnog dana. Postoje nadalje i razlike između dijagrama opterećenja radnih dana, razlike uvjetovane godišnjim dobima, razlike uzrokovane vrstama potrošača u elektroenergetskom sustavu, kao i odnosom između pojedinih vrsta potrošača. U svim je slučajevima međutim dnevni dijagram opterećenja osnova za upoznavanje zahtjeva potrošača, pa prema tome i polazna točka za projektiranje, izgradnju i pogon (proizvodnju) elektrana.

Na dnevnom dijagramu opterećenja, slika 9-8, uočavamo dva karakteristična opterećenja: „maksimalno opterećenje“ (P_{max}) i „minimalno opterećenje“ (P_{min}). Površina ispod krivulje predstavlja tijekom dana proizvedenu energiju (W_d). Pomoću ovih triju veličina mogu se odrediti dvije veličine koje karakteriziraju dnevni dijagram opterećenja: „(dnevni) faktor opterećenja“ (m), definiran kao omjer između energije W_d i energije koja bi se mogla proizvesti snagom P_{max} tijekom 24 sata:

$m = \frac{W_d}{24P_{max}}$	[9.1]
-----------------------------	-------



Slika 9-8 Dnevni dijagram opterećenja

i omjer minimalnog i maksimalnog opterećenja (m_0):

$m_0 = \frac{P_{min}}{P_{max}}$	[9.2]
---------------------------------	-------

Faktor opterećenja možemo definirati i kao omjer između srednjeg opterećenja tijekom dana:

$P_{sr} = \frac{W_d}{24}$	[9.3]
---------------------------	-------

i maksimalnog opterećenja, pa je

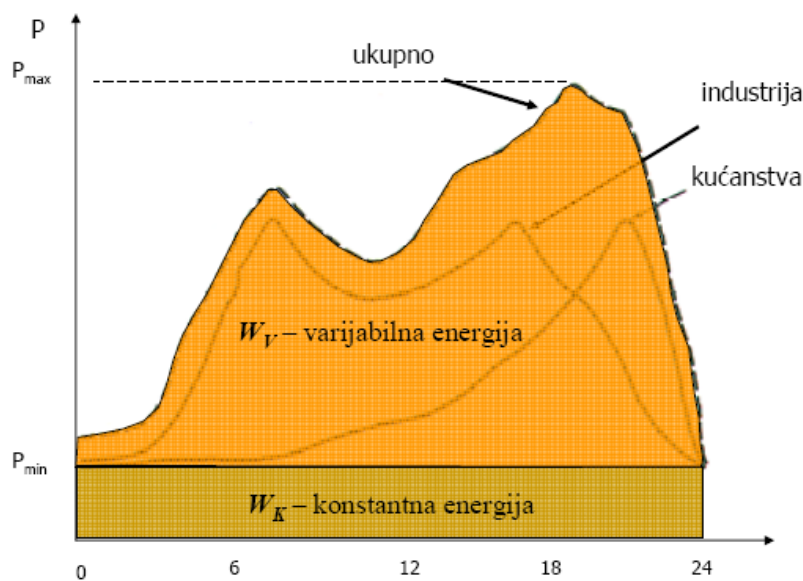
$m = \frac{P_{sr}}{P_{max}}$	[9.4]
------------------------------	-------

U dnevnom dijagramu opterećenja razlikujemo „konstantnu“ i „varijabilnu energiju“, slika 9-9. Konstantnom energijom nazivamo onaj dio energije koja se može proizvesti snagom koja je jednaka minimalnom opterećenju, dok za proizvodnju varijabilne energije moramo upotrijebiti snagu jednaku razlici između P_{max} i P_{min} , slika 9-8. Vrijedi pritom:

$W_k = 24 P_{min}$	[9.5]
--------------------	-------

i

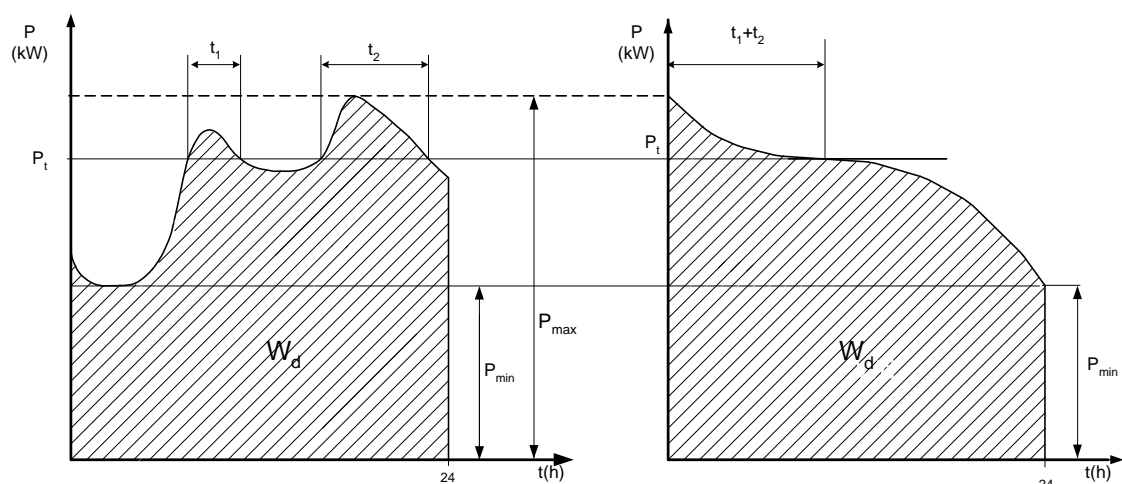
$W_v = W_d - W_k$	[9.6]
-------------------	-------



Slika 9-9 Podjela dijagrama opterećenja na konstantnu i varijabilnu energiju

Elektrane koje zadovoljavaju potrošnju u gornjem dijelu dnevnog dijagrama opterećenja nazivaju se „vršnim elektranama“, a one koje imaju zadatak da rade za potrošnju u donjem dijelu dijagrama, „temeljnim elektranama“.

Radi nepogodnog oblika dnevnog dijagrama opterećenja u analizama se najčešće taj dijagram zamjenjuje „krivuljom trajanja opterećenja“, slika 9-10, u kojoj su opterećenja poredana po veličini, a ne po kronološkom redu kao u dijagramu opterećenja, pa je uporaba te krivulje opravdana u svim slučajevima kad nas zanima samo trajanje i veličina pojedinih opterećenja, a ne i njihov vremenski raspored.

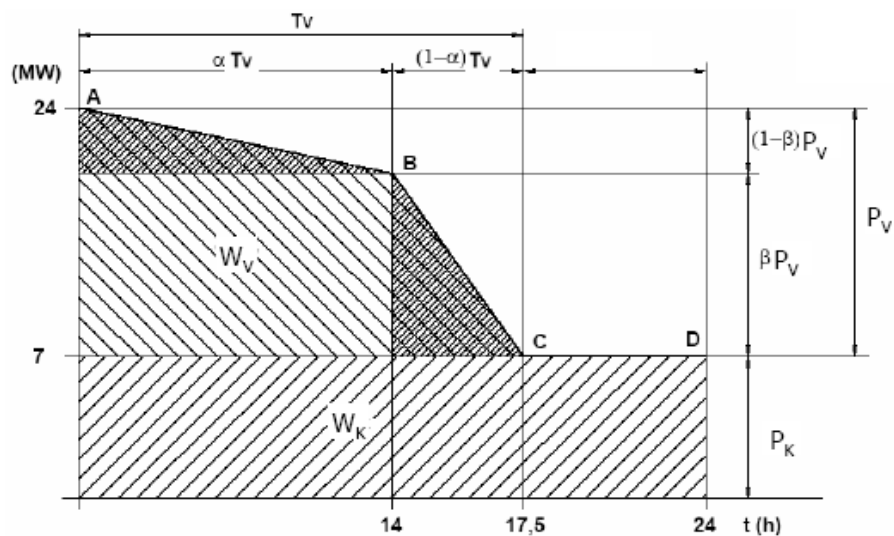


Slika 9-10 Konstrukcija dnevne krivulje trajanja opterećenja iz dnevnog dijagrama opterećenja

U elektroenergetskim analizama krivulja trajanja često se aproksimira (nekim) analitičkim izrazom, npr.:

$P = P_{\max} \left[1 - (1 - m_0) \cdot \left(\frac{t}{24} \right)^{\frac{m-m_0}{1-m}} \right]$	[9.7]
---	-------

ili se, još češće, aproksimira trima pravcima, slika 9-11, tako da ploština površine ispod aproksimirane krivulje odgovara stvarnim potrebama energije, u promatranom razdoblju, i to posebno potrebama varijabilne, a posebno potrebama konstantne energije. Isto tako podaci za maksimalnu, konstantnu i varijabilnu snagu u krivulji trajanja odgovaraju stvarnim snagama u dijagramu opterećenja.



Slika 9-11 Aproksimacija dnevne krivulje opterećenja s tri pravca

Polazeći od konstrukcije prikazane na slici 9-11, uvažavajući spomenuti uvjet da količina varijabilne energije u aproksimiranoj krivulji trajanja opterećenja bude jednaka količini te energije u stvarnoj krivulji trajanja opterećenja, uvodimo bezdimenzijske faktore α i β kojima određujemo položaj točke B, odnosno odnos između koeficijenata α i β :

$$W_v = [(1-\beta) P_v \cdot \alpha \cdot T_v + \beta \cdot P_v \cdot (1-\alpha) \cdot T_v] / 2 + \alpha \cdot T_v \cdot \beta \cdot P_v, \text{ ili}$$

$$W_v = [(1-\beta) \cdot P_v \cdot \alpha \cdot T_v - \beta \cdot P_v \cdot (1-\alpha) \cdot T_v] / 2 + \beta \cdot T_v \cdot P_v$$

Sređivanjem dobivamo:

$\alpha + \beta = \frac{2W_v}{T_v P_v}$ $0 \leq \alpha \leq 1; 0 \leq \beta \leq 1; 0 \leq (\alpha + \beta) \leq 2;$	[9.8]
--	-------

gdje su α i β veličine kojima je određen položaj točke B, a njome i oblik aproksimirane krivulje trajanja opterećenja. Postavljajući da je faktor opterećenja

$m = \frac{W_v + W_k}{24(P_k + P_v)}$	[9.9]
---------------------------------------	-------

i da je

$k = \frac{P_k}{P_{\max}}$	[9.10]
----------------------------	--------

možemo [9.8] pisati u obliku

$\alpha + \beta = 2 \cdot \frac{24}{T_v} \cdot \frac{m - k}{1 - k}$	[9.11]
---	--------

Neka je $T_v = 17,5$ sati/dan, a αT_v 14 sati/dan, slika 9-11, α je onda 0,80. Iz [9.11], znajući m i k , ili iz [9.8], može se odrediti i veličina β : $\beta = 0,65$.

Iznos varijabilne snage određujemo određujući prvo jednadžbu pravca kroz dvije točke (jednadžbe dvaju pravaca):

- pravac kroz točke A i B i
- pravac kroz točke B i C.

Jednadžba je pravca kroz dvije točke:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1),$$

pa za prvi dio krivulje trajanja, dužina AB, vrijedi:

$$y = P(t), x = t; 0 \leq t \leq \alpha T_v;$$

točka A: $(x_1, y_1) = (0, P_k + P_v)$; točka B: $(x_2, y_2) = (\alpha T_v, P_k + \beta P_v)$.

Dobivamo da su vrijednosti varijabilne snage, u tom dijelu krivulje trajanja opterećenja, jednake:

$P(t) - (P_k + P_v) = \frac{(P_k + \beta P_v) - (P_k + P_v)}{\alpha T_v - 0} (t - 0) \Rightarrow$ $P(t) = P_k + P_v + \frac{P_v(\beta - 1)}{\lambda T_v} t$	[9.12]
---	--------

Za drugi dio krivulje trajanja, dužina BC, vrijedi:

$$y = P(t), x = t; \alpha T_v \leq t \leq T_v;$$

točka B: $(x_1, y_1) = (\alpha T_v, P_k + \beta P_v)$; točka C: $(x_2, y_2) = (T_v, P_k)$.

Dobivamo da su vrijednosti varijabilne snage jednake:

$P(t) - (P_k + \beta P_v) = \frac{P_k - (P_k + \beta P_v)}{T_v - \alpha T_v} (t - \alpha T_v) \Rightarrow$ $P(t) = P_k + \beta P_v + \frac{\beta P_v}{T_v - \alpha T_v} (t - \alpha T_v)$	[9.13]
---	--------

Konačno, za posljednji dio krivulje trajanja, dužina CD, vrijedi:

$$T_v \leq t \leq 24;$$

$P(t) = P_k = \text{konst.}$	[9.14]
------------------------------	--------

Uloga i režim rada pojedine elektrane u elektroenergetskom sustavu ovise o sposobnosti elektrane da se prilagodi brzim promjenama opterećenja (najbolje se mogu prilagoditi akumulacijske hidroelektrane i termoelektrane s plinskim turbinama), te o ispunjenju zahtjeva da se potrebna energija proizvede uz što niže troškove (maksimalno iskorištenje raspoložive vode, što veća proizvodnja u termoelektranama s malim specifičnim troškovima za gorivo). Uloga hidroelektrana pritom nije unaprijed čvrsto određena. U kišnom razdoblju godine velika većina hidroelektrana (osim onih s vrlo velikim akumulacijama) rade kao temeljne elektrane, a termoelektrane se što je moguće više koriste kao vršne elektrane. U sušnom razdoblju uloge se zamjenjuju. Osim toga, uloga elektrana mijenja se i s razvojem sustava. Starije termoelektrane rade sve više kao vršne (jer imaju veće specifične troškove za gorivo), a nove termoelektrane preuzimaju ulogu temeljnih.

9.2 Energetske značajke elektrana

Instalirana snaga osnovna je značajka svake elektrane. Ona se definira kao aritmetička suma nazivnih snaga generatora (u MVA), odnosno kao aritmetička suma snaga turbina, mjerenih na stezaljkama generatora (u MW). Instalirana je snaga, dakle, nazivna snaga elektrane.

Maksimalna snaga najveća je snaga koju elektrana kao cjelina može proizvesti uz pretpostavku da su svi njezini dijelovi sposobni za pogon. Za hidroelektranu se uz to pretpostavlja i da su protok i pad optimalni, a za termoelektranu da joj stoji na raspolaganju dostatna količina ugljena određene kvalitete i dostatna količina vode normalne temperature i

čistoće za hlađenje kondenzatora. Pri određivanju maksimalne snage ne postavlja se zahtjev da se postigne optimalni stupanj djelovanja, ali se uzimaju u obzir utjecaji svih dijelova postrojenja: dimenzije dovoda, tlačnog cjevovoda, odvoda i slično u hidroelektranama, kapacitet dopreme i mljevenja ugljena, učin kotlova, kapacitet odvoda pepela, dovoda vode i slično u termoelektranama. Razlikuje se maksimalna snaga na stezaljkama generatora (maksimalna bruto-snaga) i maksimalna snaga na pragu elektrane (maksimalna neto-snaga).

Raspoloživa snaga najveća je snaga koju elektrana može proizvesti u nekom trenutku, polazeći od stvarnog stanja u elektrani (kvarovi, popravci i pregledi), a uz pretpostavku da nema ograničenja zbog proizvodnje jalove snage. Pri određivanju raspoložive snage treba kod hidroelektrane uzeti u obzir raspoloživi dotok i pad, a kod termoelektrane kvalitetu ugljena, količinu i temperaturu vode. I ovdje se razlikuje raspoloživa snaga na stezaljkama generatora i na pragu elektrane.

Maksimalno i minimalno godišnje opterećenje elektrane određuje se iz pogonskih podataka elektrane ili iz konstruirane godišnje krivulje trajanja opterećenja. U većini praktičkih slučajeva – za elektrane koje rade u većim elektroenergetskim sustavima – maksimalno je godišnje opterećenje jednako ili skoro jednako maksimalnoj snazi, dok je minimalno opterećenje jednako nuli (zbog godišnjeg pregleda). Dakle, odnos između minimalnog i maksimalnog opterećenja za elektrane nema značenja, ali zanimljivo je poznavati faktor opterećenja elektrane (m) i faktor iskorištenja elektrane (n).

Faktor opterećenja elektrane m definiran je kao omjer električne energije proizvedene u promatranoj godini i električne energije koja bi se proizvela da je elektrana kroz cijelu tu godinu bila pod maksimalnim opterećenjem. Ako se s $P_{g,max}$ označi maksimalno opterećenje elektrane u tijeku promatrane godine u megavattima, a s W_g godišnja proizvodnja elektrane u megavattsatima u istom razdoblju, faktor opterećenja elektrane izračunava se po formuli:

$m = \frac{W_g}{8760 P_{g,max}}$	[9.15]
----------------------------------	--------

jer godina ima 8760 sati.

Faktor iskorištenja n dobiva se iz analognog izraza ako se umjesto maksimalnog opterećenja $P_{g,max}$ u formulu [9.15] uvrsti maksimalna snaga elektrane ($P_{e,max}$):

$n = \frac{W_g}{8760 P_{e,max}}$	[9.16]
----------------------------------	--------

Trajanje korištenja. Opterećivanje odnosno iskorištavanje elektrane često se karakterizira trajanjem korištenja maksimalnog godišnjeg opterećenja ($t_{g,max}$) i trajanjem korištenja maksimalne snage ($t_{e,max}$). Ove dvije veličine (dva trajanja) mogu se definirati kao vrijeme potrebno da se snagom $P_{g,max}$, odnosno snagom $P_{e,max}$ proizvede energija W_g . Veličine $t_{g,max}$ i $t_{e,max}$ mogu se (u satima) izračunati prema formulama:

$t_{g,\max} = \frac{W_g}{P_{g,\max}}$	[9.17]
---------------------------------------	--------

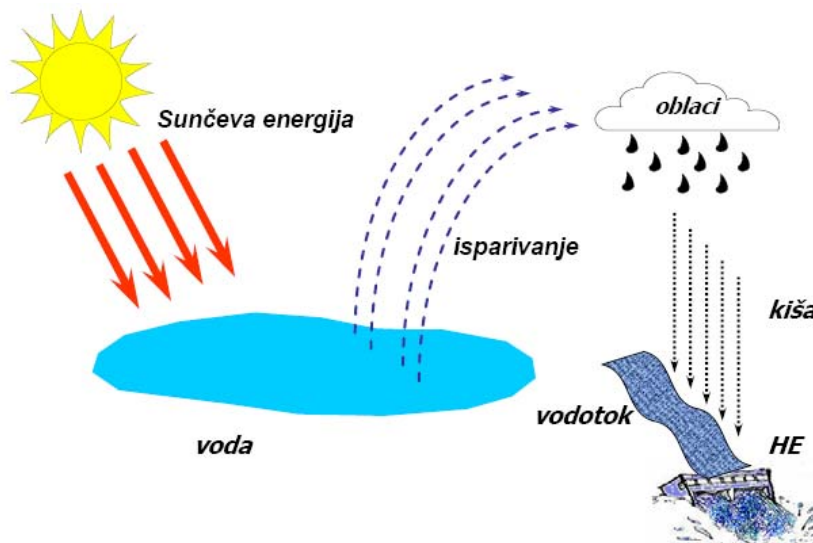
$t_{e,\max} = \frac{W_g}{P_{e,\max}}$	[9.18]
---------------------------------------	--------

Treba naglasiti da ni $t_{g,\max}$ ni $t_{e,\max}$ ne predstavljaju stvarno trajanje pogona elektrane, već samo vrijeme koje bi bilo potrebno da se uz maksimalno opterećenje, odnosno snagu, proizvede količina energije W_g . Trajanje korištenja akumulacijskih hidroelektrana je 2000 – 3000 h/god, protočnih i do 6000 h/god, a termoelektrana između 1000 (stare) i 6500 h/god (nove).

Faktori trajanja korištenja mogu se odrediti prema snazi ili opterećenju na priključnicama generatora ili na pragu elektrane. U prvom slučaju treba u izraze [9.17] i [9.18] uvrstiti godišnju proizvodnju na priključnicama generatora, a u drugom slučaju godišnju proizvodnju na pragu elektrane.

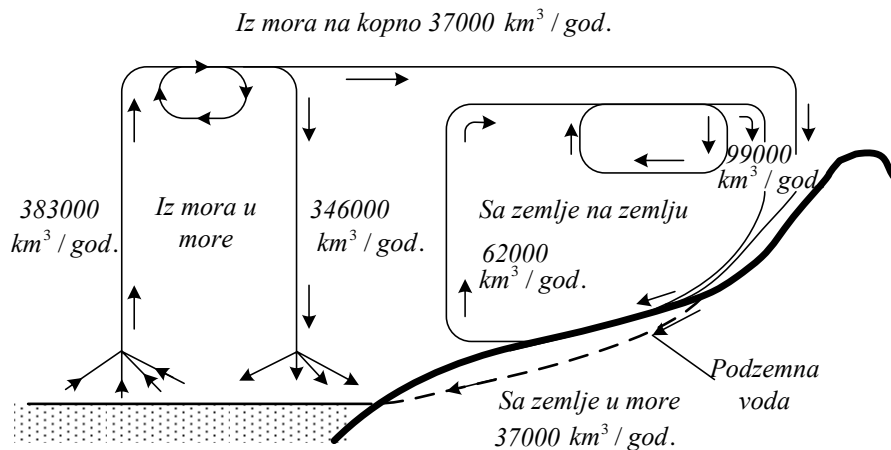
9.3 Gravitacijska potencijalna energija vode i iskorištavanje energije vodotoka

Sunčeva energija, koja dopire do Zemljine površine, izaziva isparivanje vode na površinama oceana, jezera i rijeka, ali i na površini tla i iz biljaka, slika 9-12.



