

MATEMATIČKO MODELIRANJE BRZIH PEŠČANIH FILTRA

Dejan LJUBISAVLJEVIĆ, Milko JONOVIC
Građevinski fakultet u Beogradu

REZIME

U pripremi vode za piće, najvažnije životne namirnice, brzi peščani filtri se uspešno koriste više od jednog veka i kao jednostavna, jeftina i veoma pouzdana tehnika uspešno odolevaju novim tehnologijama. U ovom radu je opisan mehanizam filtracije, a poseban akcenat je stavljen na dinamiku i matematičku teoriju filtracije. Takođe je opisan i postupak pranja filtra, operacije koja je učestala tokom eksploatacije brzih peščanih filtra, prikazani su tipovi konstrukcija sistema za pranje brzih filtra i najvažniji zaključci kojih bi se projektant trebalo držati prilikom projektovanja ovih sistema.

Ključne reči: filtracija, peščani filtri, prečišćavanje vode

1. UVOD

Filtracija je jedan od konvencionalnih postupaka prečišćavanja vode, gde voda koja se tretira prolazi kroz porozni materijal. Tokom prolaska kroz porozni filtarski materijal kvalitet vode se poboljšava uklanjanjem suspendovanih i koloidnih materija, bakterija i drugih organizama, i hemijskom promenom sastojaka vode.

U praksi se kao filtarska ispuna u procesu filtracije vode najčešće koriste sledeći materijali: kvarcni pesak, drobljeni kamen, staklo, antracit, plastika i drugi inertni materijali. Kao filtarski materijal najčešće se koristi kvarcni pesak, s obzirom na relativno nisku cenu i zadovoljavajuće iskustvo u dosadašnjoj praksi. Čak i ako se koriste drugi filtarski materijali, kao na primer antracit, to je isključivo u kombinaciji sa peskom da bi se dobila višeslojna filtarska ispuna sa većim kapacitetom za akumulaciju nečistoća.

Poslednjih godina međutim, ovaj klasični postupak je sve više potisnut upotrebom dvostrukih, odnosno višestrukih filtarskih medijuma. Kombinacije mogu biti

veoma različite i zavise od nečistoća u vodi koje se žele ukloniti. Posmatrajući novije izvedbe filtra u fabrikama vode u Kanadi može se reći da ne postoji univerzalan par ili kombinacija medijuma koji bi mogli biti primenjeni za svaki tip vode, već se svaki slučaj ponaosob mora razmatrati i nakon preliminarnih hemijskih analiza i testiranja pilot postrojenjem može se utvrditi najbolja kombinacija. [1]

Tokom filtracije nečistoće se uklanjaju i akumuliraju na zrnima i u porama filtarskog materijala, što prouzrokuje smanjenje zapremine pora i povećanje hidrauličkog otpora u filtarskoj ispuni. Vremenom otpori kroz ispunu postaju veliki, pa je potrebno izvršiti pranje filtra zbog smanjenog kapaciteta filtracije. U odnosu na brzinu filtracije vode, interval između dva pranja i način regeneracije filtarske ispune, moguće je izvršiti podelu na spore i brze filtre.

Spori filtri su najstariji tip filtra koji služe za javno snabdevanje potrošača pitkom vodom. Voda kroz spore filtre prolazi gravitaciono kroz sloj finog peska vrlo malim brzinama. Brzina filtracije pri srednjoj dnevnoj potrošnji vode varira od 0,1-0,5 m/h. S obzirom da je brzina filtracije vrlo mala, interval između dva pranja filtra, tj. regeneracije, je relativno dug i iznosi nekoliko nedelja pa do nekoliko meseci. Na samoj površini filtarskog sloja komponovanog od finog peska, efektivnog prečnika zrna 0,15-0,35 mm, zadržavaju se koloidne i suspendovane materije i druge nečistoće. U cilju regeneracije filtra do prvobitnog kapaciteta, izdvojene materije se uklanjaju skidanjem gornjeg sloja zaprljanog peska, u sloju debljine od jednog do nekoliko santimetara.

Ako opterećenje vode zagađujućim materijama nije veliko, spori filtri pokazuju izvrsne rezultate u pogledu uklanjanja suspendovanih i koloidnih materija, bakterijskog zagađenja i supstanci koje izazivaju ukus i miris vode. Mane su im što zahtevaju velike površine,

što su početni troškovi njihove izgradnje veliki i što zahtevaju dosta fizičke radne snage za njihovo održavanje. Zbog toga se sve manje grade, pogotovo kada su u pitanju veći uređaji za kondicioniranje vode.[14]

Spori filtri su u Evropi vrlo česti i uspešno primenjavani. Spore filtre u sistemu kondicioniranja vode imaju i danas neki veliki evropski gradovi, kao što su npr. London i Roterdam. Međutim, sa sve većom upućenošću na površinske vodotoke, i zbog sve veće zagađenosti voda, danas se i u Evropi sve češće primenjuju brzi filtri. U Evropi se oni primenjuju kao prethodni postupak filtriranja na sporim filtrima, kao isključivi postupak kondicioniranja, ili kao što je to uobičajeno u američkoj praksi, kao završni postupak posle koagulacije, flokulacije i taloženja.