Slika 9-12 Isparivanje vode i korištenje gravitacijske potencijalne energije vode (vodotoka)

Ta se voda podiže u obliku vodene pare od koje se u visinama formiraju oblaci. Iz oblaka pada kiša na tlo pa i ta voda ima (gravitacijsku) potencijalnu energiju u odnosu prema morskoj razini. Međutim, samo se manji njezin dio može energetski iskoristiti jer je potrebna određena koncentracija vode, a to se ostvaruje u vodotocima (rijeke, potoci), slika 9-13.



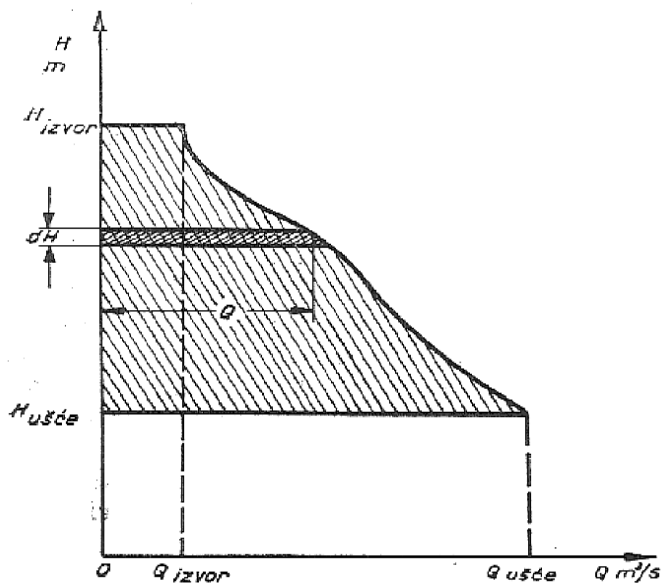
Slika 9-13 Procijenjeni prirodni kružni proces vode

Naime, samo dio padalina stiže u vodotoke, a ostalo preuzimaju biljke ili se neposredno isparuje, a velik dio odlazi u unutrašnjost tla pa se s većim ili manjim vremenskim zakašnjenjem javlja na površini u nekom vodotoku.

Za svaku točku vodotoka (profil vodotoka) određuje se, na osnovi topografije zemljišta, površina zemljišta (oborinsko područje) s kojega voda dotječe u vodotok. Omjer količine vode koja se tijekom godine pojavljuje u vodotoku (na promatranom profilu) i količine padalina na oborinsko područje (koje odgovara promatranom profilu) naziva se „faktorom otjecanja“. Faktor otjecanja ovisi o topografskim, geološkim i klimatskim uvjetima. Kreće se u širokom granicama (od 0,25 do 0,95); u strmim područjima, a pogotovo u hladnim razdobljima godine, faktor otjecanja može se približiti vrijednosti 1, dok u nizinskim predjelima u toplim razdobljima postiže i vrlo niske vrijednosti.

Količina vode, koja protječe vodotokom u jedinici vremena (protok, m^3/s), nije prema tome konstantna već ovisi o vremenskom rasporedu padalina (oborina), o temperaturi (topljenju snijega, isparivanju), o pritocima, o količini vode koja podzemnim putovima dotječe vodotoku, o vlažnosti pojedinih godina itd., pa, da bi se odredile energetske mogućnosti iskorištavanja vodotoka, valja uzeti u obzir protoke u nizu godina kako bi se u izračunavanje uključile sve situacije koje se mogu pojaviti. To je pogotovo važno kad se radi o hidroelektranama koje rade u istom elektroenergetskom sustavu i koje su izgrađene na vodotocima različitih hidroloških karakteristika.

Idući od izvora prema ušću vodotoka prosječni višegodišnji protok sve više raste, jer sve više raste oborinsko područje, pa su i količine vode od oborina koje gravitiraju vodotoku sve veće. Istodobno, od izvora prema ušću, kota razine vode postaje sve manja. Svakom profilu vodotoka odgovara stoga određena kota H (visina iznad površine mora u metrima) i određeni srednji višegodišnji protok Q (m^3/s), pa se svaki vodotok može prikazati Q, H – dijagramom vodotoka, slika 9-14.



Slika 9-14 Primjer Q,H – dijagrama vodotoka

Kad se iskorištava gravitacijska potencijalna energija vode (vodotoka) između dvije (bilo koje) kote, govorimo o korištenju vode na padu koji je jednak razlici kote. Snagu vodotoka možemo onda odrediti ovako. Gravitacijska je potencijalna energija vode mase m (kg) na padu dH (m) jednaka:

$dW = mgdH \left[kg \frac{m}{s^2} m \equiv Nm \equiv J \right]$	[9.19]
--	--------

Podijelimo li tu energiju s vremenom, dobivamo snagu:

$\frac{dW}{t} = dP = mgdH \left[\frac{kg}{s} \frac{m}{s^2} m \equiv \frac{J}{s} \equiv W \right] = 9,81 Q dH [kW]; g \approx 9,81 \frac{m}{s^2};$ $\frac{m}{t} = \dot{m} \left[\frac{kg}{s} \right] = \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot Q \left[\frac{m^3}{s} \right]; \rho_{vode} \approx konst. = 1000 \frac{kg}{m^3}; kW = 1000W$	[9.20]
--	--------

uvrsti li se Q u m^3/s , a H u m. Integriranjem u granicama između kote ušća (H_u) i kote izvora (H_i), dobiva se snaga vodotoka:

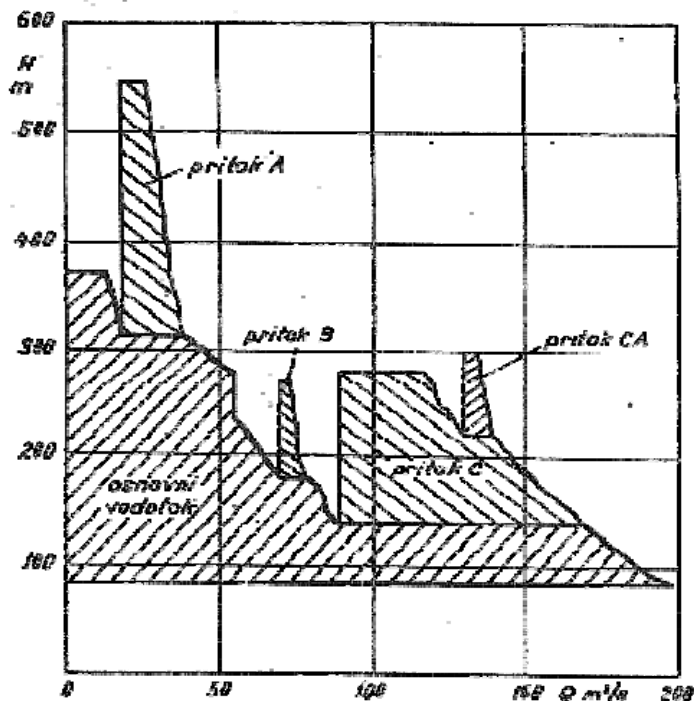
$P = 9,81 \int_{H_u}^{H_i} Q(H) dH [kW]$	[9.21]
--	--------

Ovako određena snaga srednja je snaga koju ima voda u promatranom vodotoku jer je račun proveden sa srednjim višegodišnjim protokom. Vjerojatna (moguća) je dakle godišnja energija vodotoka:

$W = 8760 P [kWh]$	[9.22]
--------------------	--------

gdje je 8760 broj sati u godini. Prema tome i srednja snaga i godišnja energija vodotoka proporcionalne su ploštini površine u Q, H – dijagramu, određenoj apscisama H_1 i H_2 , osi ordinate i krivuljom, slika 9.14, a ukupna moguća energija ovisi i o stalnosti pretpostavljenog protoka i raspoloživosti pretpostavljenog pada vode.

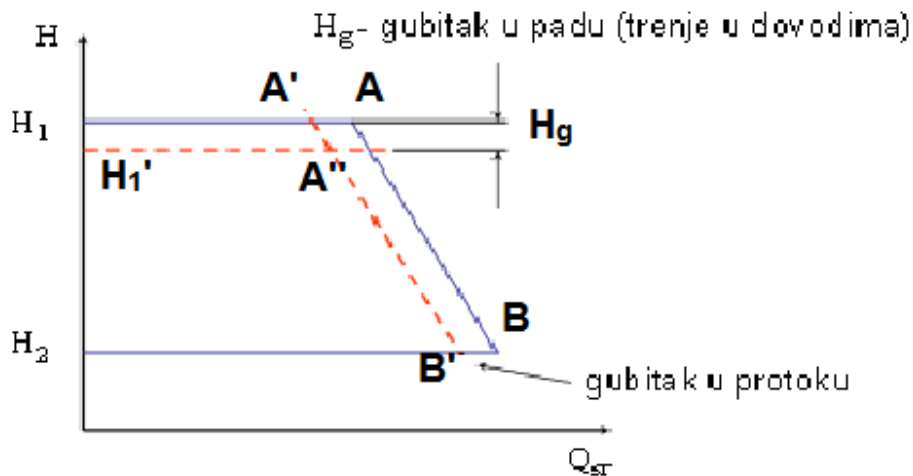
Pomoću Q, H – dijagrama mogu se pokazati i vodotoci s pritocima, slika 9-15.



Slika 9-15 Primjer Q, H – dijagrama za vodotok s pritocima

Tako se određena količina energije naziva brutoenergija vodotoka, odnosno bruto vodne snage kad se količina energije odnosi na neko područje.

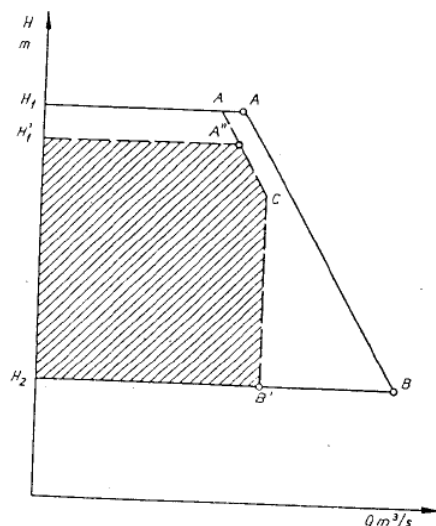
Pri utvrđivanju srednje snage i godišnje energije vodotoka pomoću Q, H – dijagrama pretpostavljeno je da je sva voda energetski iskoristiva, od izvora do ušća, u jednoj hidroelektrani ili u više njih, te da se potencijalna energija vode transformira u električnu energiju bez gubitaka. Osim toga, kad se određuju bruto vodne snage nekog područja, računa se i na gornji dio toka gdje su, normalno, male količine vode, s velikim oscilacijama protoka, i na donji dio vodotoka gdje se, pogotovo u nizinskim rijekama, pretpostavljaju mogućnosti iskorištavanja malih padova. U praktičnom iskorištenju potencijalne energije vode nije međutim ispunjena nijedna od pretpostavki. Protok je vrlo promjenljiv, pa se praktički nikada ne gradi hidroelektrana tolikog kapaciteta koja bi mogla iskoristiti svu vodu i u razdobljima vrlo velikih protoka, jer u ostalim razdobljima strojevi ne bi mogli raditi punom snagom. Zbog toga je i količina vode koja služi za dobivanje električne energije manja od količine vode koja protječe vodotokom, pa je i srednji iskoristivi protok manji od srednjega višegodišnjeg protoka. Srednji se iskoristivi protok može unijeti u Q, H – dijagram, slika 9-16. Ako je AB dio Q, H – dijagrama između kota H_1 i H_2 , među kojima se iskorištava potencijalna energija vodotoka, smanjenjem apscisa za količinu neiskorištene vode dobiva se korigirani Q, H – dijagram ($A'B'$ na slici 9-16).



Slika 9-16 Tehnički iskoristiva energija vodotoka $H_1'A''B'H_2$

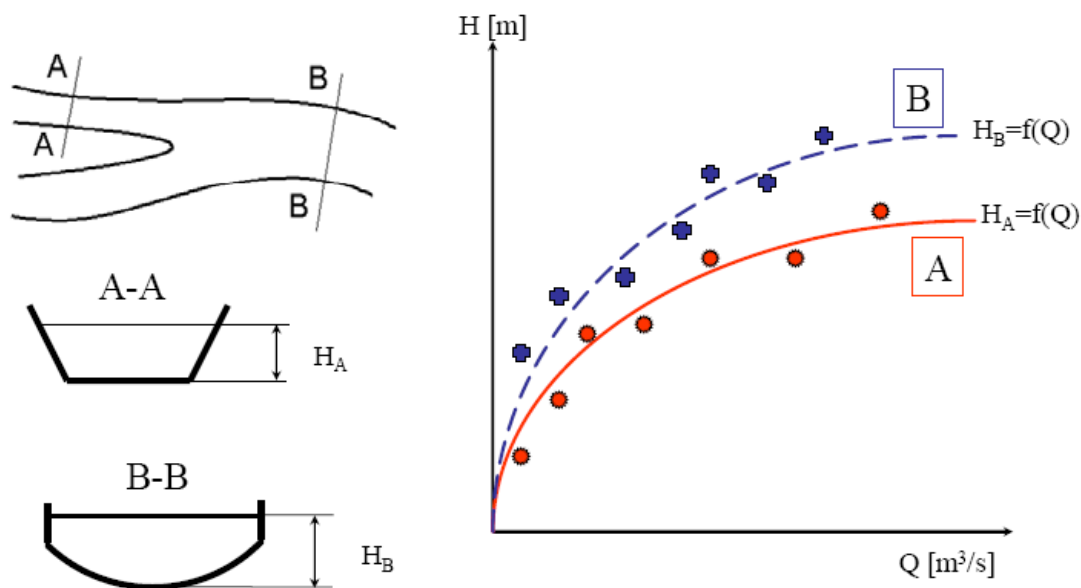
To što se ne može upotrijebiti sva voda vrijedi i za cijeli raspoloživi pad zbog gubitaka energije (svladavanje sila trenja) u različitim dovodima vode do hidroelektrane; te gubitke, u što ćemo se uvjeriti, možemo predstaviti gubicima pada. Zbog toga valja računati da se voda iskorištava na padu između kota H_1' i H_2 umjesto između kota H_1 i H_2 . Uzevši sve to u obzir, iskoristiva je energija proporcionalna ploštini površine $H_1'A''B'H_2$ u Q, H – dijagramu. Tako definirana energija naziva se „tehnički iskoristivom energijom“, a promatrajući cijeli vodotok – „tehnički iskoristivom energijom vodotoka“. Zbroj tehnički iskoristivih energija vodotoka na nekom području daje njegove „tehničke iskoristive vodne snage“.

Prikaz na slici 9-16 vrijedi samo kad se potencijalna energija vode iskorištava u pribranskoj hidroelektrani. Radi li se o derivacijskoj hidroelektrani, prema rečenome, valja korigirati Q, H – dijagram budući da ostaje neiskorišteni dotok koji se pojavljuje na potezu CB: između kote smještaja brane i strojarnice hidroelektrane, slika 9-17. Za derivacijski tip hidroelektrane još je veća dakle razlika između tehnički iskoristive i brutoenergije vodotoka.



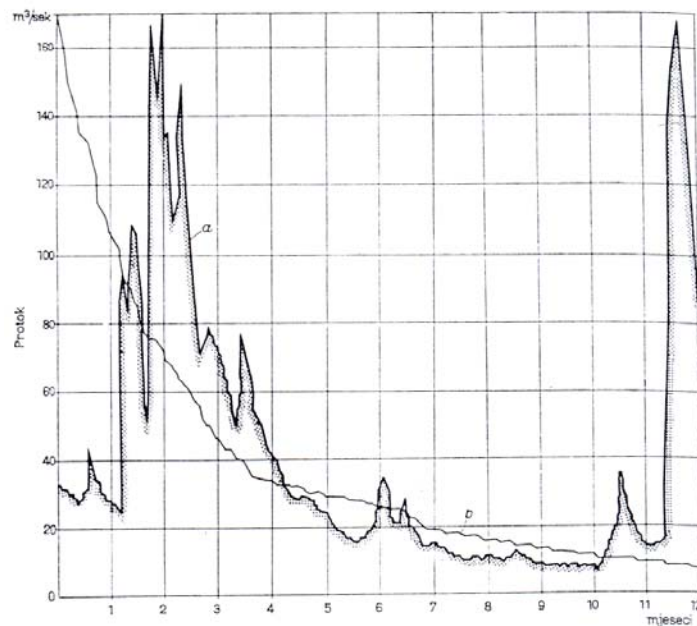
Slika 9-17 Tehnički iskoristiva energija vodotoka između kota H_1 i H_2 za derivacijski tip hidroelektrane

Količina vode u vodotoku, kao i vremenski raspored vode u vodotoku, ovisi o nizu utjecaja (o oborinama, sastavu i topografiji zemljišta, temperaturi zraka, biljnom pokrivaču i dr.), pa kao osnova za utvrđivanje količine voda mogu poslužiti samo svakodnevna mjerenja količine vode. Mjerenja se provode pomoću „vodokaza“ na kojima se očitava visina razine vode. Ta se visina naziva „vodostaj“. Pomoću poznate visine vodostaja može se iz tzv. „konsumpcijske krivulje“ očitati protok vode (Q u m^3/s). Konsumpcijske krivulje, slika 9-18, konstruiraju se na temelju mjerenja, a ovise o obliku korita na mjestu vodokaza.



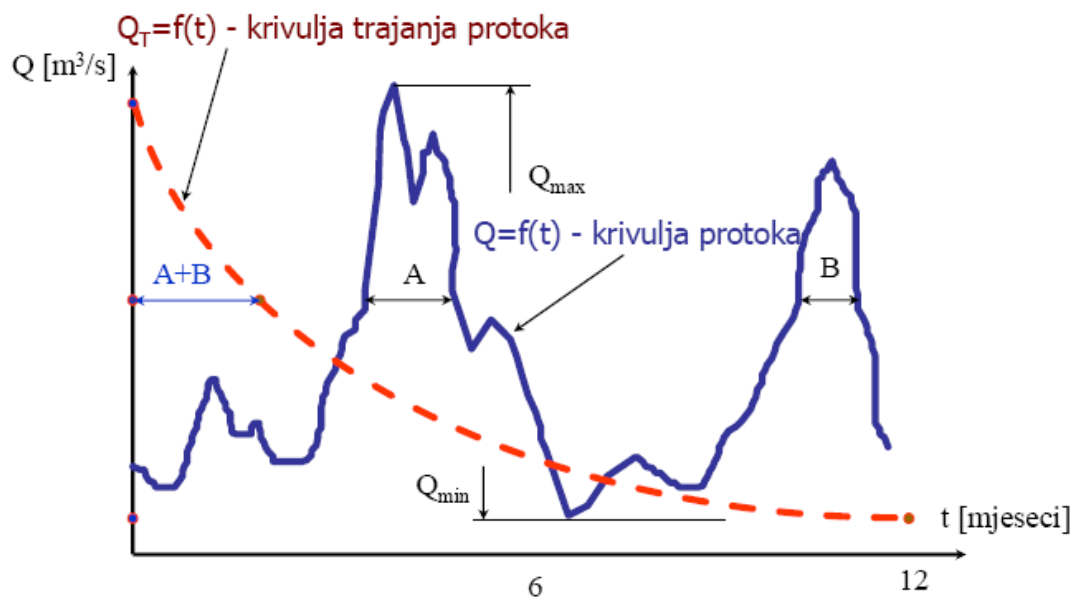
Slika 9-18 Konsumpcijske krivulje za dva profila

Na osnovi srednjih dnevnih protoka može se nacrtati godišnji dijagram protoka, slika 9-19, krivulja a, u kojem su kronološki poredani protoci. Pomoću podataka o dnevnim protocima mogu se odrediti srednji desetodnevni protoci (dekadni protoci), srednji mjesečni protoci i, konačno, srednji godišnji protok. Svi ti srednji protoci određuju se kao aritmetičke sredine dnevnih protoka u promatranom razdoblju.



Slika 9-19 Godišnji dijagram protoka rijeke: a) krivulja protoka; b) krivulja trajanja protoka

Ako se nacrti i dijagram u kojem su dnevni protoci uneseni redom po veličini od najvećeg do najmanjeg, slika 9-20, dobiva se „krivulja trajanja protoka“ (slika 9-19, krivulja b).



Slika 9-20 Konstrukcija krivulje trajanja protoka

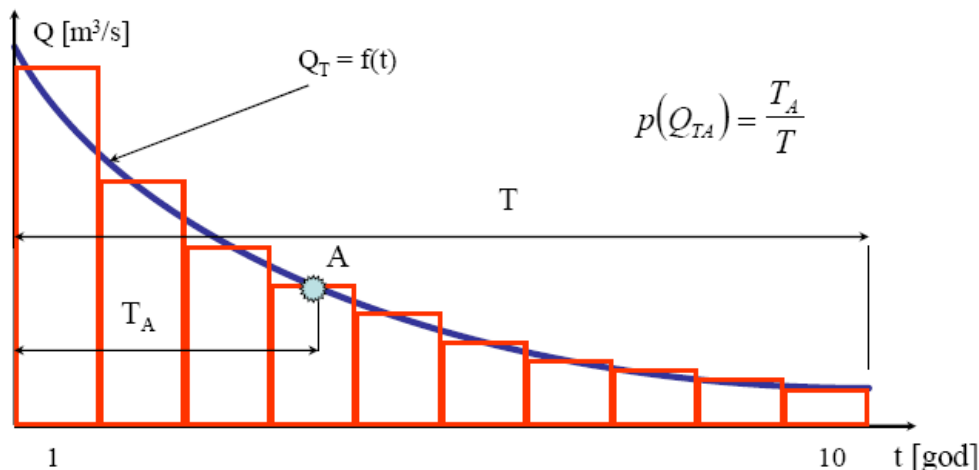
Integriranjem godišnjeg dijagrama protoka ili krivulje trajanja protoka (što daje isti rezultat) dobiva se volumen vode (V_0) koji je protekao kroz promatrani profil u promatranoj godini. Pri tome kao apscisu treba uzeti protekli broj sekunda.

Srednji je godišnji protok tada jednak:

$V_0 = \int_0^{12} Q(t) dt [m^3] \quad Q_{sr} = \frac{V_0}{31,54 \cdot 10^6} \left[\frac{m^3}{s} \right]$	[9.23]
--	--------

gdje je V_0 volumen u m^3 , a $31,54 \cdot 10^6$ broj sekunda u godini.

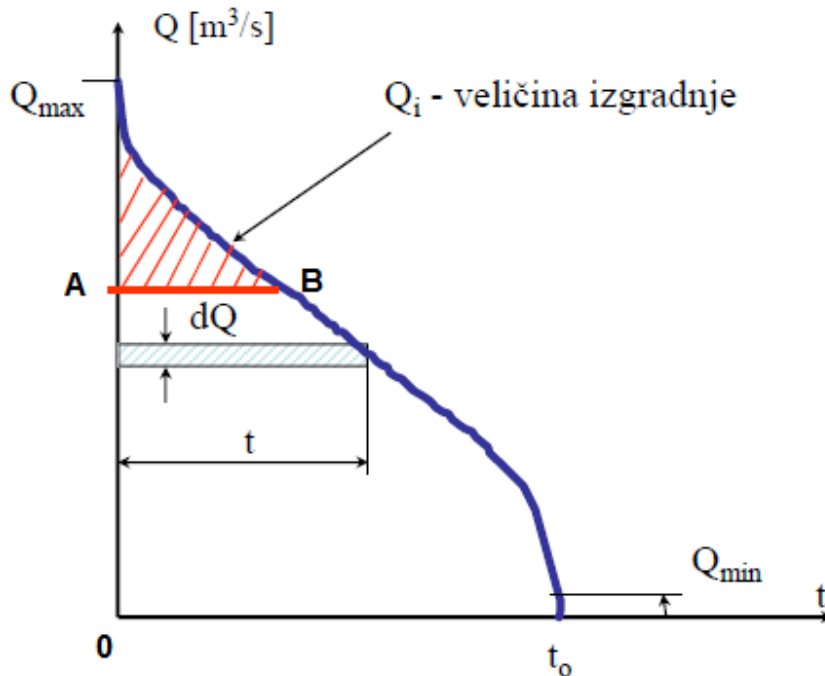
Promatranje protoka u samo jednoj godini može dovesti do krivih zaključaka o količinama i rasporedu voda u promatranom vodotoku, pa je potrebno promatranje protegnuti na dulje vremensko razdoblje. Tako možemo za svaku od promatranih godina odrediti srednji godišnji protok, pa prema tome možemo klasificirati godine i po vlažnosti. Osim krivulja trajanja protoka u kojima su uneseni podaci cijele godine, mogu se nacrtati krivulje trajanja protoka za pojedina razdoblja u godini (zima i ljeto, ili sušno i kišno razdoblje), ili krivulja trajanja za pojedine mjesece. Želi li se, npr., nacrtati krivulja trajanja za mjesec siječanj, uvažit će se podaci za sve siječnje u promatranom razdoblju. Poznavajući takve podatke za dulji niz godina određuje se, koristeći se nekom od brojnijih razvijenih statističkih (vjerojatnosnih) metoda, vjerojatnost pojave određenog protoka. Najjednostavnija među metodama, kojom ćemo se služiti u našim razmatranjima, jest određivanje vjerojatnosti pojave protoka pomoću krivulje trajanja srednjeg višegodišnjeg protoka, slika 9-21, budući da ta vjerojatnost odgovara relativnom trajanju protoka; točnost je to veća što je dulje razdoblje kroz koje su prikupljeni podaci o stvarnim protocima.



Slika 9-21 Krivulja trajanja srednjeg višegodišnjeg protoka predstavlja ujedno i vjerojatnosnu krivulju: vjerojatnost pojave protoka Q_{TA} jednaka je omjeru vremena T_A i ukupnog vremena promatranja (na apscisu možemo nanijeti pripadajuće vjerojatnosti)

S obzirom da je protok u vodotocima vrlo promjenljiv, hidroelektrane se grade za ograničenu propusnu moć dovodnih organa i turbina određenu energetske-ekonomskim analizama. Najveći protok koji se može iskoristiti u turbinama nazvan je „instaliranim protokom“ (ili „veličinom izgradnje“), Q_i , slika 9-22. Kako je instalirani protok obično manji od maksimalnog, pri velikim vodama (vodostajima) prelijeva se neiskorištena voda preko brane i sva se energija vodotoka ne iskorištava. Da bi se smanjili ili izbjegli preljevi, grade se akumulacijska jezera koja zadržavaju vodu pri velikim protocima a ona se iskorištava u hidroelektranama za vrijeme suše. Pritom, da bi se ustanovili svi parametri nužni za određivanje instaliranog protoka, potrebno je pratiti hidrološki režim vodotoka kroz 30-40

godina, jer su rasporedi protoka unutar godine i srednji godišnji protoci znatno ovisni o vlažnosti godine.



Slika 9-22 Veličina izgradnje hidroelektrane

Dakle je iskorištenje vode vodotoka ograničeno veličinom izgradnje hidroelektrane Q_i kojoj odgovara, nazovimo to tako, iskoristivi volumen vode V_i

$V_i = \int_0^{t_0} t dQ$	[9.24]
---------------------------	--------

prikazan površinom $0ABt_0$ na slici 9-22.

Kada se poznaje iskoristivi volumen (V_i), moguće je odrediti i srednji iskoristivi protok:

$Q_{si} = \frac{V_i}{t_0} = \frac{V_i}{31,54 \cdot 10^6} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$	[9.25]
--	--------

Srednji iskoristivi protok (Q_{si}) manji je od srednjeg protoka vodotoka (Q_{sr}), a njihov omjer α daje „stupanj iskorištenja vode vodotoka“.

$\alpha = \frac{Q_{si}}{Q_{sr}} = \frac{V_i}{V_0}$	[9.26]
--	--------

Instalirani protok za protočne i derivacijske hidroelektrane uobičajeno se uzima unutar granica $1,5Q_{sr} < Q_i < 2,5Q_{sr}$, a za akumulacijske i vršne hidroelektrane unutar granica $2Q_{sr} < Q_i < 4Q_{sr}$. (Razvijene zemlje imaju i veće instalirane protoke.)

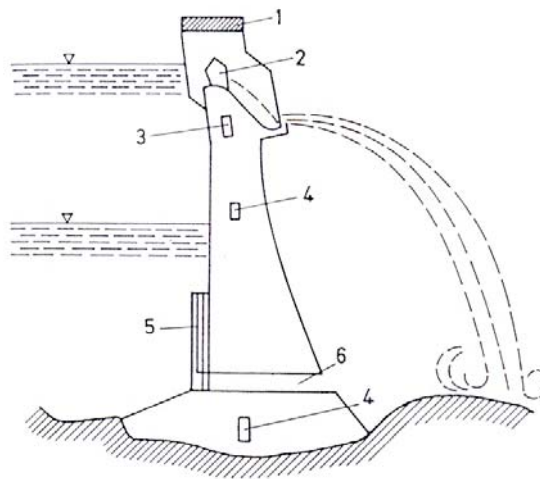
9.4 Osnovni dijelovi i podjela hidroelektrana

Osnovni su dijelovi hidroelektrana ovi: brana ili pregrada, zahvat i dovod vode, vodna komora ili vodostan, tlačni cjevovod, strojarnica (turbine, generatori) i odvod vode. Prema tipu hidroelektrane neki od ovih dijelova mogu potpuno izostati, a u drugim slučajevima može isti dio preuzeti više funkcija.

Brane ili **pregrade** su građevine koje imaju višestruku namjenu: da skrenu vodu s njezinog prirodnog toka prema zahvatu hidroelektrane, da povise razinu vode povećavajući tako gustoću gravitacijske potencijalne energije, i da omoguće akumuliranje vode. Naime, većina se (velikih) hidroelektrana opskrbljuje vodom iz akumulacijskih jezera koja su pritom često ujedno i rekreacijska jezera. Sastavni su dijelovi pregrade (brane): tijelo pregrade i elementi za regulaciju vodenog tijeka (preljevi, ispusti, prelivna polja (zapornice) i temeljni ispust).

Dva su osnovna tipa brana - niske i visoke. Visoke su brane one čija je visina, od temelja do krune (vrha brane), veća od 15 m, te brane više od 10 m, ali s krunom duljom od 500 m. Sve ostale brane su niske. Odluka o tome koja će se vrsta brana graditi ovisi o geološkom sastavu terena i o veličini brane. Brane mogu biti masivne i nasute, ovisno o materijalu od kojega se grade.

Masivne brane grade se od kamena, a češće od armiranog betona. Prema konstrukciji, masivne se brane mogu podijeliti na gravitacijske, lučne i raščlanjene. Gravitacijske brane odupiru se opterećenju vode i drugim silama vlastitom težinom. Lučne brane su zakrivljene ploče preko kojih se opterećenje dijeli na temelje, dno i bokove. Ponekad imaju neke elemente gravitacijske brane, pa se zovu lučno-gravitacijske, slika 9-23.

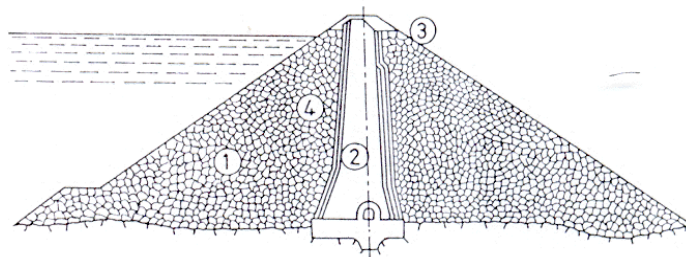


Slika 9-23 Lučno-gravitacijska brana: 1 - kruna brane, 2 - preljev, 3 - kontrolni hodnik, 4 - kontrolne prostorije, 5 – zapornica (djeluje poput ventila), 6 - temeljni ispust

Lučne brane ponekad se izvode kao dijelovi rotacijskih tijela, i zovu se luskaste ili kupolne brane.

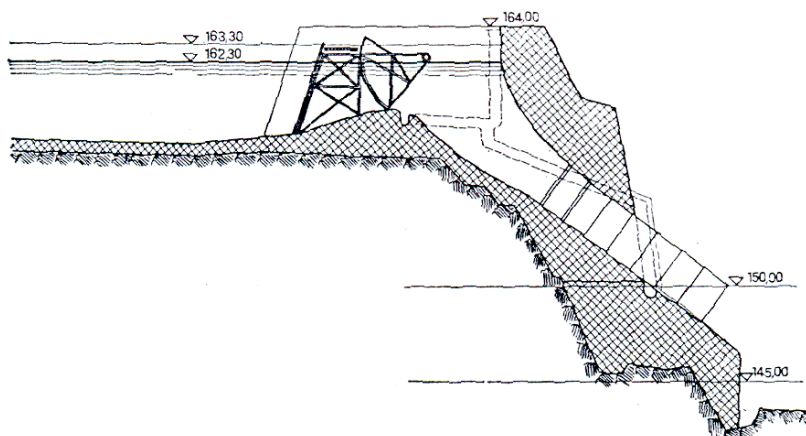
Raščlanjene brane čini više elemenata, odnosno stupova ili potpora na koje se naslanjaju betonske ploče ili svodovi. Nasute brane su zemljane, a grade se od homogenog ili nehomogenog materijala. U homogene materijale ubrajaju se lapor, zemlja i pijesak s 15-25%

gline. Češće se grade brane od nehomogenog materijala u slojevima od gline do kamenog nasipa, slika 9-24.



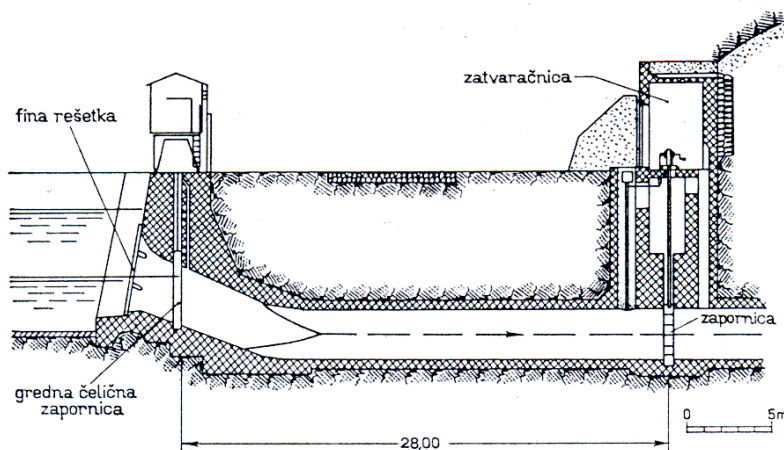
Slika 9-24 Nasuta brana: 1- kameni nasip, 2 - glinena jezgra, 3 - završni nasip, 4 – filtrarski slojevi

Zahvat vodu zaustavljen pregradom (branom) usmjerava prema dovodu (strojarnici hidroelektrane). Razlikuju se dva osnovna tipa zahvata: zahvat na površini i zahvat ispod površine vode. Zahvat na površini vode, slika 9-25 izvodi se kada je pregrada niska pa je razina vode iza pregrade praktički konstantna. Prolaz vode kroz zahvat regulira se **zapornicama**.



Slika 9-25 Zahvat na površini (derivacijska, protočna HE „Kraljevac“)

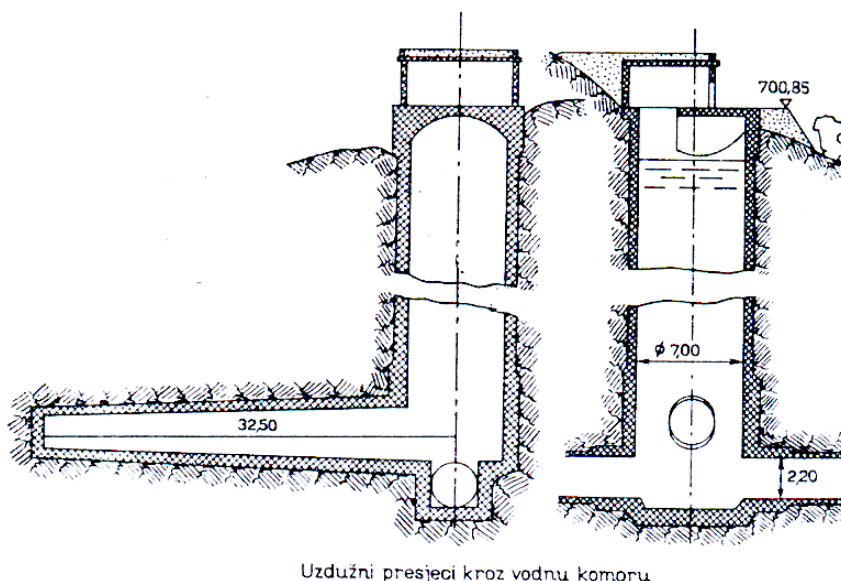
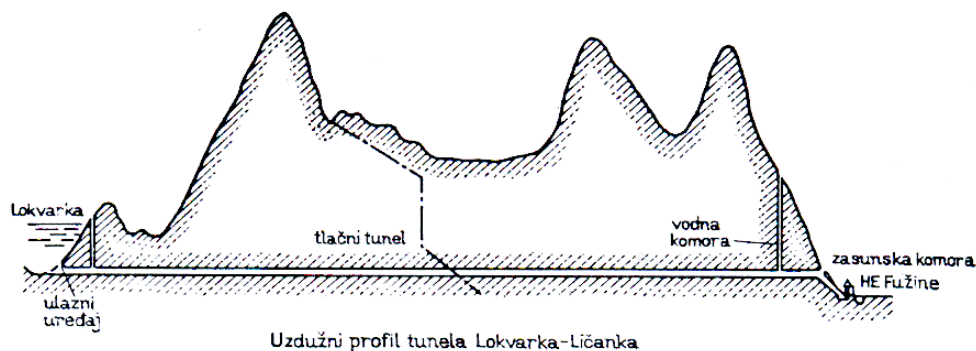
Zahvat ispod površine vode, i to na najnižoj mogućoj razini, razini do koje će se spuštati voda, slika 9-26, izvodi se kada se količina vode tijekom godine mijenja (akumuliranje vode u kišnom i njezino iskorištavanje u sušnom razdoblju).



Slika 9-26 Zahvat ispod površine vode, ulazni uređaj (jezero Bajer za visokotlačnu, akumulacijsku, derivacijsku HE „Vinodol“)

Dovod vode spaja zahvat s vodostanom, odnosno s vodnom komorom. Izgrađuje se kao otvoren (**kanal**) ili kao zatvoren (**tunel**, koji može biti gravitacijski ili tlačni), ovisno o topografiji terena kojim prolazi ali i o pogonskim zahtjevima koji se postavljaju hidroelektrani. **Gravitacijski tunel** nije posve ispunjen vodom pa je za promjenu protoka vode potrebno mijenjati visinu zahvata i otvor na zahvatu. U slučaju **tlačnog tunela** voda ispunjava cijeli profil tunela i za promjenu dotjecanja vode nije potrebno nikakvo djelovanje na zahvatu. Hidroelektrane su tada znatno elastičnije u pogonu jer se opterećenje mijenja mijenjanjem otvora ispred turbine.

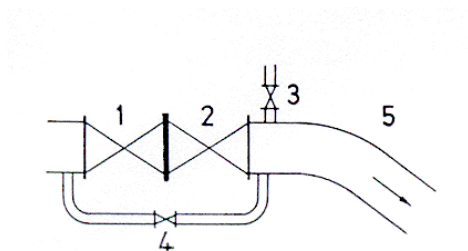
Vodostan ili **vodna komora** nalazi se na kraju dovoda, a služi za ublažavanje posljedica naglih promjena opterećenja. Kad je dovod gravitacijski, potreban je vodostan odgovarajućeg obujma kako bi se u njemu mogle pohraniti veće količine vode u slučaju naglih promjena opterećenja hidroelektrane. Ako hidroelektrana ima tlačni dovod, proširenje na kraju tog dovoda mora se izvesti kao vodna komora takvih dimenzija da, nakon promjene opterećenja, tlak u dovodu ne poraste iznad dopuštene granice, odnosno da se razina vode ne spusti ispod najviše kote ulaza u tlačni cjevovod. Dimenzioniranje vodne komore ima velik utjecaj na rad hidroelektrane. Slika 9-27 prikazuje primjer izvedbe vodne komore.



Slika 9-27 Vodna komora

Tlačni cjevovod služi za dovođenje vode iz vodostana ili vodne komore do turbine. U pravilu izrađen je od čelika, a za manje padove i od betona. Prema svom smještaju tlačni cjevovod može biti položen po površini ili u tunelu. Cjevovod u tunelu može biti slobodno položen, kada tunel služi samo kao prostor za smještaj cjevovoda, ili prilijegati uz stijene tunela, i to bilo tako da naprezanja preuzima samo stjenka cjevovoda ili tako da ih preuzima djelomično i okolna stijena.

Na ulazu u cjevovod uvijek postoji **zaporni organ**, slika 9-28, čija izvedba ovisi o tlaku koji vlada na početku cjevovoda. Najvažniji je sigurnosni zaporni organ koji ima zadatak da automatski spriječi daljnje dotjecanje vode u cjevovod ako iz bilo kakvih razloga pukne cijev. Ispred sigurnosnog zapornog organa postavlja se pomoćni zaporni organ koji omogućuje pregled i popravke na sigurnosnom organu bez pražnjenja dovodnog tunela ili dovodnog kanala.

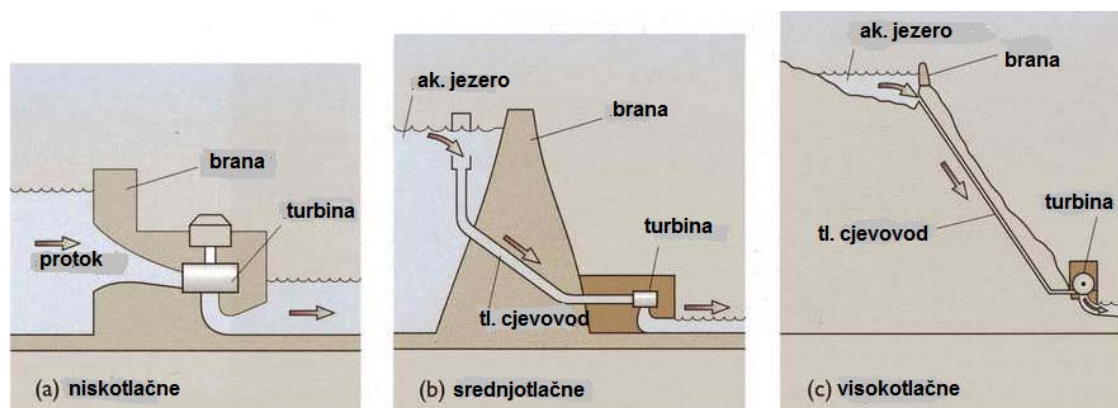


Slika 9-28 Priključak tlačnog cjevovoda: 1 – pomoćna zapornica, 2 – sigurnosna zapornica, 3 – ventil za zrak, 4 – obilazni cjevovod, 5 – tlačni cjevovod

Postavljanje zapornih organa na dnu tlačnog cjevovoda ovisi o broju turbina koje su spojene na jedan cjevovod i o pogonskim zahtjevima koji se postavljaju hidroelektrani. Obilazni cjevovod se nalazi na početku glavnog cjevovoda. Predviđen je za postupno punjenje glavnog cjevovoda te ima mnogo manji promjer od glavnog jer se, radi sprečavanja oštećenja, cjevovod puni samo s 1/20 protoka u normalnom pogonu. Osim toga, zadatak je obilaznog cjevovoda da omogući izjednačavanje tlakova ispred i iza zapornog organa na ulazu u cjevovod jer bi bez toga izjednačenje bila potrebna vrlo velika snaga za otvaranje zapornog organa.