Za razliku od sporih, kod brzih filtra voda prolazi kroz krupniji filtarski materijal, sa znatno većim brzinama. Korišćenje brzih filtra, u prečišćavanju pitkih voda, uslovljeno je zahtevom za manjim prostorom. Razlikuju se od sporih filtra, zato što su biološki procesi nadomešteni sa hemijsko-fizikalnim procesima koagulacije i flokulacije.[2] Za konvencionalne brze filtre sa gravitacionim tokom vode na dole, pesak je granulacije od 0,5-2,0 mm. Za uslov srednje dnevne proizvodnje vode, brzina filtracije može biti u intervalu oko 5-8 m/h. Pri ovim uslovima znatno veće brzine filtracije potrebna je češća regeneracija filtra, koja se vrši pranjem vodom odozdo na gore, tj. suprotno toku filtracije vode. Razlika je i u načinu pranja ili regeneracije filtra, pa se to ovde posebno razgraničava.

Spori filtri: S obzirom na veličinu filtarskih zrna sva nečistoća iz vode se izdvaja na prvih nekoliko santimetara (2 do 3). Regeneracija se obavlja tako što se tih nekoliko santimetara ukloni, baci ili opere kao što se pere agregat za spravljanje betona. S obzirom da je ovaj proces regeneracije zahtevan i skup, učestalost regeneracije je jednom u 2 meseca. Iz tog razloga voda koja dolazi na spore pešćane filtre mora imati manju mutnoću od 15 NTU.

Brzi filtri: Pranje (regeneracija) se obavlja vodom u suprotnom smeru od filtracije. Učestalost može biti i jedanput dnevno.

Zavisno od tipa sirove vode filtracija se primenjuje posle aeracije (podzemna voda) ili posle koagulacije,

flokulacije i taloženja (bistrenje), ako je u pitanju sirova površinska voda.

Filtracija se koristi i u postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda. U pojedinim konkretnim slučajevima određivanja potrebnog stepena prečišćavanja, uzimajući u obzir lokalne uslove, bez obzira na primenju metodologiju moglo bi se doći do zahteva za strožijim parametrima kvaliteta efluenta od onih koji se postižu primenom klasičnog postupka biološkog prečišćavanja. U tom slučaju moraju se predvideti postupci za dodatno uklanjanje pojedinih materija iz otpadne vode. Ti postupci se često jednim imenom nazivaju postupci tercijarnog prečišćavanja i u njih između ostalih spada i filtracija. U tehnološkoj šemi filtraciji je mesto posle naknadne taložnice, odnosno posle završenog biološkog prečišćavanja. U tercijarnom tretmanu otpadnih voda filtracija se koristi i u kombinacijama sa drugim postupcima: prethodna flokulacija i taloženje, u tehnološkim šemama za uklanjanje azota i fosfora, i dr.[9]

2. MEHANIZAM FILTRACIJE VODE

Prema savremenom gledanju filtriranje vode na brzim filtrima je proces koji uključuje i fizičke i hemijske fenomene. U rasvetljavanju tih fenomena javile su se do sada mnoge fizičke i hemijske teorije filtriranja. Fizičke teorije filtriranja u glavnom tretiraju fizičke karakteristike, kao što su: veličina zrna filtarske ispune, brzina filtriranja, temperatura vode i dr. Hemijske teorije filtriranja uzimaju u obzir hemijske karakteristike tečne faze, površinske karakteristike suspendovanih čestica i filtarske ispune i dr.

Uklanjanje nečistoća iz vode postupkom filtracije sastoji se od više različitih procesa, kao što su: mehaničko zadržavanje čestica (efekat sita), taloženje, adsorpcija, hemijska i biološka aktivnost.

2.1 Mehaničko zadržavanje čestica

Suspendovane i koloidne materije koje su prisutne u sirovoj vodi najvećim delom se izdvajaju u gornjem sloju filtarske ispune. Čestice krupnije od pora raspoređuju se između zrna ispune i stvaraju uslove za izdvajanje sitnijih čestica nečistoće, slično kao na situ. Koloidne čestice koje su sitnije od pora prodiru dublje u filtarsku ispunu gde se jednim delom usled sekundarne flokulacije ukupnjuju i zadržavaju u porama sa krupnijom filtarskom ispunom.