Hidroelektrane se mogu podijeliti prema **raspoloživom padu**, prema **načinu korištenja vode**, prema **obujmu akumulacijskog bazena** i prema **smještaju strojarnice**.

Prema **visini pada** razlikuju se „**niskotlačne**“ (pad do 25 metara), „**srednjotlačne**“ (od 25 do 200 m) i „**visokotlačne**“ (iznad 200 m) hidroelektrane, slika 9-29.



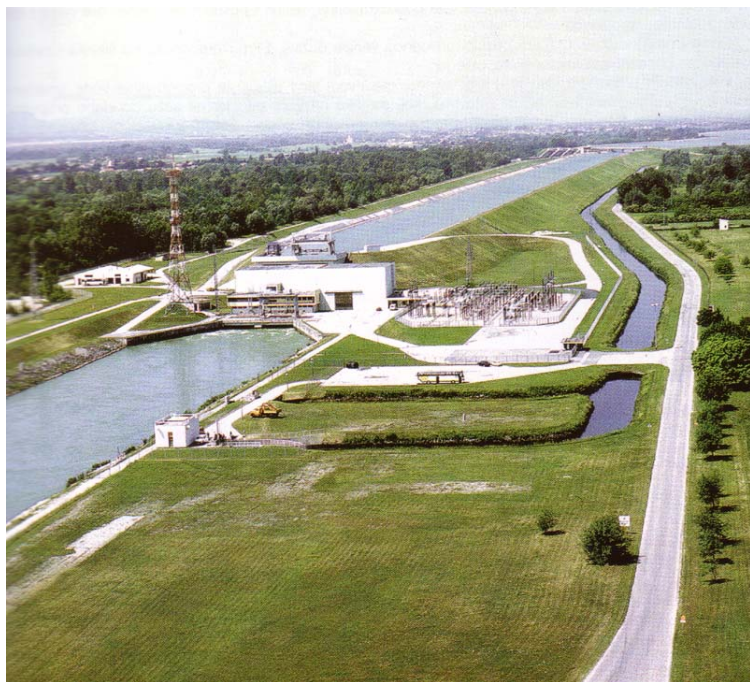
Slika 9-29 Osnovne izvedbe HE ovisno o raspoloživom padu vode: (a) niskotlačne, (b) srednjotlačne, (c) visokotlačne

Niskotlačne su hidroelektrane riječne, slika 9-30, pribranske i derivacijske.



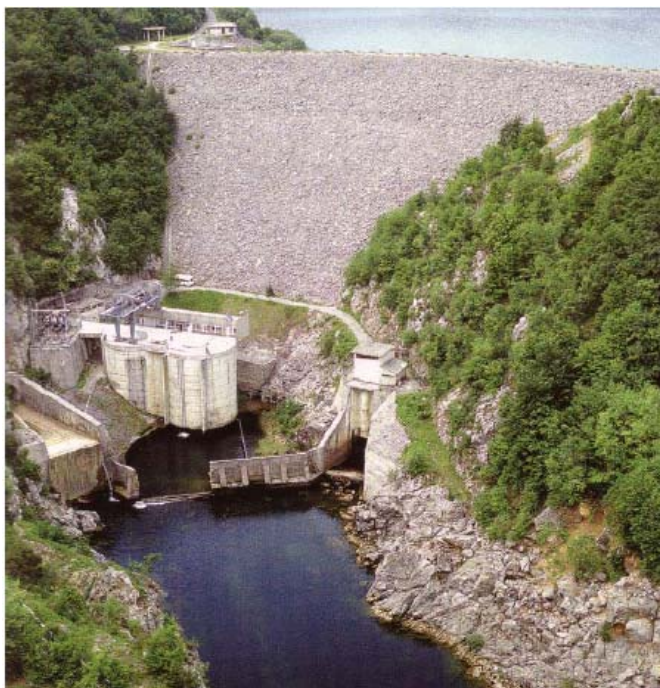
Slika 9-30 Niskotlačna, protočna HE „Ozalj“ na rijeci Kupi (pad 9,2 m, snaga 5 MW /3 x 1,1 + 2 x 1,1/)

Grade se za specifične padove do 1 m/km. Pri tome je karakteristično da im cjelokupni pad stoji na raspolaganju neposredno kod elektrane, bez potrebe za tlačnim dovodima i cjevovodima. Primjerice, na rijeci Dravi izgrađene su tri niskotlačne, derivacijske hidroelektrane: HE Varaždin (1975. godine), 86 MW, HE Čakovec (1982. godine), 80,6 MW, slika 9-31, i HE Dubrava (1989. godine) 80,6 MW. One su višenamjenske budući da, osim što proizvode električnu energiju, omogućuju opskrbu vodom, obranu od poplava, zaštitu zemljišta od izjedanja (erozije), navodnjavanje, odvodnju i promet. Te su hidroelektrane derivacijske i s akumulacijama za potpuno dnevno i djelomično tjedno izravnjanje. Radom hidroelektrana upravlja se daljinski iz jednog središta, iz tzv. Komande lanca smještenog u Varaždinu, čime se ostvaruje povećanje proizvodnje električne energije optimizacijom korištenja voda, povećanje pogonske spremnosti agregata planiranjem termina i trajanja poslova održavanja i sigurno provođenje velikih vodnih valova kroz sustav HE.



Slika 9-31 Niskotlačna, derivacijska HE „Čakovec“ s akumulacijom za dnevno i djelomično tjedno uređenje dotoka (pad 17,5 m, snaga 76 /2x38/ MW)

Srednjotlačne hidroelektrane mogu biti pribranske, slika 9-32, i derivacijske, slika 9-33, koje se najčešće grade na mjestima gdje rijeka stvara zavoje koji se tada presijecaju kanalom ili cjevovodom.



Slika 9-32 Srednjotlačna, pribranska HE „Sklope“ na Rijeci Liki (pad 60 m, snaga: 22,5 MW)



Slika 9-33 Srednjotlačna, derivacijska HE

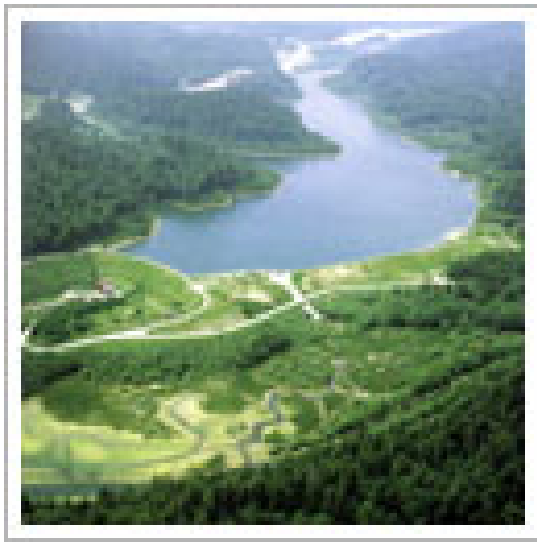
Visokotlačne hidroelektrane mogu biti pribranske i derivacijske. Radi li se o pribranskim elektranama, s obzirom na veličinu uspora, ove su hidroelektrane ujedno obično i akumulacijske s djelomičnom ili potpunom godišnjom regulacijom protoka i mogućnošću vršnog rada u tijeku dana.

Najčešće su međutim visokotlačne hidroelektrane derivacijske budući da su zahvat i strojarница prostorno odijeljeni; voda se naime dovodi do turbina cjevovodom dugačkim i više kilometara, slika 9-34. Grade se u brdovitim krajevima za padove veće od 5 m/km.



Slika 9-34 Visokotlačna, akumulacijska, derivacijska HE „Vinodol“ (pad 623 m, snaga 94,5 MW (3 agregata x 2 turbine x 15,75 MW)

Hidroenergetski sustav „Vinodol“ koristi se vodom snagom sa slivnih područja Lokvarke (s Križ potokom) i Ličanke (akumulacija Bajer, Lepenica i Potkoš) te još nekoliko manjih potoka. Premda nije riječ o velikom slivnom području, približno 80 km², specifična je snaga slivnog područja znatna budući da se nalazi na visini većoj od 700 m pa je, primjerice, bruto pad na HE „Vinodol“ 658 m, što je jedan od najviših padova u hidroenergetskim postrojenjima u Europi. Gradnja hidroelektrane „Vinodol“ započela je 1939., a u pogonu je od 1952. godine. Kako bi se povećala proizvodnja u hidroenergetski je sustav „Vinodol“ 1985. uključena i crpno-akumulacijska HE „Lepenica“, slika 9-35.



Slika 9-35 Crpno-akumulacijska HE „Lepenica“

S obzirom na način korištenja vode postoje protočne hidroelektrane, u kojima se voda iskorištava onako kako dotječe i akumulacijske hidroelektrane, u kojima se dio vode akumulira, da bi se mogla iskoristiti kad se pojavi potreba.

Prema veličini akumulacijskog bazena razlikuju se hidroelektrane s dnevnom akumulacijom (punjenje akumulacije noću, a pražnjenje danju), sa sezonskom akumulacijom (punjenje u kišnom, a pražnjenje u sušnom razdoblju) te s godišnjom akumulacijom (punjenje u kišnim, a pražnjenje u sušnim godinama).

Prema smještaju strojarnice dijele se hidroelektrane na pribranske (strojarnica smještena neposredno uz branu) i derivacijske.

Konačno, crpno-akumulacijske, slika 9-36, i hidroelektrane koje iskorištavaju plimu i oseku izdvajaju se iz spomenute podjele hidroelektrana.



Slika 9-36 Crpno-akumulacijska (reverzibilna) HE „Velebit“ na rijeci Zrmanji (pad 517 m u turbinskom radu, 559 m u crpnom radu, snaga turbina 276 MW (2x138), crpki 240 MW (2x120))

9.5 Karakteristike akumulacije i pada

Karakteristike akumulacije i pada jesu: volumen akumulacijskog bazena, njegova energetska vrijednost i pad.

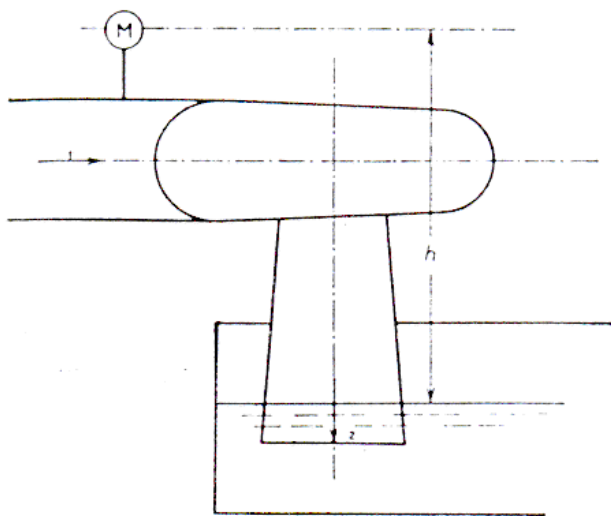
Razlikuje se geometrijski i korisni volumen akumulacijskog bazena. Geometrijski volumen akumulacijskog bazena je ukupni volumen vode koji se može spremiti između tla na dnu i najviše razine vode u akumulacijskom bazenu. Normalno se ne koristi sav raspoloživi volumen akumulacije, jer se za male volumene akumulirane vode naglo smanjuje pad, pa to dovodi do znatnog smanjenja snage, a s time i proizvodnje, pa je šteta od toga veća nego dobitak od iskorištenja tog malog volumena akumulirane vode. Korisni volumen akumulacijskog bazena je volumen vode koji se može spremiti između najviše i najniže razine u normalnom pogonu; to je i volumen koji se koristi u normalnom pogonu. Najniža razina pritom ne mora biti jednaka najnižoj razini za slučaj pražnjenja radi pregleda i popravaka. Za energetska razmatranja najvažniji je korisni volumen akumulacijskog bazena budući da samo taj volumen utječe na reguliranje protoka.

Da bi se karakterizirao korisni volumen s obzirom na hidroelektranu, uvodi se vrijeme trajanja pražnjenja akumulacijskog bazena. To je minimalno vrijeme potrebno da korisni volumen istječe kroz turbine, pretpostavljajući da za to vrijeme nema dotoka u akumulaciju. Protočnom hidroelektranom smatra se hidroelektrana čiji se akumulacijski bazen može isprazniti za manje od dva sata, za pražnjenje bazena hidroelektrane s dnevnom akumulacijom potrebno je od 2 sata do 400 sati, a za pražnjenje bazena hidroelektrane sa sezonskom akumulacijom potrebno je više od 400 sati.

Korisni volumen može se prikazati i kao relativni volumen u odnosu na ukupni volumen vode koji tijekom godine dotječe u akumulaciju.

Pokraj toga, akumulacijski se bazen karakterizira energetsom vrijednošću. Pod njom se razumijeva količina električne energije koja bi se proizvela u promatranoj hidroelektrani, i u svim nizvodnim hidroelektranama, kad bi se ispraznio korisni volumen bez dotoka vode u bazen i bez gubitka vode.

U hidroelektrani se razlikuju „prirodni“ ili „bruto-pad“ i „korisni“ ili „neto-pad“. Prirodnim ili bruto-padom H_b naziva se razlika između razine vode na zahvatu („gornje vode“) i razine vode nakon povratka u korito ili na kraju odvoda („donje vode“). To je, dakle, pad koji nam pruža priroda. Zbog gubitaka u zahvatu, dovodu, tlačnom cjevovodu i odvodu na ulazu u turbinu stoji na raspolaganju tlak koji je, mjeren u metrima stupca vode (m.s.v.), manji od prirodnog (bruto) pada. Tlak na ulazu u turbinu, h_m , može se izmjeriti manometrom (M na slici 9-37).



Slika 9-37 Određivanje neto-pada u hidroelektrani s tlačnim cjevovodom

Kako manometar pokazuje samo statički tlak (h_m u m s. v.) treba još uvažiti i visine brzine na ulazu (c_1) i na izlazu (c_2) turbine. Osim toga treba uračunati i položaj manometra (h) iznad razine vode na izlazu iz turbine. Poznavajući sve te veličine može se odrediti tlak, koji vlada na ulazu u turbinu, izražen u metrima stupca vode (padom H_n / taj se pad naziva neto-padom/) zamijenimo li u jednadžbi [9.2] varijablu z s h :

$H_n = h_m + h + \frac{c_1^2}{2g} - \frac{c_2^2}{2g} [ms.v.]$	[9.27]
---	--------

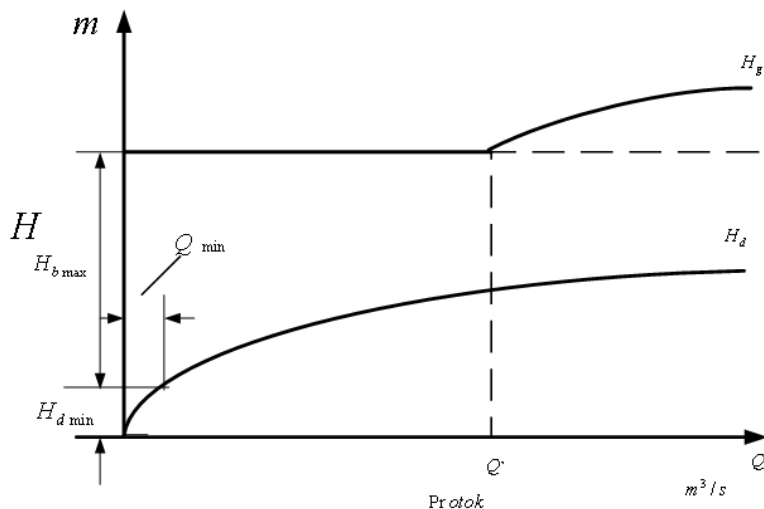
Dakle, tlakom (visinom) H_n određen je neto-pad u hidroelektrani.

Izraz [9.27] vrijedi za reakcijske turbine (Francisovu, Kaplanovu i propelernu turbinu). Za akcijske turbine (Peltonove), h je položaj manometra iznad srednje razine sapnica, a za brzinu na izlazu postavlja se $c_2 = 0$.

Ni bruto-pad ni neto-pad nisu konstantni. Na prvi utječu promjene razina donje i gornje vode, a na drugi osim promjena razina još i promjena gubitaka.

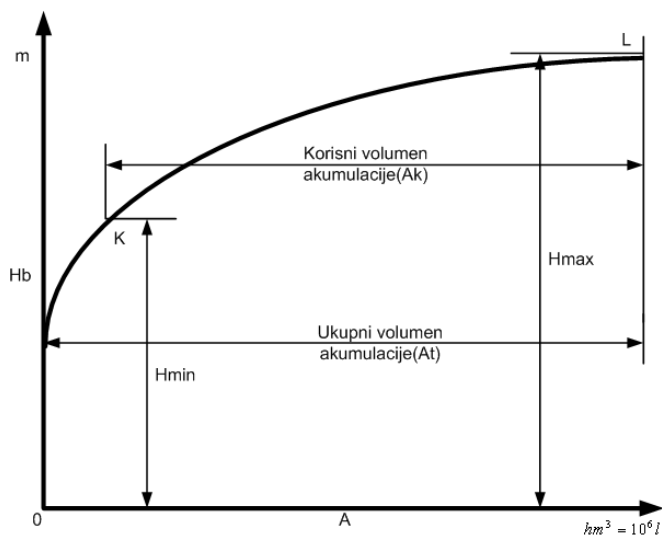
Promjene razina gornje vode mogu nastati zbog preljeva velikih voda preko brane, do čega dolazi kad se sva suvišna voda ne može propustiti kroz ispuste. U tom slučaju razina gornje

vode ovisi o protoku (slika 9-38), ali samo za protoke koji su veći od protoka Q' koji ovisi o kapacitetu ispusta i o veličini izgradnje hidroelektrane.



Slika 9-38 Ovisnost razina gornje vode H_g i razina donje vode H_d o protoku Q

U pribranskim hidroelektranama, i u akumulacijskim hidroelektranama s tlačnim dovodom, bruto-pad, a prema tomu i neto-pad, ovisi o volumenu akumulirane vode (A). Ta se ovisnost prikazuje krivuljom $H_b = f(A)$, slika 9-39.



Slika 9-39 Ovisnost bruto-pada H_b o volumenu akumulirane vode A

Za promatranu hidroelektranu maksimalan je bruto-pad određen ukupnim volumenom akumulacije, a minimalni bruto-pad korisnim volumenom akumulacije.

Promjene razina donje vode ovisne su o količini vode koja protječe koritom rijeke na kraju odvoda, i to bez obzira na to dotječe li voda koritom pokraj hidroelektrane ili kroz turbine hidroelektrane. Razina donje vode raste s povećanjem protoka, slika 9-38, a oblik krivulje ovisi o profilu korita.

Razlikom razina određen je bruto pad. Najveći bruto pad pojavljuje se u doba najmanjih protoka (Q_{min}), dakle onda kad je razina donje vode najniža.

Promjena pada ima veliki utjecaj na snagu i moguću proizvodnju hidroelektrana s malim padom (do oko 50 m), dok se u hidroelektranama s većim padom ta promjena često može zanemariti.

Da bi se odredio neto-pad, treba od bruto pada odbiti gubitke u svim dovodima. (O tome ćemo detaljnije govoriti kasnije.) Gubici pada približno su proporcionalni kvadratu protoka; to su veći što je duljina dovoda veća i što je površina njihovih presjeka manja. Budući da su dovodi u hidroelektranama s malim padom kratki, u tim hidroelektranama odlučan utjecaj na promjenu neto-pada ima promjena bruto-pada, dok u hidroelektranama s velikim padom (dugim dovodima) promjenu neto-pada u najvećoj mjeri određuju gubici u dovodima.

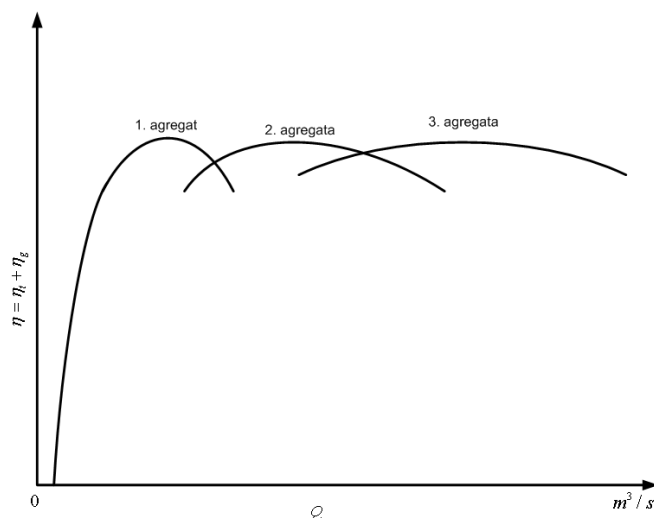
9.6 Snaga i moguća proizvodnja hidroelektrana

Snaga je koju hidroelektrana daje na priključcima generatora jednaka:

$P = g \cdot \rho \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta_t \cdot \eta_g [W]; g = 9,81 \frac{m}{s^2}; \rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$	[9.28]
--	--------

gdje je Q protok koji protječe kroz turbine, H_n neto-pad koji stoji na raspolaganju, a η_t i η_g stupnjevi su djelovanja turbine i generatora.

Stupnjevi djelovanja i turbine i generatora ovise o opterećenju i broju agregata u pogonu. Slika 9-40 prikazuje promjenu stupnja djelovanja u ovisnosti o protoku.



Slika 9-40 Stupanj djelovanja hidroelektrane

Stupanj djelovanja pri optimalnom opterećenju u modernim hidroelektranama iznosi i do 90 %. Prosječan je stupanj djelovanja korištenja potencijalne energije vode niži i iznosi za veća postrojenja približno 80%, a za manja postrojenja približno 75%.

Za određivanje snage kad nisu poznati stupnjevi djelovanja upotrebljava se približna formula:

$P = kQH_n [kW]$	[9.29]
------------------	--------

Vrijednost parametra k ovisi o snazi agregata u hidroelektrani. Za veće hidroelektrane s agregatima snage $P \geq 10$ MW, aproksimativni izraz glasi:

$P = 8QH_n [kW]$	[9.30]
------------------	--------

a za hidroelektrane s agregatima manje snage je $k < 8$. Veličina parametra k obično se određuju linearnom interpolacijom uz pretpostavku da je $k = 7,5$ za elektrane s agregatima snage 1 MW.

U slučajevima kad se radi o manjim relativnim promjenama bruto-pada može se mjesto stvarnog neto-pada u [9.30] uvrstiti srednji neto-pad koji se određuje relacijom:

$H_{nsr} = \frac{2}{3}H_n' + \frac{1}{3}H_n''$	[9.31]
--	--------

gdje je H_n' neto-pad kod punog opterećenja, a H_n'' neto-pad uz srednje opterećenje odnosno uz srednji iskoristivi protok. (U oba se slučaja pretpostavlja da je volumen akumulirane vode jednak polovici korisnog volumena akumulacije. Snaga određena izrazom [9.29] manja je od snaga koje se postižu prigodom ispitivanja agregata, no vrlo dobro aproksimira vrijednosti koje se postižu u stvarnom pogonu.)

Mogućom dnevnom ili godišnjom proizvodnjom hidroelektrane naziva se ona količina energije koju bi hidroelektrana mogla proizvesti s obzirom na protoke, pad, stupanj djelovanja i veličinu izgradnje. Pokraj toga hidroelektrana se karakterizira i mogućom srednjom godišnjom proizvodnjom (GWh) koja je određena kao aritmetička sredina mogućih godišnjih proizvodnja u promatranom, što duljem, nizu godina. Prigodom određivanju raspoloživog dotoka vode treba uzeti u obzir postojanje bilo vlastite akumulacije bilo akumulacije u uzvodnim hidroelektranama, kao i eventualne potrebe vode za plovidbu, poljoprivredu i sl. Pritom treba pretpostaviti da su svi dijelovi hidroelektrane sposobni za pogon, da ne postoje ograničenja u mogućnosti preuzimanja proizvedene električne energije, da ne postoje ograničenja proizvodnje zbog utjecaja mreže (rezerva, proizvodnja jalove snage, regulacija frekvencije i sl.) budući da je stvarna proizvodnja hidroelektrane normalno niža od moguće proizvodnje uglavnom radi promjena potražnje potrošača odnosno radi, u nekim razdobljima godine i dana, veće mogućnosti proizvodnje od potražnje potrošača.

Određivanje je moguće proizvodnje najjednostavnije provesti pomoću krivulje trajanja (ili krivulje vjerojatnosti) protoka. Površina ispod krivulje trajanja prikazuje volumen vode V

koji stoji na raspolaganju, jednadžba [9.24]: $V = \int_0^Q t dQ$, gdje je t trajanje protoka, slika 9-22.

Iskorištenje je vode pritom ograničeno veličinom izgradnje hidroelektrane. Određenoj veličini izgradnje Q_i naime odgovara iskoristivi volumen vode V_i , [9.24], $V_i = \int_0^{Q_i} t \cdot dQ$, koji

je prikazan površinom 0ABt₀, slika 9-22. Kada se poznaje iskoristivi volumen (V_i), moguće

je odrediti i srednji iskoristivi protok, [9.25], $Q_{si} = \frac{V_i}{t_0} = \frac{V_i}{31,54 \cdot 10^6} \left[\frac{m^3}{s} \right]$ koji je, pokazali

smo, manji je od srednjeg protoka vodotoka (Q_s), a njihov omjer α daje stupanj iskorištenja

$$\alpha = \frac{Q_{si}}{Q_s} = \frac{V_i}{V_0}.$$

Kao prvu aproksimaciju moguću proizvodnju možemo odrediti, uz pretpostavku konstantnog stupnja djelovanja, pomoću veličine k u relaciji [9.29], i konstantnog neto pada. Tada je srednja snaga hidroelektrane:

$P_s = k \cdot Q_{si} \cdot H_n [kW]$	[9.32]
---------------------------------------	--------

a moguća godišnja proizvodnja:

$W = 8760 \cdot k \cdot Q_{si} \cdot H_n [kWh]$	[9.33]
---	--------

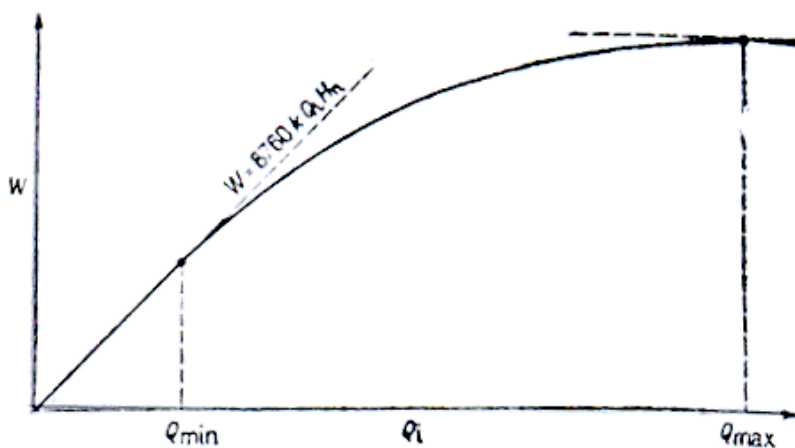
Moguća proizvodnja može se odrediti i pomoću iskoristivog volumena. Koristeći se jednadžbom [9.25] dobije se:

$W = \frac{k \cdot H_n \cdot V_i}{3600} [kWh]$	[9.34]
--	--------

odnosno za $k = 8$:

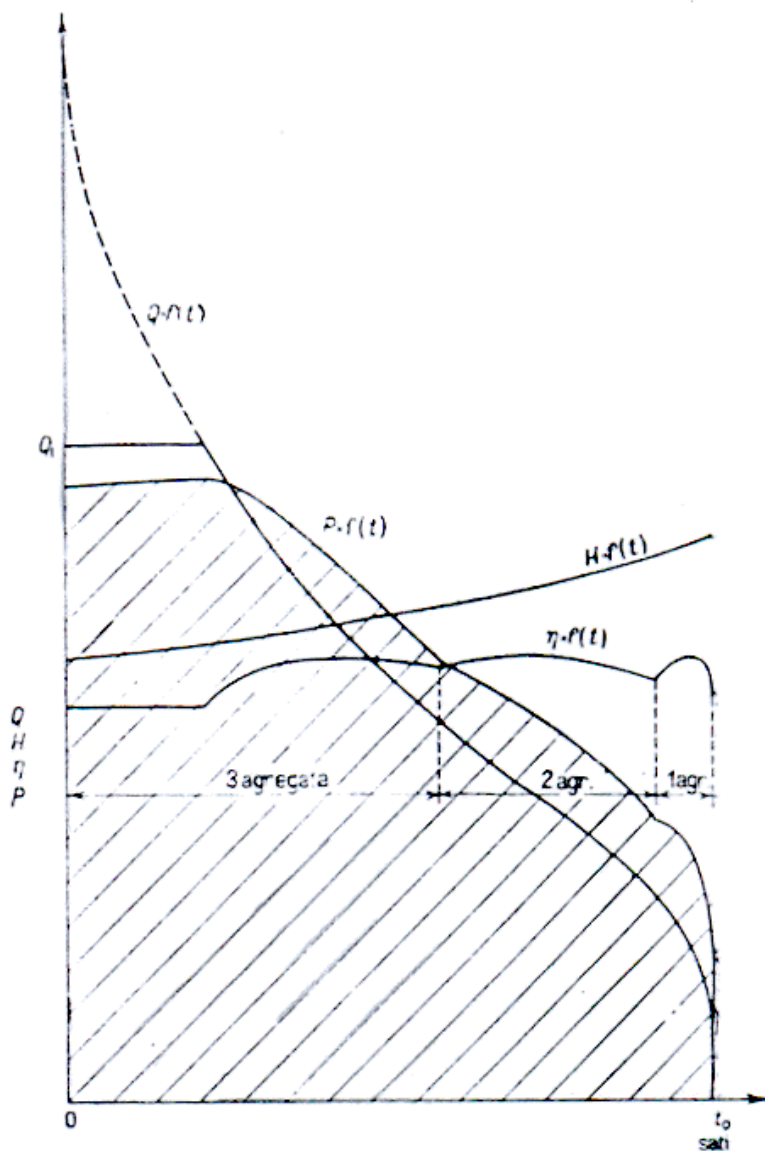
$W = \frac{H_n \cdot V_i}{450} [kWh]$	[9.35]
---------------------------------------	--------

Za promatrano postrojenje moguća proizvodnja, uz zadani način korištenja hidroelektrane, ovisi samo o veličini izgradnje. Povećanjem veličine izgradnje raste i moguća proizvodnja, ali to sporije što je veličina izgradnje veća, slika 9-41.



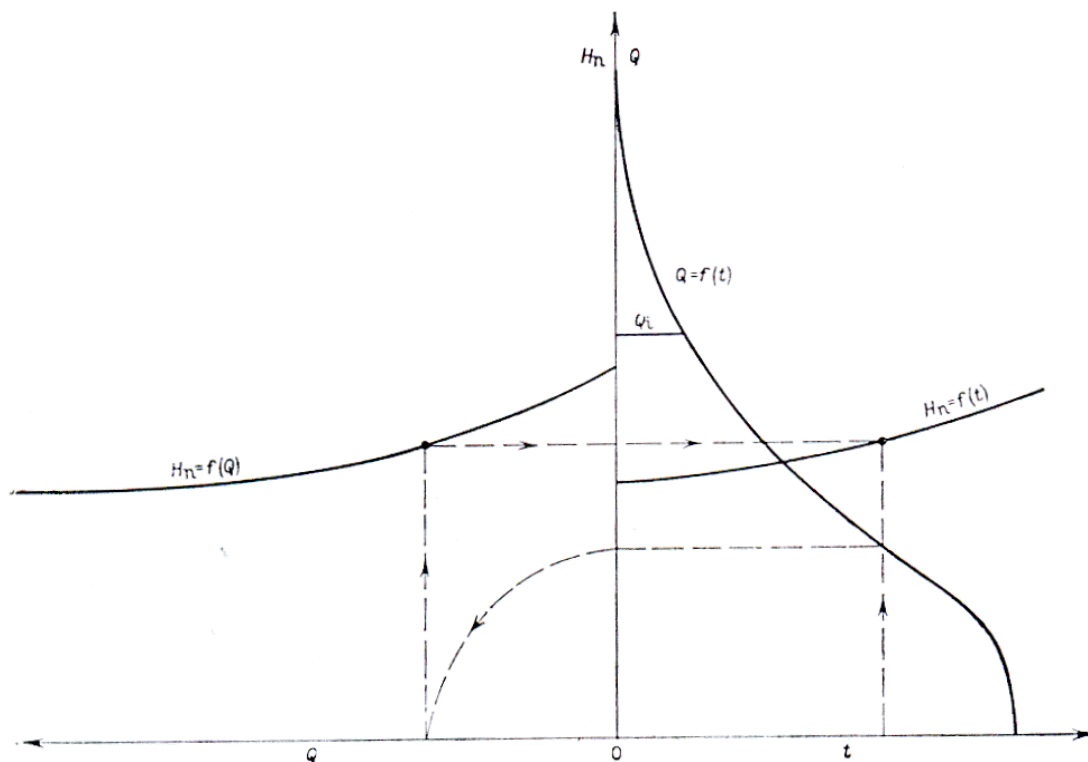
Slika 9-41 Ovisnost moguće proizvodnje W o veličini izgradnje Q_i hidroelektrane

Ako je potrebno točnije odrediti moguću proizvodnju, može se upotrijebiti grafička metoda prikazana na slici 9-42. U crtavanjem krivulja $H_n = f(t)$ i $\eta = f(t)$ u isti dijagram s krivuljom trajanja $Q = f(t)$, te množenjem tih krivulja dobivamo, pomoću izraza [9.28], krivulja $P = f(t)$ koja predstavlja krivulju snage. Planimetriranjem ploštine površine ispod krivulje $P = f(t)$ dobivamo moguću proizvodnju.



Slika 9-42 Određivanje moguće proizvodnje hidroelektrane

Sada je moguće konstruirati krivulju $W = f(Q)$, prikazanu na slici 9-41, ali za svaku promjenu veličine izgradnje treba ponovno konstruirati krivulju $H_n = f(t)$ i $\eta = f(t)$. Pad i stupanj djelovanja obično su poznati u ovisnosti o protoku, dakle poznate su funkcije $H_n = f(Q)$ i $\eta = f(Q)$. Konstrukcijom prema slici 9-43 možemo pomoću krivulje $H_n = f(Q)$, a preko krivulje $Q = f(t)$, odrediti krivulju $H_n = f(t)$. Analognim postupkom može se konstruirati krivulja ovisnosti $\eta = f(t)$.



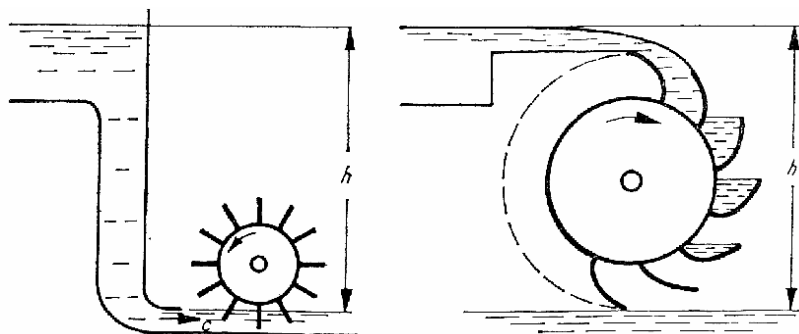
Slika 9-43 Konstrukcija krivulje $H_n = f(t)$ pomoću krivulje $Q = f(t)$ a prema krivulji $H_n = f(Q)$

Tako određena moguća proizvodnja predstavlja srednju moguću godišnju proizvodnju, tj. proizvodnju koja se može u prosjeku godišnje očekivati u duljem nizu godina. Na isti se način može odrediti i moguća proizvodnja u pojedinim godinama, ako se račun provede prema krivuljama trajanja za pojedine godine, a ne prema krivuljama trajanja za niz godina.

9.6 Pretvorba energije vode u mehanički rad – osnovna podjela vodnih turbina

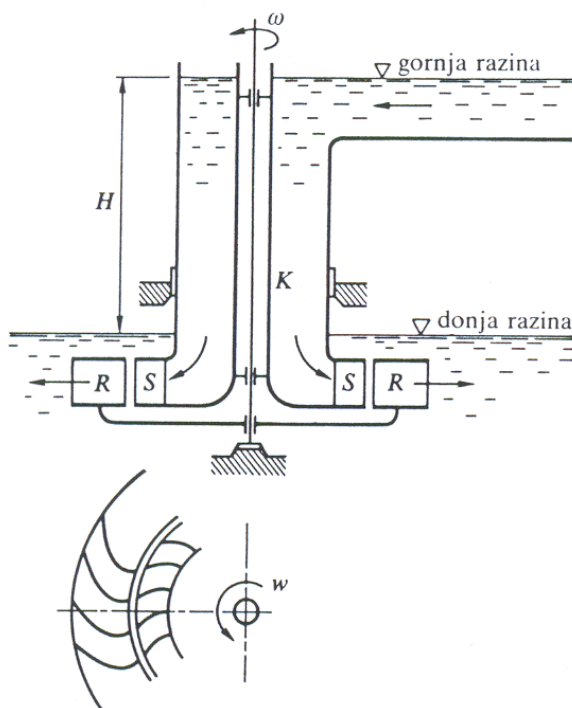
Pokazali smo u 3.1.2.2.1 da se energija koju ima neka kapljevina, u našim razmatranjima voda, što struji nekom brzinom, sastoji se od energije tlaka, potencijalne i kinetičke energije. Svaka od tih energija može se pretvoriti na pogodan način u drugi oblik, koji se pomoću strojeva transformira u mehanički rad.

Najjednostavniji su takvi strojevi vodenička kola, a ona se izvode za iskorištavanje kinetičke energije, slika 9-44a, ili su tjerana pomoću potencijalne energije, slika 9-44b. Takva su vodenička kola upotrebljavana već u najdavnijim vremenima, a danas služe za pogon malih mlinova. Osim toga, moguće je ostvariti i stapni stroj tjeran vodom kao djelatnom tvari, u kojem se iskorištava energija tlaka. Snage koje se postižu takvim strojevima vrlo su male, a i stupanj je djelovanja vrlo slab. Iznimka je vodeničko kolo koje iskorištava potencijalnu energiju, slika 9-44b, jer ono može imati vrlo dobar stupanj djelovanja ako je pogodno konstruirano.



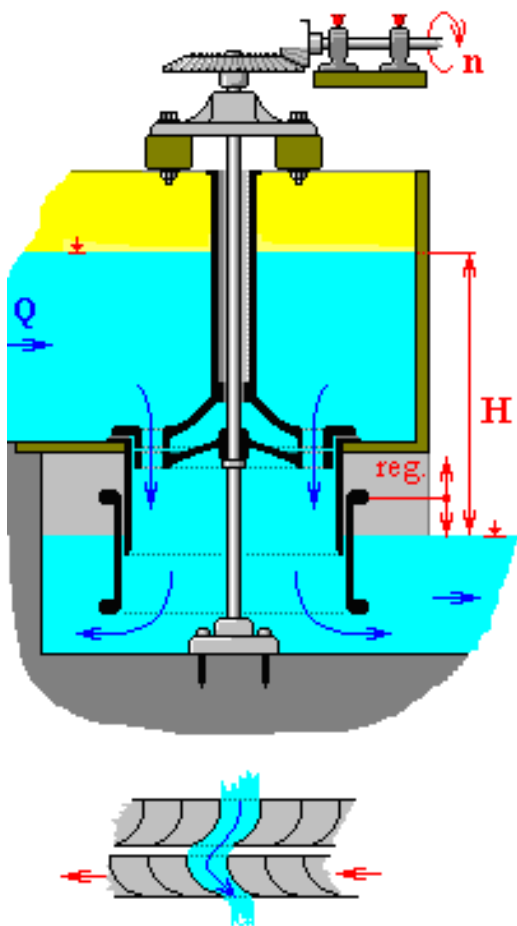
Slika 9-44 Skice vodeničnih kola: a) iskorištavanje kinetičke energije, b) iskorištavanje potencijalne energije

Prva je vodna turbina, u današnjem smislu, radila 1837. godine u Francuskoj. To je Fourneyronova turbina, slika 9-45, nazvana po njezinom konstruktoru. Snaga joj je bila oko 60 KS (44,7 kW). Fourneyronova turbina spada u red tzv. radijalnih turbina (voda struji od osovine prema obodu rotora /radijalno strujanje/) centrifugalnog smisla. Voda iz nekog potoka ili rijeke, dovedena na primjer derivacijskim kanalom, dotječe u komoru K iz koje, prolazeći kroz mirujući dio turbine (stator) S, ulazi u rotor R na njegovom unutarnjem obodu a izlazi na vanjskom (odakle i naziv: centrifugalna turbina). Stator izgrađuju lopatice koje vodi, prije ulaza u rotor, daju propisani smjer, a zatim se posredstvom djelovanja rotorskih lopatica, koji imaju svrsishodni oblik, njihovim okretanjem, energija vode transformira u mehanički rad.



Slika 9-45 Fourneyronova vodna turbina: S-sator, R-rotor

Nešto kasnije pojavila se Jonvalova turbina koja pripada tzv. aksijalnom tipu turbina. Prolazeći kroz rotor, slika 9-45, voda se uglavnom giba po plaštu valjka koaksijalnog s turbinom, paralelno s osovinom turbine, te nema radijalne komponente. Jonvalova turbina radi na istom principu kao Fourneyronova, novost je valjkasta cijev, tzv. aspirator, kroz koju voda struji nakon izlaska iz rotora. Aspirator je potpuno ispunjen vodom, a rotor je bitno podignut iznad razine donje vode.