2.2 Taloženje

Taloženjem se uklanjaju čestice koje su sitnije od pora filtarske ispune, slično taloženju u taložnici. U taložnici se mulj istaložava na dnu, dok je u filtarskoj ispuni na raspolaganju površina svih granulata u ispuni. Ako označimo poroznost sa p , 1 m^3 sfernih čestica prečnika d ima površinu:

$$\frac{6}{d} \cdot (1 - p) \quad [\text{m}^2]$$

U jednom m^3 filtarske ispune od peska prečnika $0,5 \text{ mm}$ sa poroznošću od 40% broj zrna u ispuni iznosi oko $9,15 \cdot 10^{15}$ sa površinom od oko 7.200 m^2 . Od ove površine efektivna površina koja se koristi za proces taloženja je oko 400 m^2 . S obzirom da efikasnost taloženja najviše zavisi od odnosa površinskog opterećenja i brzine taloženja jasan je uticaj ovog mehanizma na proces filtracije vode. Efikasnost taloženja je funkcija odnosa površinskog opterećenja i brzine taloženja čestica. Za laminarno taloženje važi Stokes-ov zakon:

$$s = \frac{1}{18} \cdot \frac{g}{n} \cdot \frac{r_s - r}{r} \cdot d^2$$

gde je d prečnik sferne čestice, ρ gustina vode i ρ_s gustina čestica i ν kinematska viskoznost fluida.

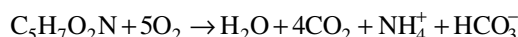
Najmanje i najlakše čestice se samo delimično uklanjaju, mada flokulacija prati kretanje vode nadole i povećava efikasnost taloženja sa dubinom. Koloidne materije ne mogu biti odstranjene na ovaj način. Istaložene materije smanjuju efektivnu poroznost, pa realna brzina kretanja vode naniže raste.

2.3 Adsorpcija

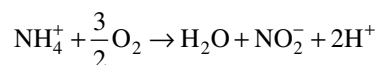
Procesom adsorpcije na filtarskoj ispuni uklanjaju se najsitnije koloidne čestice i molekuli rastvorenih jedinjenja u vodi. Sile adsorpcije imaju najjači uticaj na rastojanju do $0,01-1,00 \mu\text{m}$. Na drugoj strani, film vode koji okružuje čestice filtarske ispune ima mnogo veću debljinu. Tako, na primer, filtarski materijal prečnika $0,8 \text{ mm}$ i poroznosti 40% ima površinu približno 4.500 m^2 , tako da debljina filma nije manja od $90 \mu\text{m}$, a to je znatno više od veličine prisutnih čestica nečistoće u vodi. To znači da je uklanjanje najsitnijih čestica nečistoće adsorpcijom jedino moguće pomoću drugih procesa koji omogućavaju dovođenje čestica nečistoće u blizinu dejstva adsorpcionih sila, kao što su sile gravitacije, inercije, difuzije, hidrodinamičke i turbulencija.

2.4 Hemijska aktivnost

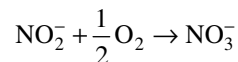
Hemijska aktivnost je proces pomoću kojeg se teško razgradljiva jedinjenja rastvorena u vodi prevode u jednostavnije, lakše razgradljive supstance ili u nerastvorne čestice koje se uklanjaju drugim mehanizmima filtracije. Kao primer hemijske aktivnosti tokom filtracije je uklanjanje iz vode rastvorenog dvovalentnog gvožđa, oksidacija amonijum jona uz učešće bakterija ili izdvajanje rastvorenog dvovalentnog mangana, gde manganizovana filtarska ispuna ima ulogu katalizatora. U prisustvu kiseonika može doći do aerobne razgradnje organske materije. Ta reakcija može biti predstavljena kao



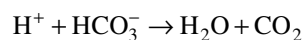
gde se vidi da uzimanjem $1,4 \text{ g}$ kiseonika proizvodi se $0,16 \text{ g}$ amonijaka po gramu organske materije. Formira se ugljen-dioksid koji ostaje u rastvoru i izbacuje se sa efluentom, a amonijak oksidišu bakterije *nitrosomonas* u nitrite



a stvorene nitrite nitrobakterije oksidišu u nitrate



Zajedno sa

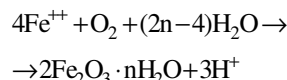


dobija se reakcija

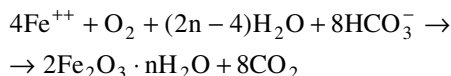


povećava se potražnja kiseonika do 2 g po gramu organske materije, dok je za kompletnu oksidaciju 1 g prisutnog amonijaka u sirovoj vodi potrebno najmanje $3,6 \text{ g}$ kiseonika.