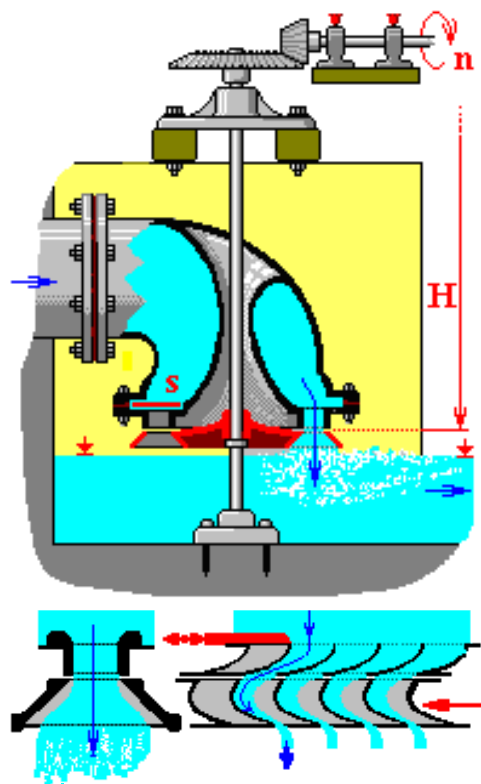


Slika 9-45 Jonvalova turbina

Aspirator omogućuje, što ćemo pokazati kasnije, iskorištavanje, u granicama savršenosti turbine, cijelog raspoloživog pada između gornje i donje vode (iako je turbina podignuta iznad donje razine vode), što inače (bez aspiratora) ne bi bilo moguće. Prednost je hidroelektrane s aspiratorom osim navedenog i u mogućnosti obavljanja montažnih i drugih radova na suhom, te i u neovisnosti o promjenama donje razine vode za vrijeme visokih voda (velikih protoka). Dok se spomenuta prednost postižava već s valjkastom aspiratorom, izvedba aspiratora u obliku cijevi koja se proširuje (difuzor) ima još dodatnu ulogu o kojoj ćemo govoriti kasnije; zasad samo istaknimo da je difuzor omogućio izgradnju suvremenih brzobodnih tipova turbina.

Daljnji je tip turbine, iz tog doba, Girardova turbina, koja također spada u red aksijalnih turbina s tom razlikom, prema Jonvalovoj turbini, što kod nje prostor između lopatica rotora nije potpuno ispunjen vodom. Turbina u tu svrhu mora biti postavljena iznad donje vode, a

presjeci kanala između lopatica rotora moraju, na izlazu, biti prošireni, slika 9-45. Girardova turbina stoga spada u red „turbina slobodnog mlaza“ ili u tzv. „akcijskih turbina“.



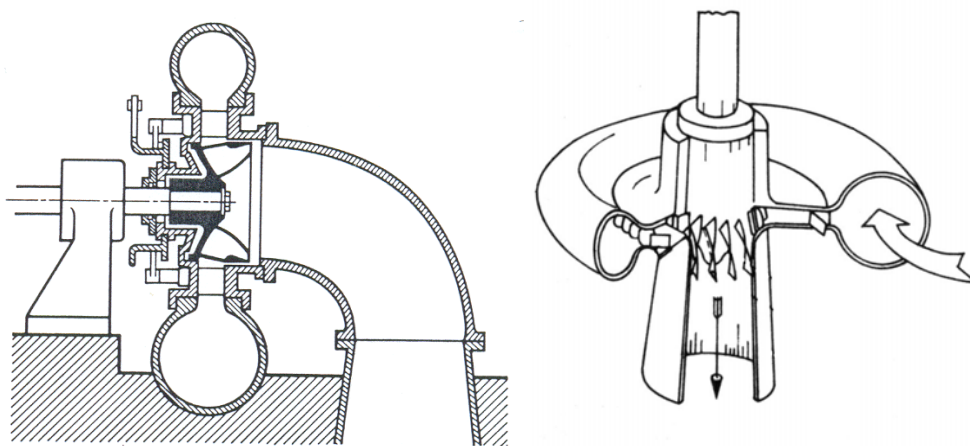
Slika 9-45 Girardova turbina

Gradnja je opisanih turbina međutim u današnje vrijeme napuštena, jer se u suvremenim turbinama postiže bolji stupanj djelovanja. Danas se u osnovi grade dva tipa vodnih turbina: „pretlačne“ (ili „reakcijske“) i turbine slobodnog mlaza (ili akcijske turbine).

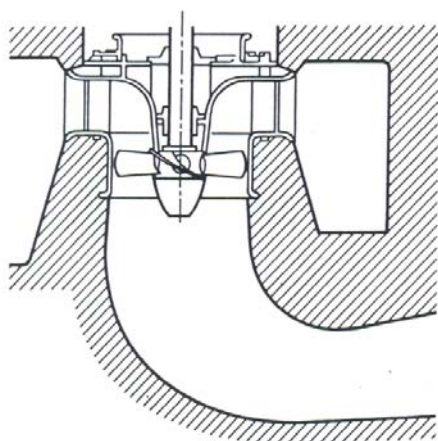
Pretlačnim turbinama nazivaju se vodne turbine u kojima je tlak na ulazu u rotor veći od onoga na njegovom izlazu, što odgovara reakcijskim parnim turbinama. U pretlačnim turbinama, naime, dio se energije tlaka transformira u kinetičku energiju u statoru, a dio u rotoru. U turbinama slobodnog mlaza tlak je na ulazu u rotor jednak kao i na njegovom izlazu, što odgovara akcijskim parnim turbinama, jer se sva energija tlaka transformira u kinetičku energiju vode u statoru.

Izvede se dva tipa pretlačnih vodnih turbina: Francisova, slika 9-46, i Kaplanova (propelerna) turbina, slika 9-47. Prvu je konstruirao Amerikanac Francis (1847), a drugu Čeh Kaplan (1922). Ponekad se izvodi i propelerna turbina, u principu Kaplanova, ali s nepomičnim rotorskim lopaticama. (U Kaplanovoj se turbini rotorske lopatice mogu pomicati da bi se bolje prilagodile uvjetima strujanja. Micanjem lopatica mijenja se njihov nagib i time se stupanj djelovanja održava na povoljnoj razini u širokom području rada.) Propelerna je turbina (Kaplanova turbina) nastala razvojem Francisove turbine. To je aksijalna turbina s vrlo malim brojem lopatica rotora koji je građen u obliku propelera. Između statora i rotora postoji relativno veliki međuprostor kroz koji se voda giba slobodno. Francisova turbina je radijalna, odnosno radijalno-aksijalna turbina, centripetalnog smisla utjecanja vode u rotor (voda ulazi u rotor na njegovom vanjskom a izlazi na unutarnjem

obodu), redovito opskrbljena difuzorom. Raniji tipovi Francisove turbine bili su gotovo sasvim radijalni, no, kod suvremenih tipova, voda na izlazu iz rotora ima znatnu aksijalnu komponentu strujanja.

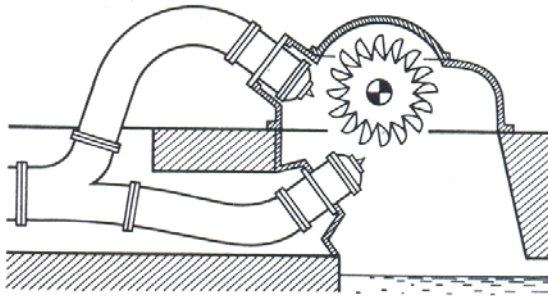


Slika 9-46 Skica Francisove turbine s horizontalnom i vertikalnom osovinom



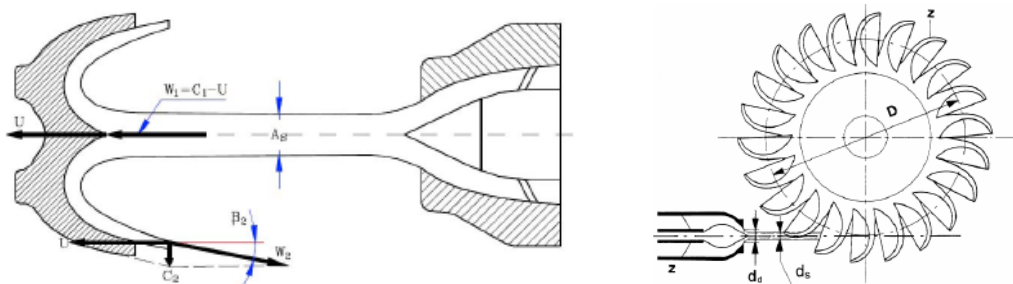
Slika 9-47 Skica Kaplanove turbine

Peltonova je turbina, slika 9-48, jedini tip vodne turbine slobodnog mlaza koji se danas izvodi. Konstruirao ju je 1878. godine Amerikanac Pelton. Ova se turbina izvodi s jednom ili s više mlaznica (sapnica): slobodni mlaz tangencijalno udara u lopatice rotora, koje skreću mlaz, i time se proizvodi moment vrtnje, slika 9-49.



Slika 9-48 Skica Peltonove turbine s dvije mlaznice

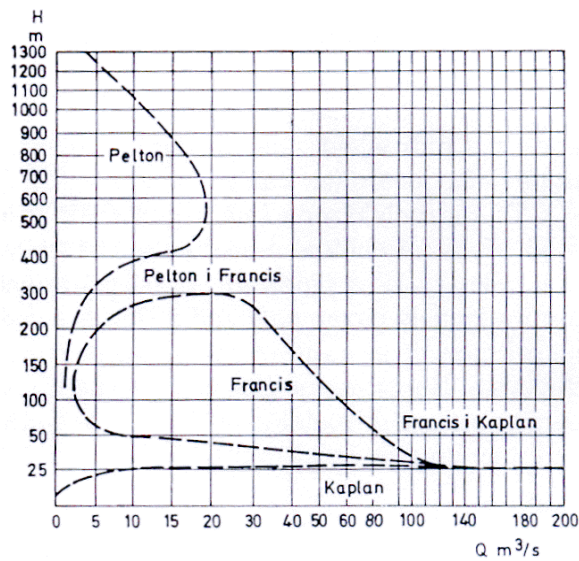
Naime, stator u Peltonovoj turbini jest sapnica, nazvana još mlaznicom, u koju se dovodi voda iz cjevovoda i u kojoj se sva energija vode transformira u kinetičku energiju. Mlaz vode, izlazeći iz sapnice, udara u lopaticu, koja je ostrim bridom podijeljena u dva jednaka ovalna udubljenja, slika 9-49. Lopatice su smještene na obodu rotora, koji se okreće zbog djelovanja mlaza. Pojedine lopatice dolaze stoga samo povremeno u dodir s mlazom, a za vrijeme dodira nagib im se s obzirom na mlaz stalno mijenja.



Slika 9-49 Princip rada Peltonove turbine

Rotor se Peltonove turbine okreće u zraku, pa zbog toga mora mlaz biti podignut na neku visinu h iznad donje vode uvjetovanu prirodnim kolebanjem razine donje vode. Brzina je vode na izlazu iz mlaznice (sapnice) $\sqrt{2g(H-h)}$, pa prema tome visina h predstavlja nužno izgubljenu kinetičku energiju po 1 kg vode.

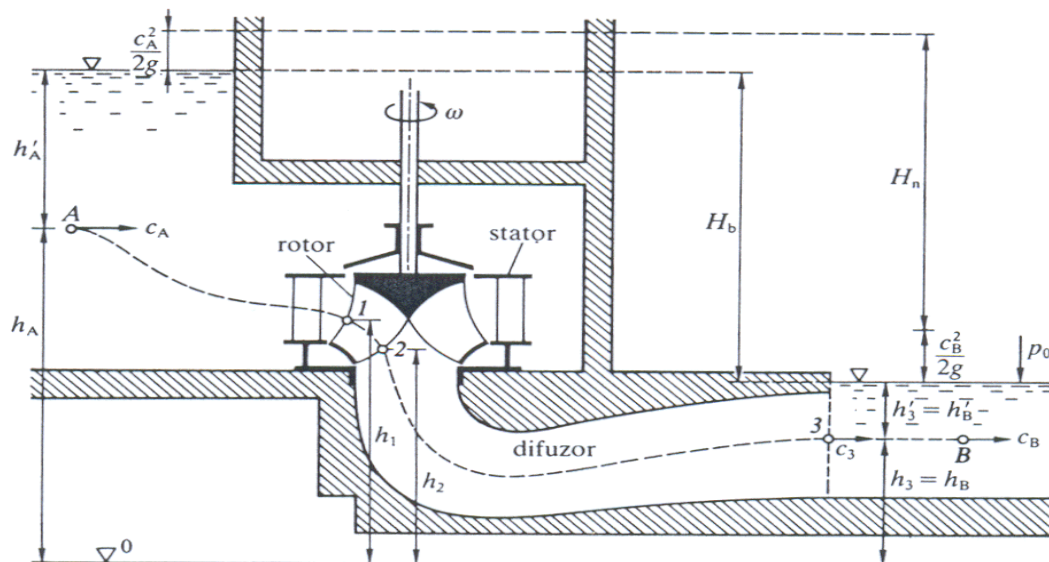
Tri osnovna, suvremena tipa turbine najčešće ne predstavljaju konkurenciju jedan drugom, odnosno, u većini se slučajeva ne ćemo morati kolebati prigodom izbora turbine pri zadanim okolnostima s obzirom na raspoloživi pad, količinu vode i broj okretaja, te i s obzirom na uvjete opterećenja i promjenljivost pada i količine vode. Naime, najopćenitije, Pelton turbina iskorištava energiju vodotoka karakteriziranih visokim padom i relativno malom količinom vode, Francisova dolazi uglavnom u obzir za iskorištavanje srednjih padova i odgovarajućih količina vode, dok je Kaplanova (propelerna) turbina najprikladnija za iskorištavanje energije velikih količina vode i malih padova. Prema tome, Peltonova će se turbina najčešće naći u visokim gorskim predjelima, Francisova u nižim brdskim područjima, a Kaplanova (propelerna) u nizinama. Drugim riječima, tek na ograničenim područjima mogu se primjene turbine preklapati, slika 9-50.



Slika 9-50 Područje primjene vodnih turbina

9.7 Energetske prilike u hidroelektrani

Vodne turbine u hidroelektranama služe kao strojevi za pogon električnih generatora. Da se dobije slika o energetske prilikama u hidroelektrani, razmotrit ćemo najprije prilike u hidroelektrani s malim padom, slika 9-51.



Slika 9-51 Presjek kroz vodnu turbinu u hidroelektrani s malim padom

Promatrajmo maseni protok vode od 1 kg/s koji se kreće od točke A do točke B. Snaga masenog protoka u točki A pred ulazom u turbinu je:

$P_A = \frac{p_A}{\rho} + \frac{c_A^2}{2} + gh_A \left[\frac{J}{s} \equiv W \right]$	[9.36]
---	--------

Snaga tlaka p_A/ρ posljedica je stupca vode h'_A iznad točke A i tlaka okolice p_{ok} pa je:

$P_A = \frac{p_{ok}}{\rho} + \frac{c_A^2}{2} + gh_A + gh'_A [W]$	[9.37]
--	--------

S druge strane, nakon izlaska iz hidroelektrane u odvodni kanal, maseni protok u točki B ima snagu:

$P_B = \frac{p_B}{\rho} + \frac{c_B^2}{2} + gh_B [W]$	[9.38]
---	--------

Uzevši i sada u račun stupac vode iznad točke B (h'_B) i tlak okolice (p_{ok}) na površinu vode u odvodnom kanalu može se jednadžba [9.38] napisati u obliku:

$P_B = \frac{p_{ok}}{\rho} + \frac{c_B^2}{2} + gh_B + gh'_B [W]$	[9.39]
--	--------

Razlika između P_A i P_B je snaga masenog protoka koja se iskorištava u turbini:

$P = P_A - P_B = g \left(h_A + h'_A + \frac{c_A^2}{2g} \right) - g \left(h_B + h'_B + \frac{c_B^2}{2g} \right) \left[\frac{kgm^2}{s^3} = W \right]$	[9.40]
--	--------

Razlika između razina vode na strani dovoda (gornja voda) i na strani odvoda (donja voda) naziva se brutopadom hidroelektrane (H_b). Određen je relacijom:

$H_b = (h_A + h'_A) - (h_B + h'_B) [m]$	[9.41]
---	--------

pa je jedinična iskoristiva snaga masenog protoka u vodnoj turbini:

$P = g \left(H_b + \frac{c_A^2}{2g} - \frac{c_B^2}{2g} \right) [W]$	[9.42]
--	--------

Drugi i treći član u zagradi izraza [9.42] imaju dimenziju duljine (m) i takvi se članovi nazivaju „visine brzine“. Drugi je član visina brzine na dovodnoj, a treći visina brzine na odvodnoj strani. Naime, kvadrat brzine podijeljen dvostrukim ubrzanjem Zemljine sile teže jednako djeluje kao i stupac vode visok onoliko kolika je visina brzine.

Izraz u zagradi jednadžbe [9.42] raspoloživi je ili netopad (H_n), pa je snaga masenog protoka:

$P = gH_n \left[\frac{kgm^2}{s^3} = W \right]$	[9.43]
---	--------

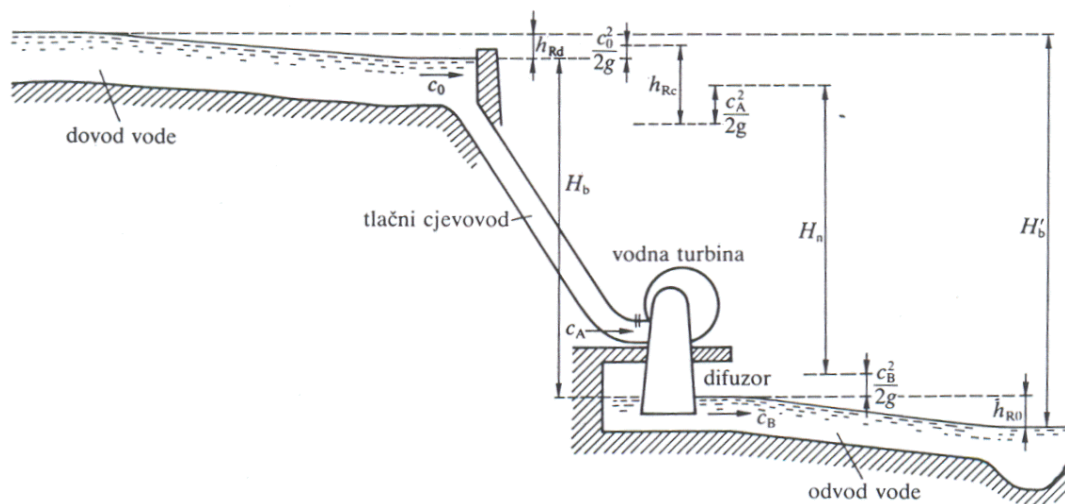
Množi li se ta snaga s ukupnim masenim protokom vode \dot{m} (kgs^{-1}), koju možemo prikazati kao produkt gustoće ρ (kg/m^3) i protoka Q (m^3/s), raspoloživa će snaga turbine biti:

$P_t = \dot{m}P = g\rho QH_n \left[\frac{\text{kgm}^2}{\text{s}^3} = W \right]$	[9.44]
--	--------

S obzirom da je za vodu koja služi za pogon vodnih turbina dopušteno uz vrlo veliku točnost uzeti da je $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, raspoloživa se snaga u praksi određuje iz izraza:

$P_t = gQH_n [\text{kW}]$	[9.45]
---------------------------	--------

Budući da se radi o vodnoj turbini u hidroelektrani u kojoj se voda iskorištava na malom bruto-padu H_b , u proračunu netopada zanemareni su gubici pri dovodu vode turbini, što je i dopustivo u takvim prilikama. Raspoloživi li su veći padovi, dakle radi li se hidroelektrani s većim padom, slika 9-52, voda se turbini dovodi kanalom ili tunelom i zatim cjevovodom, pa se gubici u odvodu i dovodu moraju uzeti u obzir prigodom određivanja netopada i pritom treba razlikovati prirodni brutopad H'_b od iskoristivog brutopada H_b .



Slika 9-52 Shema hidroelektrane s velikim padom

Oni se međusobno razlikuju za gubitke pada u dovodu vode h_{Rd} od vodotoka iz kojeg se uzima voda za energetska iskorištavanje i za gubitke pada h_{Ro} od hidroelektrane do mjesta u vodotoku gdje se vraća energetski iskorištena voda. Prema tome je:

$H_b = H'_b - h_{Rd} - h_{Ro} [m]$	[9.46]
------------------------------------	--------

Gubici pada nisu ništa drugo nego mjera za gubitke energije, odnosno snage vode pri strujanju dovodnim i odvodnim kanalom ili tunelom, jer su gubici energije određeni relacijama $w_{Rd} = gh_{Rd}$ odnosno $w_{Ro} = gh_{Ro}$.

Da bi se odredio netopad iskoristiv u vodnoj turbini, treba dakle poći od brutopada H_b . Postupimo li na opisani način, relacija je za netopad

$H_n = H_b + \frac{c_0^2}{2g} + \frac{c_A^2}{2g} - \frac{c_B^2}{2g} - h_{Rc} [m]$	[9.47]
---	--------

a na razini donje vode :

$P_B = \frac{p_{ok}}{\rho} + g \cdot h_B$	[9.50]
---	--------

U oba slučaja za tlak je uvedena oznaka p_{ok} jer u oba presjeka djeluje tlak okolice, a brzina je u odvodnom kanalu zanemarena, kao znatno manja od c_2 . Razlika između P_2 i P_B gubici su energije koji iznose:

$\delta P = P_2 - P_B = \frac{c_2^2}{2} + g(h_2 - h_B) = \frac{c_2^2}{2} + gH_s$	[9.51]
--	--------

Prema tome, kad voda u slobodnom mlazu izlazi iz turbine, pojavljuju se gubici zbog neiskorištene kinetičke energije koju ona ima na izlazu iz turbine i zbog neiskorištene potencijalne energije vode proporcionalne razini vode na izlazu iz turbine i razine donje vode. Kad bi bilo moguće izlaz turbine smjestiti neposredno na razinu donje vode, nestao bi drugi član na desnoj strani relacije [9.51], pa bi gubici nastajali samo zbog neiskorištene kinetičke energije. Pokazuje se, međutim, postavi li se na izlaz iz turbine cilindrična cijev, slika 9-53, koja se naziva aspiratorom, prilike se mijenjaju. Da bi se to utvrdilo, promotrit će se presjek 3 na izlazu iz aspiratora i presjek B na razini donje vode. Energija koju ima voda na izlaznom presjeku aspiratora, uz pretpostavku da je $c_3 = c_2$ (cijev konstantnog presjeka), iznosi:

$P_3 = \frac{p_3}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + g \cdot h_3$	[9.52]
--	--------

Za presjek B vrijedi relacija [9.50], pa je gubitak energije:

$\delta P = P_3 - P_B = \frac{p_3}{\rho} - \frac{p_{ok}}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} - g(h_B - h_3)$	[9.53]
--	--------

Osim toga, mogu se, uz pretpostavku da je brzina u odvodnom kanalu zanemarivo mala, postaviti Bernoullijeve jednadžbe za presjek neposredno na izlazu iz aspiratora, kad je već brzina strujanja zanemarivo malena, i za presjek na razini donje vode. Tad je:

$\frac{p_3}{\rho} + gh_3 = \frac{p_{ok}}{\rho} + gh_B$	[9.54]
--	--------

Iskoristimo li jednadžbu [9.54] u [9.53] dobit ćemo da su gubici jednaki

$\delta P = \frac{c_2^2}{2}$	[9.55]
------------------------------	--------

Prema tome, postavi li se aspirator, gubici se na izlazu smanjuju na iznos koji odgovara smještaju izlaza turbine na razini donje vode.

Međutim, da bi se spriječila pojava kavitacije, visina aspiratora ne smije biti veća od 8m. Naime, padne li tlak na bilo kojem mjestu za vrijeme strujanja kapljevine do tlaka isparivanja, kapljevina će na tom mjestu ispariti stvarajući mjehuriće i tako će biti spriječiti dalji pad tlaka.

U početku će nastati mali mjehurići pare, koji će se postupno pretvarati u veće. (Ta pojava može čak prekinuti strujanje.) Kad tako stvoreni mjehurići pare strujanjem dođu u područje višeg tlaka, nastaje nagla kondenzacija, pa se oni brzo ispunjavu kapljevnom. Ta se pojava naziva **kavitacija**, a praćena je više ili manje jakim šumom i naglim porastom tlaka, i do 100 MPa. Pri duljem pogonu postrojenja kavitacija može uzrokovati znatna oštećenja, pa se zbog toga lokalna smanjenja tlaka, koja izazivaju pojavu kavitacije, moraju spriječiti. U slučaju aspiratora, tlak p_2 na izlazu iz rotora turbine, koji je jednak $p_{ok} - \rho g H_s$, mora biti veći od tlaka isparivanja vode (koji ovisi o temperaturi vode) jer će se inače pojaviti kavitacija. Drugim riječima, mora biti zadovoljena nejednadžba

$p_s \leq p_{ok} - \rho g H_s$	[9.56]
--------------------------------	--------

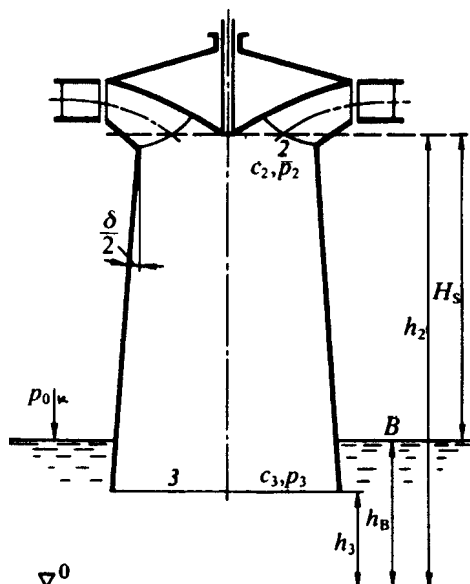
odnosno nejednadžba

$H_s \leq \frac{p_{ok}}{\rho g} - \frac{p_s}{\rho g}$	[9.57]
---	--------

To znači da se izlazni presjek turbine iznad razine donje vode mora smjestiti tako da bude zadovoljena nejednadžba [9.57]. Uzme li se da je tlak okolice približno 1 bar, gustoća vode 1000 kg/m^3 , a $g=9,81 \text{ m/s}^2$, dobiva se dovoljno točno da je $p_{ok}/\rho g = 10 \text{ m}$. Normalno se uzima da drugi član u [9.57] mora zbog sigurnosti iznositi 2 m, pa je $H_s \leq 8 \text{ m}$.

9.8.2 Difuzor

Kako bi se smanjili gubici kinetičke energije, koji su posljedica činjenice da voda iz vodne turbine izlazi brzinom znatno većom od nule, umjesto aspiratora upotrebljava se difuzor, cijev koja se proširuje, pa na izlazu iz njega voda ima manju brzinu c_3 nego na izlazu iz turbine gdje je brzina c_2 , slika 9-54.



Slika 9-54 Turbina s difuzorom

Ako se uračunaju i gubici snage u difuzoru $g \cdot h_{rd}$, snaga vode na njegovu kraju (u presjeku 3) iznosi:

$P_3 = \frac{P_3}{\rho} + \frac{c_3^2}{2} + g \cdot h_3 + g \cdot h_{rd} [W]$	[9.58]
---	--------

a snaga vode na razini donje vode određena je relacijom:

$P_B = \frac{P_{ok}}{\rho} + g \cdot h_B$	[9.50]
---	--------

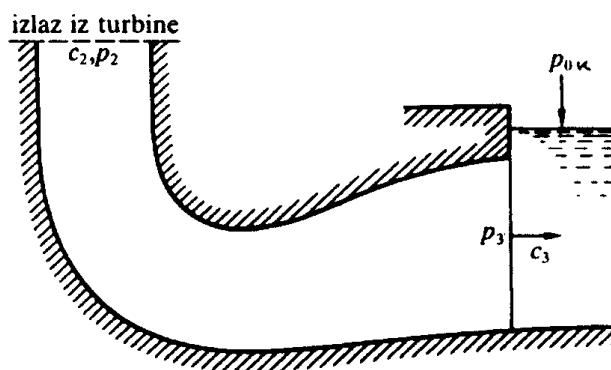
Uzevši u obzir relaciju

$\frac{P_3}{\rho} + gh_3 = \frac{P_{ok}}{\rho} + gh_B$	[9.54]
--	--------

gubici su na izlazu:

$\delta P = \frac{c_3^2}{2} + g \cdot h_{rd} [W]$	[9.59]
---	--------

Prema tome, znatno smanjivši brzinu na izlazu iz turbine daju se gotovo potpuno eliminirati gubici kinetičke energije ($c_3^2/2$), ali je za to potrebno veliko proširenje difuzora. Ono se može ostvariti ili povećavanjem duljine difuzora ili uz veliki kut proširenja. U prvom slučaju valja turbinu smjestiti visoko iznad donje vode, što se ne može zbog pojave kavitacije. Osim toga, s duljinom difuzora povećavaju se gubici energije $g \cdot h_{rd}$. S druge strane pak, veliki kut proširenja izaziva odvajanje strujanja, što stvara dodatne gubitke. Zbog toga se izvodi difuzor u obliku zavoja, slika 9-55.



Slika 9-55 Difuzor u obliku zavoja

Sve relacije za konični difuzor, slika 9-54, vrijede i za difuzor u obliku zavoja, slika 9-55, uz napomenu da pri određivanju gubitaka u difuzoru, $g \cdot h_{rd}$, valja uračunati i gubitke zbog promjene smjera strujanja vode. Nadalje, budući da je u difuzoru $c_2 > c_3$, pri njegovoj upotrebi valja izlaz iz turbine smjestiti niže nego za aspirator.

9.9 Strujanje, istjecanja i preljev vode

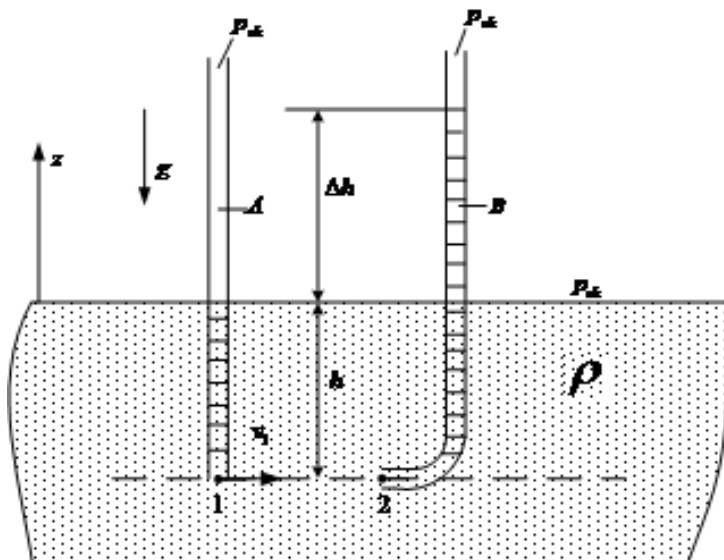
Strujanja i prelive vode promatramo kao jednodimenzionalno, stacionarno strujanje idealne kapljevine, 3.1.2.2.1, primjenjujući pritom jednadžbu kontinuiteta i 1. glavni stavak termodinamike za otvorene sustave (princip očuvanja energije – Bernoullijevu jednadžbu). Činjenicu da se u procesima u hidroelektranama voda ponaša kao realni fluid uzimamo u obzir (kompenziramo), kad je to moguće, različitim, ovisno o potrebama, (empirijski određenim) faktorima.

9.9.1 Brzina strujanja

Bernoullijevom jednadžbom analiziramo strujanje idealne kapljevine (duž jedne strujnice) u svim slučajevima kad, sa zadovoljavajućom točnošću, možemo objasniti i ponašanje realnih pojava i realnih djelovanja uređaja. Primjerice, zadovoljavajući se rezultati primjene Bernoullijeve jednadžbe dobivaju prigodom određivanja parametara (brzine i protoka) strujanja u riječnim tokovima i cijevima odaberemo li kao karakterističnu strujnicu onu koja prolazi simetralom cjevovoda i duž koje se, zbog kratkih udaljenosti, može zanemariti utjecaj viskoznosti.

9.9.1.1 Određivanje brzine strujanja vode u otvorenim tokovima

Slika 9-56 objašnjava princip određivanje brzine strujanja vode u (otvorenom) kanalu. U tijek vode, u kojem su strujnice vodoravne i pravocrtne, uronjene su dvije cjevčice: ravna, cjevčica A (piezometrička cijev), i zakrivljena, u obliku slova J, cjevčica B (Pitotova cijev) koja je otvorom okrenuta strujanju. S obzirom da su strujnice horizontalne i ravne, raspodjela tlaka u okomitom smjeru na smjer strujnica je ista kao u fluida u mirovanju, te će tlak u točki 1 biti $p_1 = p_{ok} + \rho gh$, a razina fluida u cjevčici A bit će u razini slobodne površine, mjereći tako statički tlak u točki 1. Nasuprot tome, na ulazu u cjevčicu B, u točki 2, brzina mora biti jednaka nuli, jer fluid u cjevčici B miruje, što znači da je točka 2 točka zastoja.



Slika 9-56 Mjerenje brzine vode u kanalu

Bernoullijeva jednadžba postavljena duž vodoravne strujnice od točke 1 do točke 2 glasi

$p_1 + \frac{1}{2} \rho c_1^2 = p_2$	[9.60]
--------------------------------------	--------

iz koje je očito da je tlak u točki 2 veći od tlaka u točki 1 za vrijednost kinetičke energije čestice fluida izražene po jedinici volumena, što se naziva dinamičkim tlakom $\left[\frac{N}{m^2} \equiv \frac{N \cdot m}{m^2 \cdot m} \equiv \frac{J}{m^3} \right]$. U općenito napisanoj Bernoullijevoj jednadžbi pojedinim se članovima dakle mogu pridijeliti ova značenja:

$\underbrace{\underbrace{p}_{\text{statički tlak}} + \underbrace{\frac{1}{2} \rho c^2}_{\text{dinamički tlak}} + \underbrace{\rho g z}_{\text{hidrostatski tlak}}}_{\text{ukupni tlak}} = \text{konst. duž strujnice}$	[9.61]
--	--------

Bernoullijeva bi se jednadžba [9.60] mogla dakle promatrati i u svjetlu činjenice da ukupni tlak duž strujnice ostaje konstantan. Izrazimo li, prema slici 9-56, tlak p_2 ovako

$p_2 = p_{ok} + \rho g (h + \Delta h)$	[9.62]
--	--------

uvrštenjem [9.62] u [9.60] dobivamo

$\frac{1}{2} \rho v_1^2 = \rho g \Delta h$	[9.63]
--	--------

budući da je tlak p_1 jednak $p_{ok} + \rho g h$, odnosno

$c_1 = \sqrt{2g\Delta h}$	[9.64]
---------------------------	--------

Prema tome $\rho g \Delta h$ mjeri dinamički tlak, a visina Δh pokazuje visinu brzine c_1 . Očito, mjerimo li brzine u otvorenom toku (kanalu, koritu rijeke), dostatno je uroniti samo Pitotovu cijev (cjevčicu B), piezometrička cijev (cjevčica A) nije potrebna. Mjerimo li, međutim, brzinu u zatvorenim cjevovodima, mjerenje je statičkog tlaka nužno.

9.9.1.2 Određivanje brzine strujanja vode u cijevima

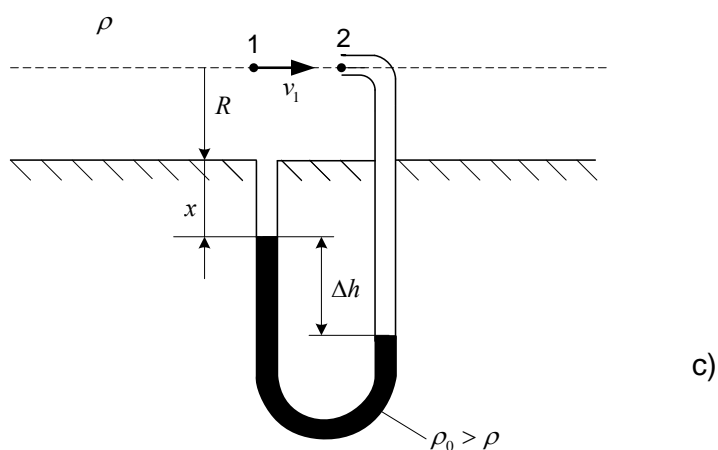
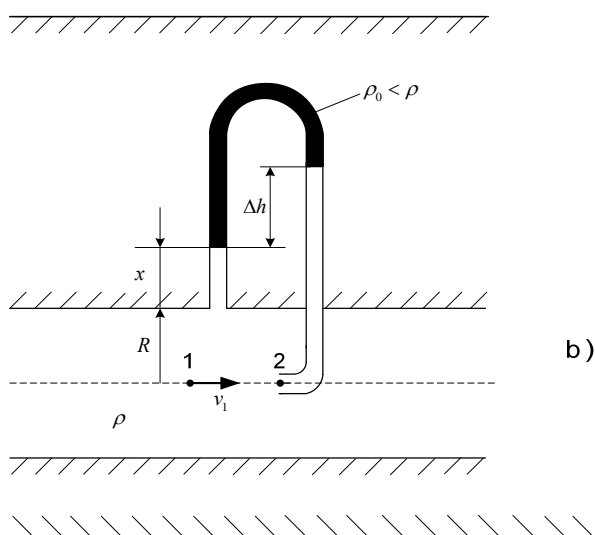
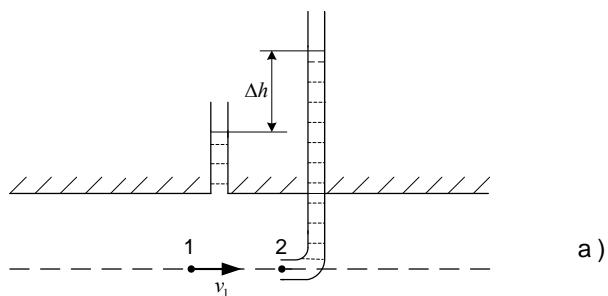
Slika 9-57a) ilustrira mjerenje brzine s odvojenim mjerenjima statičkog i dinamičkog tlaka. Takvo se mjerenje može obaviti nije li dinamički tlak u cijevi suviše velik, odnosno, kad se može izmjeriti stupcem tekućine. S obzirom da je za određivanje brzine potrebno znati samo razliku tlakova (a ne i njihove apsolutne vrijednosti), bolji je način mjerenja njihove razlike pomoću diferencijalnog manometra ispunjenog fluidom gustoće ρ_0 . Razlikujemo pritom dvije mogućnosti: slika 9-57b) - gustoća je ρ_0 manja od gustoće vode ρ , ili, slika 9-57c), gustoća je ρ_0 veća od gustoće vode ρ .

Jednadžba manometra od točke 2 do točke 1, prema slici 9-57b), glasi

$p_2 - \rho g (R + x + \Delta h) + \rho_0 g \Delta h + \rho g (R + x) = p_1$	[9.65]
--	--------

što uvršteno u Bernoullijevu jednadžbu, [9.60], daje izraz za brzinu c_1 :

$c_1 = \sqrt{2g\Delta h \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)}$	[9.66]
--	--------



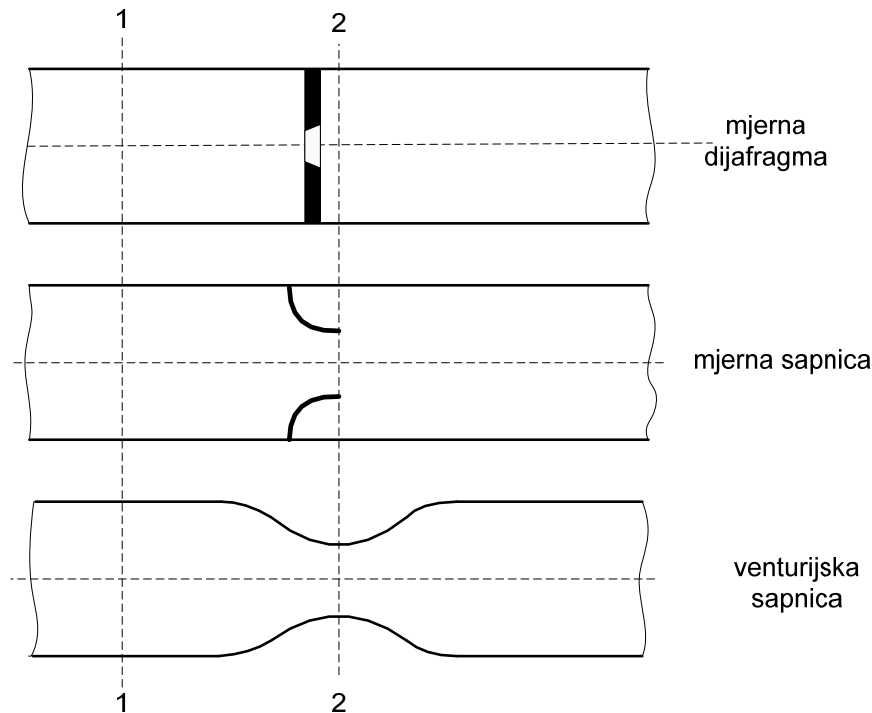
Slika 9-57 Mjerenje brzine u cijevima

Slično, ukoliko je $\rho_0 > \rho$, prema slici 9-57c) i jednadžbi [9.60] dobivamo izraz

$c_1 = \sqrt{2g\Delta h \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)}$	[9.67]
--	--------

9.9.2 Mjerenje protoka pomoću venturijske sapnice

Slika 9-58 shematski prikazuje tri instrumenta za mjerenje veličine protoka u cijevi.

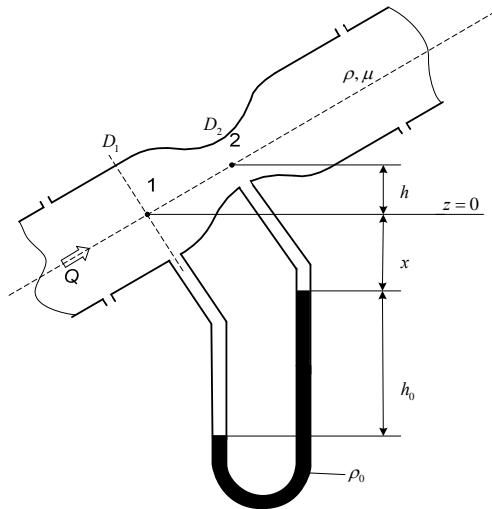


Slika 9-58 Instrumenti za mjerenje protoka

Kod svih je instrumenata princip rada isti. Sužavanjem presjeka strujanja dolazi do pada tlaka koji je razmjeran protoku Q . U svim instrumentima se zbog toga mjerenjem razlike tlakova u dva presjeka (na slici 9-58 su to presjeci 1 i 2) može odrediti protok.