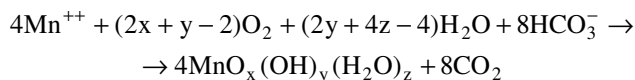
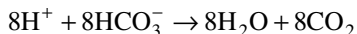
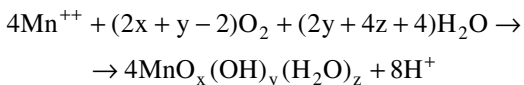
Potreban kiseonik je dosta manji za proces uklanjanja gvožđa u procesu prevođenja rastvorenih gvoždevitih komponenti u nerastvorne hidrate feri-oksida. Kada su prisutni bikarbonati, što je najčešći slučaj, reakcija je



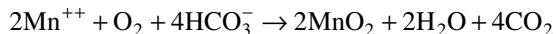
odnosno ukupno



uzimajući samo $0,14 \text{ g}$ kiseonika po gramu gvožđa. Za uklanjanje mangana reakcija je



Maksimalna moguća vrednost $(2x+y)$ može biti 4, koeficijent $(2x+y-2)$ nikada nije veći od 2, limitirajuća potrebna koncentracija kiseonika iznosi 0,29 g po gramu mangana, u skladu sa reakcijom

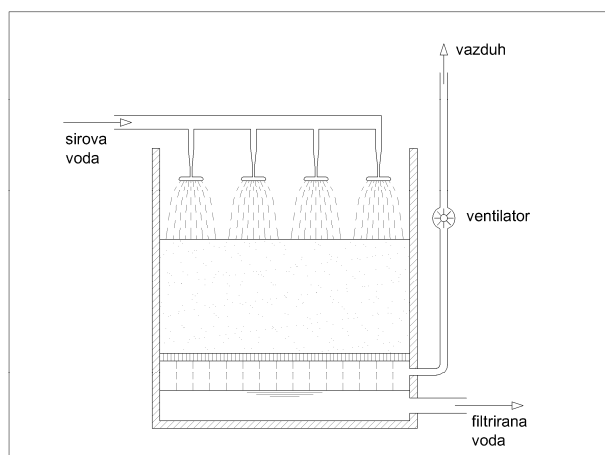


kojom se komponente mangana prevode u mangan dioksid.

2.5 Biološka aktivnost

Biološka aktivnost je direktno povezana sa mikroorganizmima koji žive u filtarskom sloju. U toku dužeg perioda rada filtra bakterije koje su prirodno prisutne u sirovoj vodi naseljavaju zrna ispunne, gde koriste deponovanu hranu tokom procesa filtracije vode. Hrana se delimično oksidiše da bi bakterije obezbedile energiju za životne procese (desimilacija) i delimično za prirast bakterijske mase (asimilacija). Na ovaj način koloidi i rastvorena jedinjenja transformišu se u bakterijsku masu i energiju za život bakterija.

Potrebno je voditi računa da proces aeracije podiže koncentraciju kiseonika do maximum 11 mg/l. (saturacija). Ukoliko ima dosta amonijum jona, 1 mg amonijum jona zahteva 3,55 mg kiseonika pa je potrebno primeniti suhu filtraciju.



Slika1. Suvi pešćani filter

2.6 Dinamika filtracije

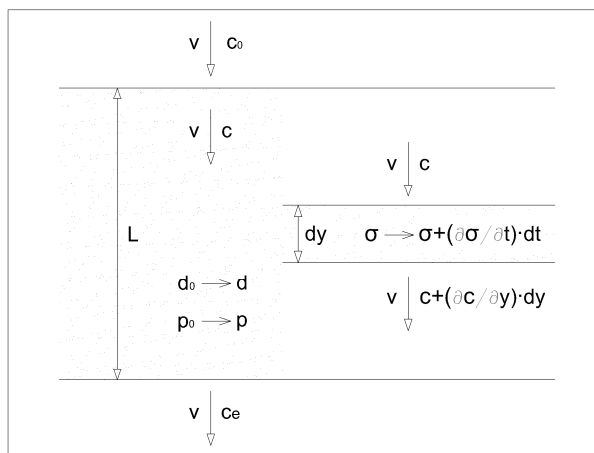
Tokom procesa filtracije, uklanjaju se nečistoće iz vode koja protiče kroz filtarsku ispunu. To znači da se s jedne strane poboljšava kvalitet vode, a sa druge dolazi do zapušavanja pora između filtarskih zrna što povećava otpore u filtru. Za matematički opis filtracije (slika 2) pretpostavljeno je da je filtarski sloj debljine L čist i sastavljen od okruglih zrna prečnika d_0 sa poroznošću p_0 . U toku filtracije nečistoće iz sirove vode izdvajaju se na površini zrna filtarskog materijala. To znači da se koncentracija sastojaka u sirovoj vodi (c_0) smanjuje po dubini filtarske ispune, tako da koncentracija nečistoća na dubini (y) iznosi (c), a na izlazu iz filtra (c_e). Na drugoj strani, prečnik zrna povećava se zbog izdvojenih nečistoća od (d_0) do (d), a zapremina pora smanjuje od (p_0) do (p). Sa konstantnom brzinom filtracije (v) stvarna brzina vode između pora filtracionog sloja povećava se od (v/p_0) do (v/p).

Smanjenje koncentracije suspendovanih i koloidnih materija u vodi koja prolazi kroz filtarsku ispunu proporcionalno je koncentraciji prisutnih nečistoća u vodi, što se može prikazati jednačinom

$$-\frac{\partial c}{\partial y} = \lambda \cdot c$$

gde je λ koeficijent proporcionalnosti, tj. Koeficijent filtracije. Kada se usvoji da je λ konstantno i jednako λ_0 , direktna integracija je moguća. Sa граниčnim uslovima $y=0, c=c_0$ dobija se

$$c = c_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot y}$$



Slika 2. Matematički opis filtracije

Saglasno ovoj jednačini, koncentracija nečistoća još uvek prisutnih u vodi koja struji naniže opada logaritamski sa dubinom, s tim što se najveći deo nečistoća zadržava u gornjem filtarskom sloju, dok se u donjim filtarskim slojevima relativno malo zadržava. Kvalitet efluenta je

$$c_e = c_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot L} \quad (1)$$

Na primer za $L=0,75$ m, $\lambda_0=6$ m⁻¹ i $c_0=15$ g/m³ dobija se $c_e=0,17$ g/m³

Nečistoće uklonjene iz vode tokom filtracije se raspoređuju po filtarskoj ispuni, i akumuliraju se na i između filtarskih zrna. Procenat uklonjenih nečistoća može biti određen na elementu debljine dy na dubini filtra y (slika 2). Za vreme t , nečistoće iz sirove vode biće akumulirane u koncentraciji σ . Tokom sledećeg perioda dt , ta koncentracija će porasti u iznosu $d\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial t} dt$. Saglasno jednačini kontinuiteta, taj porast mora biti jednak neto unošenju nečistoća koje se nalaze u vodi.[8]

akumulisanje = ulaz – izlaz

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} \cdot dt \cdot dy = v \cdot c \cdot dt - v \cdot (c + \frac{\partial c}{\partial y} dy) \cdot dt,$$

odnosno uprošćeno

$$-\frac{\partial c}{\partial y} = \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t}$$

U slučaju da je filtracioni koeficijent λ konstantan, jednak λ_0 , koncentracija nečistoća u vodi iznosi

$$c = c_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot y}, \text{ odnosno}$$

$$\frac{\partial c}{\partial y} = -\lambda_0 \cdot c_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot y}$$

Zamenom se dobija

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = v \cdot \lambda_0 \cdot c_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot y}$$

Integracijom gornje jednačine, uzimajući u obzir granične uslove $t=0$, $\sigma=0$, sada prirast iznosi

$$\sigma = v \cdot \lambda_0 \cdot c_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot y} \cdot t$$

što znači da logaritamski opada sa dubinom y i linearno raste sa vremenom t .

Određivanje porasta otpora u filtru izazvanog akumuliranjem nečistoća u filtarskoj ispuni, kao što je izračunato prethodnim izrazima, može biti određeno preko Carman-Kozeny-jeve jednačine za laminarni tok. Za čistu filtarsku ispunu jednačina daje gubitak energije $H = I_0 \cdot L$, I_0 je pad pijezometarskog nivoa

$$I_0 = \left(\frac{dz}{dy} \right)_0 = \frac{180 \cdot v}{g} \cdot \frac{(1-p_0)^2}{p_0^3} \cdot \frac{v}{d_0^2}$$

gde je v kinematski koeficijent viskoznosti vode. Prethodna jednačina može da se napiše i u drugoj formi, ako zamenimo prečnik zrna d_0 sa ukupnom površinom zrna po jedinici zapremine materijala prisutnog u filtarskoj ispuni S_0 .

$$S_0 = \frac{6}{d_0} \cdot (1-p_0); \quad I_0 = \frac{5 \cdot v}{g} \cdot \frac{S_0^2}{p_0^3} \cdot v$$