Primjena mjerne dijafragme zahtijeva najmanje prostora za ugradnju, ali su pri strujanju kroz dijafragmu gubitci eksergije najveći. S druge strane, primjenom venturijske sapnice (venturijskom sapnicom naziva se cijev kojoj se smanjuje pa zatim opet povećava promjer), gubi se najmanje eksergije, ali je zato potrebna dulja dionica cijevi za ugradnju takvog instrumenta.

Slika 9-59 shematski prikazuje venturijsku sapnicu ugrađenu u koso postavljeni cjevovod. Diferencijalni manometar mjeri razliku tlakova u presjecima 1 (promjera D_1) i 2 (promjera D_2).



Slika 9-59 Primjer strujanja kroz venturijsku sapnicu

U užem je presjeku brzina strujanja veća, pa je u njemu tlak niži, te manometar pokazuje otklon kao na slici. Jednadžba kontinuiteta za strujanje kroz venturijsku sapnicu glasi

$Q = c_1 \frac{D_1^2 \pi}{4} = c_2 \frac{D_2^2 \pi}{4}$	[9.68]
---	--------

a Bernoullijeva je jednadžba od točke 1 do točke 2

$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{c_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{c_2^2}{2g} + h$	[9.69]
---	--------

Jednadžba je pak manometra oblika

$p_1 + \rho g(x + h_0) - \rho_0 g h_0 - \rho g(x + h) = p_2$	[9.70]
--	--------

Kombinirajući relacije [9.68], [9.69] i [9.70] dobivamo relaciju kojom je određen protok Q_{id} :

$Q_{id} = \frac{D_2^2 \pi}{4} \sqrt{\frac{2gh_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)}{1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4}}$	[9.71]
---	--------

(Indeks „id“ upozorava da se radi o veličini protoka idealnog fluida.)

Očito, visinska razlika h između presjeka 1 i 2 ne utječe na protok Q_{id} ; mjerenjem je visine h_0 , koju pokazuje diferencijalni manometar, moguće odrediti protok. Stvarni protok treba korigirati „koeficijentom brzine φ “ kojim se uzima u obzir viskoznost fluida i „koeficijentom kontrakcije mlaza ψ “ kojim se uzima u obzir suženje mlaza u najužem presjeku sapnice. Stvarni je protok Q dakle određen izrazom:

$Q = \varphi \cdot \Psi \cdot \frac{D_2^2 \pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2gh_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)}{1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4}} = \varphi \cdot \Psi \cdot Q_{id} \left[\frac{m^3}{s} \right]$	[9.72]
--	--------

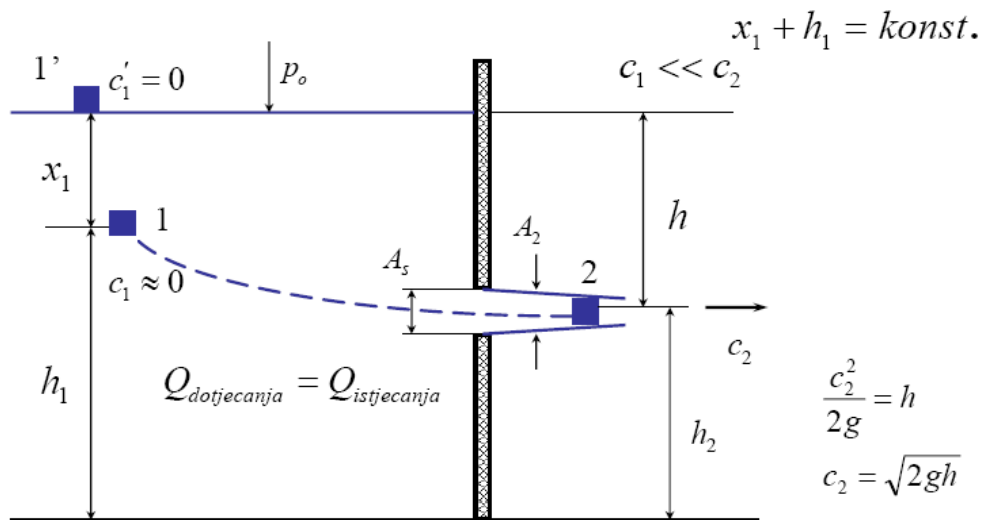
Radi li se o pomno izrađenoj venturijskoj sapnici, koeficijent je kontrakcije jednak jedan, a koeficijent brzine φ ovisi o brzini strujanja kapljevine (o tzv. Reynoldsovom broju: $Re = \rho c_1 D_1 / \mu$). Za „uobičajene“ izvedbe sapnice i „uobičajene“ brzine strujanja, kada je Reynoldsov broj veći od $2 \cdot 10^5$, koeficijent je brzine konstantan i iznosi približno 0,984. Određuje se na osnovi pokusa.

Poznajemo li ploštine presjeka u 1 i 2, A_1 i A_2 , jednačba kojom se određuje protok pomoću venturijske sapnice poprima poznatiji oblik:

$Q = \varphi \cdot \Psi \cdot \sqrt{\frac{2gh_0}{\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}}} \left[\frac{m^3}{s} \right]$	[9.72a]
--	---------

9.9.3 Istjecanje kroz mali otvor

Za istjecanje kroz mali otvor, slika 9-60, također vrijedi Bernoullijeva jednačba.



Slika 9-60 Primjer istjecanja iz velikog spremnika kroz mali otvor

Promatrat ćemo najprije strujanje vode od točke 1, u spremniku u kojem se održava konstantna razina kapljevine dotjecanjem upravo onolike količine koliko istječe kroz sapnicu (mali otvor) na stijenci spremnika, do točke 2 u mlazu istjecanja.

Za tu strujnicu Bernoullijeva jednačba glasi

$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}c_1^2 + gh_1 = \frac{p_{ok}}{\rho} + \frac{1}{2}c_2^2 + gh_2$	[9.73]
--	--------

jer na mlaz (vodu koja je istekla iz spremnika) djeluje tlak okolice p_{ok} . Analogna jednadžba može se postaviti za strujanje od 1' do 1, pa je

$\frac{p_{ok}}{\rho} + \frac{1}{2}c_1'^2 + g(h_1 + x_1) = \frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}c_1^2 + gh_1$	[9.74]
---	--------

Brzina je $c_1' = 0$ jer se razina vode održava konstantnom, a brzina je c_1 približno jednaka nuli zbog relativno velikog spremnika u usporedbi s otvorom sapnice. Prema tome, energija je tlaka u točki 1

$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_{ok}}{\rho} + gx_1$	[9.75]
---	--------

što odgovara prilikama kad tekućina miruje ($c_1 = 0$).

Uvrsti li se izraz [9.75] u [9.73], te uzme u obzir da je $c_1 = 0$, dobiva se

$\frac{1}{2}c_2^2 = g(h_1 + x_1 - h_2) = gh$	[9.76]
--	--------

Na desnoj strani jednadžbe h je razlika između razine tekućine u spremniku i simetrale otvora na njegovoj stijenci. Iz relacije [9.76] određuje se brzina istjecanja; dobivamo poznati nam odnos:

$c_2 = \sqrt{2gh} \left[\frac{m}{s} \right]$	[9.77]
---	--------

Ako je ploština presjeka mlaza A_2 , protok Q' koji istječe bit će

$Q' = A_2 c_2 = A_2 \sqrt{2gh} \left[\frac{m^3}{s} \right]$	[9.78]
--	--------

Budući da nastaje kontrakcija mlaza (kao posljedica principa očuvanja mase), ploština presjeka mlaza A_2 manja je od ploštine presjeka sapnice A_s , što je definirano koeficijentom kontrakcije

$\Psi = \frac{A_2}{A_s}$	[9.79]
--------------------------	--------

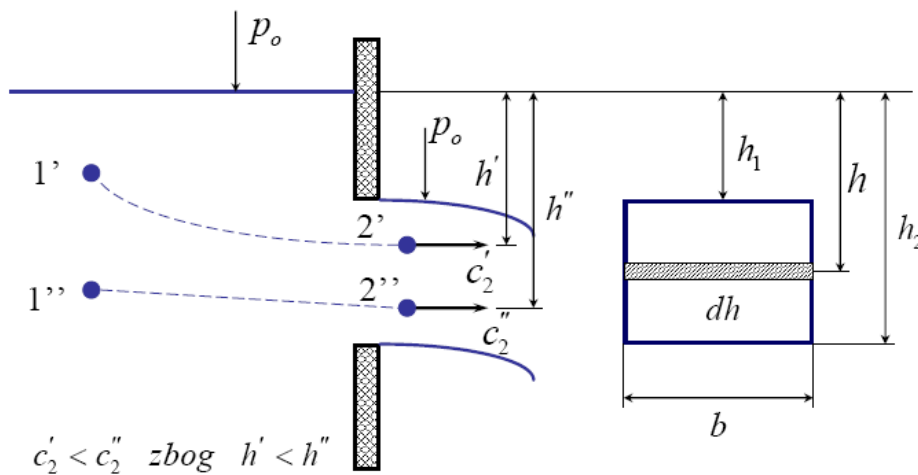
Osim toga, da bi se uvažilo i trenje (viskoznost) vode, zbog kojeg je brzina istjecanja manja od određene izrazom [9.77], uvodi se koeficijent brzine φ , pa se stvarni (realni) protok određuje iz relacije

$Q = \Psi \varphi A_s \sqrt{2gh} \left[\frac{m^3}{s} \right] = \mu A_s \sqrt{2gh} \left[\frac{m^3}{s} \right]$	[9.80]
--	--------

gdje je $\mu = \psi\varphi$ „koeficijent istjecanja“. Taj se koeficijent određuje eksperimentalno, a ovisi o svojstvima tekućine, o obliku otvora, o položaju otvora s obzirom na dno spremnika (posude) itd. Koeficijent brzine za vodu iznosi približno 0,97, a koeficijentu kontrakcije vrijednosti su od 0,60 do 0,65; vrijednost mu je manja uz veću površinu otvora i kad je otvor više udaljen od površine vode (jer je tada brzina istjecanja veća).

9.9.4 Istjecanje kroz velike otvore

Radi li se o velikim otvorima u stijenci spremnika (ili brane), valja uočiti da će pojedine strujnice biti različito udaljene od razine površine vode, pa će se zato i razlikovati brzine strujanja u pojedinim visinama presjeka mlaza, Slika 9-61. (Te su se razlike u brzinama pri istjecanju kroz male otvore mogle zanemariti.)



Slika 9-61 Primjer istjecanja kroz veliki otvor

Pišemo li Bernoullijevu jednadžbu za strujnice 1'-2' i 1''-2'' uzimajući u obzir da je $c_1' = 0$ i $c_1'' = 0$, kako je pretpostavljeno kad se razmatralo istjecanje kroz mali otvor, te budući da u presjeku mlaza u točkama 2' i 2'' vlada tlak okolice p_{ok} , dobivamo da su brzine u točkama 2' i 2'' jednake

$c_2' = \sqrt{2gh'} \left[\frac{m}{s} \right]; c_2'' = \sqrt{2gh''} \left[\frac{m}{s} \right]$	[9.81]
--	--------

Pritom je $c_1'' > c_1'$ jer je $h'' > h'$.

Računajući s koeficijentom istjecanja μ , te promatrajući diferencijalnu površinu presjeka širine b i visine dh , koja je na okomitoj udaljenosti b od razine površine vode u spremniku (akumulacijskom jezeru), diferencijalni je protok kroz diferencijalnu površinu određen jednadžbom

$dQ = \mu \cdot c \cdot dA = \mu \cdot \sqrt{2gh} \cdot b \cdot dh \cdot \left[\frac{m^3}{s} \right]$	[9.82]
--	--------

koja odgovara relaciji [9.80]. Ukupni se protok kroz otvor dobiva integrirajući relaciju [9.82] u granicama h_1 i h_2 , pa je

$Q = \mu b \sqrt{2g} \int_{h_1}^{h_2} \sqrt{h} dh \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \left(\sqrt{h_2^3} - \sqrt{h_1^3} \right) \left[\frac{m^3}{s} \right]$	[9.83]
---	--------

Ne smijemo li zanemariti brzinu dotoka tekućine u spremnik (akumulacijsko jezero), ili ako se radi o kanalu, tada, u dovoljnoj udaljenosti od stijenke u kojoj se nalazi otvor, možemo pretpostaviti da će se voda po cijelom presjeku gibati istom brzinom c_0 , paralelno dnu (spremnika, jezera, kanala). Za koju god strujnicu, npr. od 1' do 2', slika 9-61, vrijedi

$\frac{p_{1'}}{\rho} + \frac{1}{2} c_0^2 + g h_{1'2'} = \frac{p_{ok}}{\rho} + \frac{1}{2} c_2'^2$	[9.84]
---	--------

gdje je s $h_{1'2'}$ označena razlika razina između 1' i 2'.

Budući da je strujanje jednoliko, zakon se hidrostatskog tlaka ne će mijenjati (jer je težina elementa fluida uravnotežena samo prirastom tlaka), pa je

$\frac{p_{1'}}{\rho} = \frac{p_{ok}}{\rho} + g h_{1'}$	[9.85]
--	--------

(S $h_{1'}$ označena je visina stupca tekućine iznad 1'.)

Uzevši u obzir da je da je $h_{1'} + h_{1'2'} = h'$ (slika 9-61) slijedi

$\frac{c_0^2}{2} + g h' = \frac{c_2'^2}{2} \Rightarrow c_2' = \sqrt{2g h' + c_0^2}$	[9.86]
---	--------

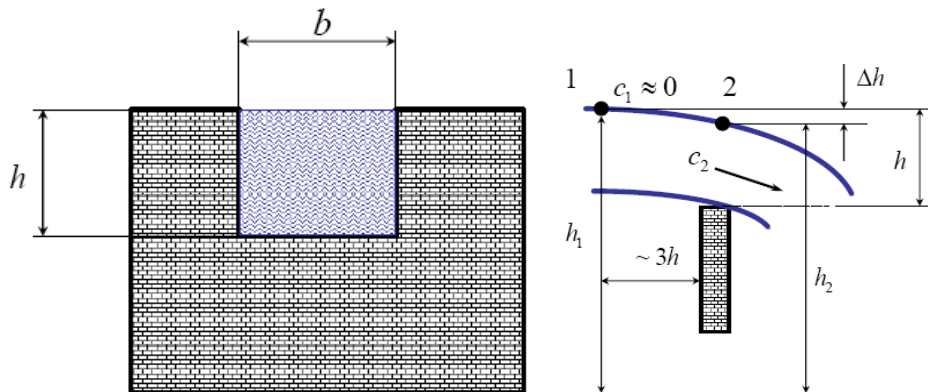
Količina vode koja istječe bit će dakle za promatrani otvor

$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \left(\sqrt{\left(h_2 + \frac{c_0^2}{2} \right)^3} - \sqrt{\left(h_1 + \frac{c_0^2}{2} \right)^3} \right) \left[\frac{m^3}{s} \right]$	[9.87]
---	--------

9.9.5 Istjecanje preko preljeva

Analogno se razmatranje provodi i za istjecanje preko preljeva, slika 9-62. Tada se može postaviti daje $h_1 = 0$ i $h_2 = h$, pa izraz [9.83] prelazi u

$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \int_0^h \sqrt{h} dh \left[\frac{m^3}{s} \right] = \frac{2}{3} \mu b h \sqrt{2gh} \left[\frac{m^3}{s} \right]$	[9.88]
---	--------



Slika 9-62 Primjer istjecanja preko preljeva

Mjerodavna se visina h određuje se na dovoljno velikoj udaljenosti od preljeva (oko $3h$) jer se razina vode u blizini otvora spušta za iznos koji odgovara povećanju brzine u profilu preljeva. To se sniženje razine također izračunava pomoću Bernoullijeve jednadžbe, koja za točke 1 i 2 glasi

$\frac{p_{ok}}{\rho} + gh_1 = \frac{p_{ok}}{\rho} + \frac{1}{2}c_2^2 + gh_2$	[9.89]
--	--------

Pretpostavljeno je naime da je $c_1 = 0$. Sniženje je razine vode stoga

$h_1 - h_2 = h = \frac{c_2^2}{2g} [m]$	[9.90]
--	--------

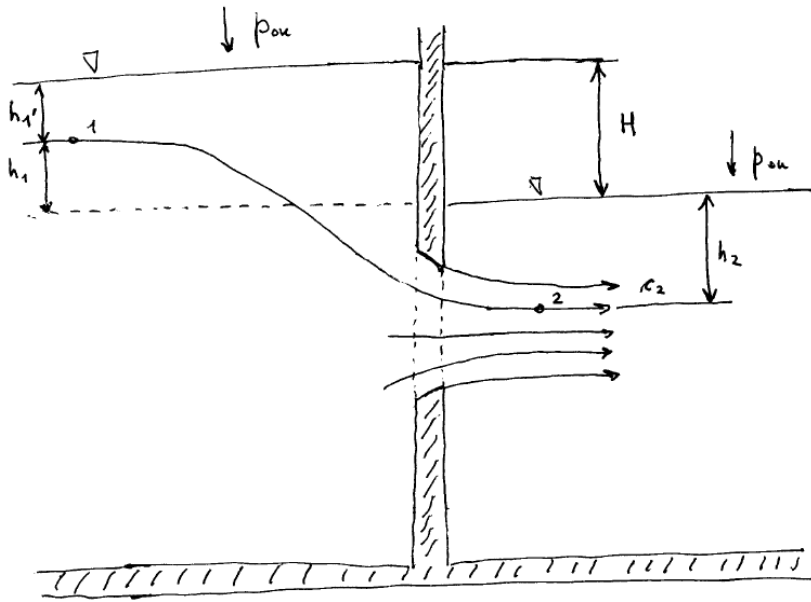
Koeficijent istjecanja μ ustanovljuje se pokusom. (U priručnicima su različite formule za njegovo određivanje (to vrijedi i za istjecanje kroz velike otvore). Pri upotrebi tih formula valja se pridržavati ograničenja unutar kojih one vrijede.)

Ne možemo li zanemariti brzinu dotoka vode, prema rečenome u 9.9.4, količina vode što se prelijeva iznositi će

$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \sqrt{\left(h + \frac{c_0^2}{2}\right)^3} \left[\frac{m^3}{s}\right]$	[9.91]
--	--------

9.9.6 Istjecanje pod vodom

Bernoullijeva jednadžba za strujnicu od 1 do 2 glasi, uzevši kao razinu usporedbe donju razinu vode, slika 9-63,



Slika 9-63 Istjecanje pod vodom

$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}c_1^2 + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}c_2^2 - gh_2$	[9.92]
---	--------

Budući da element vode na izlazu struji pravocrtno, a ne u obliku parabole kao kod istjecanja u atmosferu, jer je njegova težina uravnotežena uzgonom, za tlak p_2 važi zakon hidrostatskog tlaka

$\frac{p_2}{\rho} = \frac{p_{ok}}{\rho} + gh_2$	[9.93]
---	--------

Vrijedi li pretpostavka da je $c_1 = 0$, te budući da je

$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_{ok}}{\rho} + gh_1$	[9.94]
---	--------

dobivamo

$\frac{p_{ok}}{\rho} + gh_1 + gh_1 = \frac{p_{ok}}{\rho} + gh_2 + \frac{c_2^2}{2} - gh_2$	[9.95]
---	--------

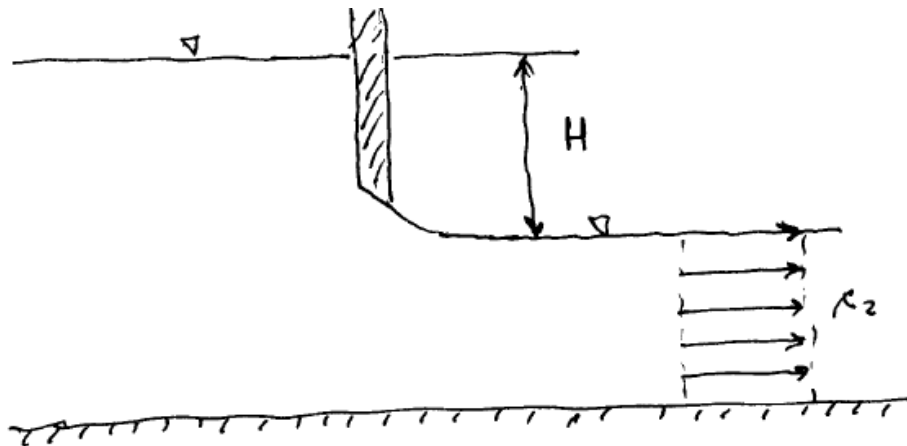
Jer je $h_1' + h_1 = H$, vrijedi

$c_2 = \sqrt{2gH} \left[\frac{m}{s} \right]$	[9.96]
---	--------

za svaku strujnicu.

Istjecanje je iz otvora na priključeni kanal, slika 9-64, poseban slučaj promatranog istjecanja. Uz dovoljno dug kanal, i jednoliku brzinu u njemu, možemo pisati Bernoullijevu jednadžbu s

istim pretpostavkama. Dobit ćemo da je brzina konstantna po cijelom presjeku kanala, a njena je veličina određena relacijom [9.96].



Slika 9-64 Istjecanje iz otvora na priključeni kanal