Akumuliranjem nečistoća u filtarskoj ispuni, poroznost se smanjuje od p_0 do p , a specifična površina se menja od S_0 do S , povećavajući pad pijezometarske linije

$$\left(\frac{dz}{dy} \right)_t = \frac{5 \cdot v}{g} \cdot \frac{S^2}{p^3} \cdot v$$

$$\left(\frac{dz}{dy} \right)_t = I_0 \cdot \left(\frac{p_0}{p} \right)^3 \cdot \left(\frac{S}{S_0} \right)^2$$

gde je I_0 konstantno za navedeno stanje. Kada se nečistoće akumuliraju u koncentraciji σ sa gustinom ρ_d , njihova zapreminska koncentracija iznosi

$$\sigma_v = \frac{\sigma}{\rho_d}$$

Ta koncentracija prouzrokuje smanjenje poroznosti

$$\sigma_v = p_0 - p; \quad \left(\frac{p_0}{p} \right)^3 = \left(\frac{p_0}{p_0 - \sigma_v} \right)^3$$

Primeniće se kapilarni model, procenjujući da po jedinici površine i jedinici dubine čistog filtra je prisutno n kapilara prečnika t_0 i dužine l . To daje za čist filter

$$p_0 = n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot t_0^2 \cdot l; \quad S_0 = n \cdot \pi \cdot t_0 \cdot l$$

Zadržavanje nečistoća u porama, redukuje prečnik t_0 u t .

$$p_0 = n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot t^2 \cdot l; \quad S_0 = n \cdot \pi \cdot t \cdot l$$

Iz prethodnih jednačina sledi

$$\left(\frac{S}{S_0} \right)^2 = \left(\frac{t}{t_0} \right)^2 = \frac{p}{p_0} = \frac{p_0 - \sigma_v}{p_0}$$

Zamena ovih rezultata u Carman-Kozeny-jevu jednačinu daje

$$\left(\frac{dz}{dy} \right)_t = I_0 \cdot \left(\frac{p_0}{p_0 - \sigma_v} \right)^2$$

Pretpostavljajući da je λ konstantno i jednako λ_0 , vrednost σ_v iznosi

$$\sigma_v = \frac{\sigma}{\rho_d} = \frac{v \cdot \lambda_0 \cdot c_0}{\rho_d} \cdot e^{-\lambda_0 \cdot y} \cdot t; \quad \alpha = \frac{v \cdot \lambda_0 \cdot c_0}{\rho_d \cdot p_0}$$

$$\sigma_v = \alpha \cdot p_0 \cdot t \cdot e^{-\lambda_0 \cdot y}$$

Zamenom se dobija

$$\left(\frac{dz}{dy}\right)_t = I_0 \cdot \frac{1}{(1 - \alpha \cdot t \cdot e^{-\lambda_0 \cdot y})^2}$$

Na osnovu prethodne formule, integracijom se mogu dobiti gubici energije kroz celu dubinu L filterske ispune kroz vreme t

$$H = \int_0^L \left(\frac{dz}{dy}\right)_t dy = \int_0^L I_0 \cdot \frac{dy}{(1 - \alpha \cdot t \cdot e^{-\lambda_0 \cdot y})^2}$$

$$H = \frac{I_0}{\lambda_0} \cdot \left\{ \frac{\alpha \cdot t}{1 - \alpha \cdot t} \cdot \frac{e^{\lambda_0 \cdot L} - 1}{e^{\lambda_0 \cdot L} - \alpha \cdot t} + \ln \left(\frac{e^{\lambda_0 \cdot L} - \alpha \cdot t}{1 - \alpha \cdot t} \right) \right\}$$

Uzimajući na primer L=0,75 m, d=0,8 mm, p₀=0,4, v=7,2 m/h, c₀=15 g/m³, T=10°C, v=1,31·10⁻⁶ m²/s, ρ_d=50 kg/m³ i λ₀=6 m⁻¹ dobija se da pad I₀ u početnom trenutku t=0 iznosi

$$I_0 = \frac{180 \cdot 1,31 \cdot 10^{-6}}{9,81} \cdot \frac{0,6^2}{0,4^3} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-3}}{0,8^2 \cdot 10^{-6}} = 0,423$$

$$\alpha = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 15 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 0,4} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$$

$$e^{\lambda_0 \cdot L} = e^{6 \cdot 0,75} = 90$$

Otpor filtra posle vremena t iznosi

$$H = \frac{0,423}{6} \cdot \left\{ \frac{9 \cdot 10^{-6} \cdot t}{1 - 9 \cdot 10^{-6} \cdot t} \cdot \frac{89}{90 - 9 \cdot 10^{-6} \cdot t} + \ln \frac{90 - 9 \cdot 10^{-6} \cdot t}{1 - 9 \cdot 10^{-6} \cdot t} \right\}$$

odnosno pojednostavljeno

$$H = 0,070 \cdot \left\{ \frac{t}{1,11 \cdot 10^5 - t} \cdot \frac{99 \cdot 10^5}{100 \cdot 10^5 - t} + \ln \frac{100 \cdot 10^5 - t}{1,11 \cdot 10^5 - t} \right\}$$

Na osnovu prethodne jednačine može se izračunati povećanje otpora filtra kroz vreme, dato narednom tabelom.

Tabela 1. Otpoti filtra

t [10 ⁵ s]	t [h]	H [m]
0	0	0,32
0,25	6,94	0,35
0,50	13,89	0,41
0,75	20,83	0,55
1,00	27,78	1,11
1,25	30,83	∞

Saglasno jednačini (1), otpori filtra se u početku sporo povećavaju kroz vreme, ali se kasnije oni rapidno povećavaju. Do ovoga dolazi zato što se zadržavanje nečistoća u porama uglavnom dešava u gornjem delu filtra, odnosno na vrhu.

$$\sigma_v = \alpha \cdot p_0 \cdot t \cdot e^{-\lambda_0 \cdot y} = 9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,4 \cdot t \cdot e^{-6 \cdot y} = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot t \cdot e^{-6 \cdot y}$$

Na kraju rada filtra, posle vremena od T=30,83 h količina zadržanih nečistoća na vrhu filtra (y=0) iznosi

$$\sigma_v = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot 1,11 \cdot 10^5 \cdot 1 = 0,40$$

redukujući početnu poroznost p₀=0,40 na nula i prouzrokujući ogroman otpor. Za t=T prosečan iznos izdvojenih nečistoća je još uvek prilično mali

$$\bar{\sigma}_v = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L \sigma_v \cdot dy = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L \alpha \cdot p_0 \cdot T \cdot e^{-\lambda_0 \cdot y} dy = \frac{\alpha \cdot p_0 \cdot T}{L \cdot \lambda_0} \cdot (1 - e^{-\lambda_0 \cdot L})$$

$$\bar{\sigma}_v = \frac{9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,4 \cdot 1,11 \cdot 10^5}{0,75 \cdot 6} \cdot (1 - e^{-6 \cdot 0,75}) = 0,088 \text{ m}^3 / \text{m}^3$$

$$\bar{\sigma} = \rho_d \cdot \bar{\sigma}_v = 50 \cdot 0,088 = 4,4 \text{ kg/m}^3$$

Poslednja vrednost može biti takođe izračunata preko redukcije opterećenja suspendovanim materijama koje sadrži voda.

$$\sigma = \frac{(c_0 - c_e) \cdot v \cdot T}{L} = \frac{(15 - 0,17) \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,11 \cdot 10^5}{0,75} = 4,4 \text{ kg/m}^3$$

2.7 Matematička teorija filtracije

Rezultati filtracije dobijeni u prethodnom poglavlju pomoću jednačine (1) su pogrešni. U praksi se ne dobija konstantan kvalitet efluenta, kao ni rapidno povećanje otpora filtra sa vremenom. Za najveći deo ovih devijacija između teorije i prakse razlog je pogrešno usvajanje konstantne vrednosti koeficijenta filtracije λ₀. U realnosti λ opada vremenom, zbog pronosjenja velikog dela nečistoća iz sirove vode, koje prolaze do najvećih dubina filtra. Ovo podrazumeva veliku dubinu filterske ispune, kao i opadanje kvaliteta efluenta i nizak rast otpora filtra sa vremenom. Treba napomenuti da u računici iz prethodnog poglavlja nije dat uticaj debljine filterske ispune i granulacije filterskih zrna, brzine filtracije, kvaliteta sirove vode itd. Na filtracioni koeficijent λ.

Mnogi istraživači su pokušali da uspostave relacije za efikasnost filtracije

$$\lambda_0 = f(L, d_0, p_0, v, c_0, \rho_d, \text{itd.}), \quad \lambda = \lambda_0 f(t)$$

Prve relacije su stavljale akcenat na transport i mehanizme uklanjanja kao najvažnije za poboljšanje kvaliteta vode. Matematički model i njegovi rezultati su jako varirali i zavisili od taloženja, difuzije, van der Waals-ovih sila itd. Koji su bili primarni faktori. Naknadne relacije su mnogo komplikovanije. U početku filtracije λ će rasti pošto se efikasnost povećava zadržanim istaloženim materijalom čime se popravljaju kvalitet efluenta. Trajanjem filtracije istaloženi materijal zapušava pore filtarske ispune, povećava se brzina proticaja između pora, smanjuje se efikasnost taloženja i vrednosti λ . Mogu biti pomenute teorije koje su dali sledeći autori:

Ives[4]:

$$\lambda_0 \approx \frac{1}{d_0^n \cdot v^2 \cdot v}$$

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 + \beta_1 \cdot \frac{\sigma_v}{p_0} - \beta_2 \cdot \frac{\sigma_v^2}{p_0 \cdot (p_0 - \sigma_v)} \right)$$

gde je n između 1 i 3, a β eksperimentalno određena konstanta.

Iwasaki [5]:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 - \beta \cdot \frac{v}{p_0} \right)$$

Lerk [8]: $\lambda_0 \approx \frac{(1-p_0) \cdot p_0}{d_0^3 \cdot v \cdot v}; \quad \lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_v}{p_0} \right)$

Maroudas [11]:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_v}{\sigma_v^*} \right)$$

gde je σ_v^* maksimalno moguće akumulisanje materijala, i određuje se eksperimentalno.

Mintz [12]:

$$\lambda_0 \approx \frac{v}{d_0}; \quad \lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{c_0}{c} \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_v^*} \right)$$

Većina teorija ne daje analitičko rešenje. Osim toga brojne varijable određuju se eksperimentalno, pa se upoređuju sa empirijskim vrednostima iz prethodnog

poglavlja. U ovom poglavlju biće korišćena Lerk-ova teorija za λ_0

$$\lambda_0 \approx \frac{(1-p_0) \cdot p_0}{d_0^3 \cdot v \cdot v}$$

a za vrednost λ teorija Iwasaki-a i Maroudas-a

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_v}{n \cdot p_0} \right)$$

sa n manjim od jedinice. Sa tim usvajanjem osnovne jednačine filtracije su:

Uklanjanje:

$$-\frac{\partial c}{\partial y} = \lambda \cdot c = \lambda_0 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_v}{n \cdot p_0} \right) \cdot c$$

Zapušavanje:

$$-\frac{\partial c}{\partial y} = \frac{1}{v} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\rho_d}{v} \cdot \frac{\partial \sigma_v}{\partial t}$$

Otpor:

$$H = \int_0^L I_0 \cdot \left(\frac{p_0}{p_0 - \sigma_v} \right)^2 dy$$

Sa graničnim uslovima:

$$\begin{aligned} y=0 & & c=c_0 \\ t=0 & & \sigma_v=0 \end{aligned}$$

$$i \quad \alpha = \frac{v \cdot c_0 \cdot \lambda_0}{n \cdot \rho_d \cdot p_0}$$

ove jednačine imaju kao rešenje:

$$c = c_0 \cdot \frac{e^{\alpha \cdot t}}{e^{\lambda_0 \cdot y} + e^{\alpha \cdot t} - 1}; \quad c_e = c_0 \cdot \frac{e^{\alpha \cdot t}}{e^{\lambda_0 \cdot L} + e^{\alpha \cdot t} - 1}$$

$$\sigma_v = n \cdot p_0 \cdot \frac{e^{\alpha \cdot t} - 1}{e^{\lambda_0 \cdot y} + e^{\alpha \cdot t} - 1}$$

$$\bar{\sigma}_v = n \cdot p_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda_0 \cdot t} \cdot \ln \frac{e^{\lambda_0 \cdot L} + e^{\alpha \cdot t} - 1}{e^{\alpha \cdot t}} \right)$$

$$H = \frac{I_0}{\lambda_0} \cdot \left\{ \frac{\lambda_0 \cdot L}{(1-n)^2} - \frac{n^2 \cdot (e^{\lambda_0 \cdot L} - 1) \cdot (e^{\alpha \cdot t} - 1)}{(1-n) \cdot [e^{\lambda_0 \cdot L} + (1+n) \cdot (e^{\alpha \cdot t} - 1)] \cdot [(1-n) \cdot e^{\alpha \cdot t} + n]} - \frac{n \cdot (2-n) \cdot \ln \frac{e^{\lambda_0 \cdot L} + (1-n) \cdot (e^{\alpha \cdot t} - 1)}{(1-n) \cdot e^{\alpha \cdot t} + n}}{(1-n)^2} \right\}$$

i za $n = 0.75$

$$H = \frac{I_0}{\lambda_0} \cdot \left\{ 16 \cdot \lambda_0 \cdot L - 36 \cdot \frac{(e^{\lambda_0 \cdot L} - 1) \cdot (e^{\alpha \cdot t} - 1)}{(4 \cdot e^{\lambda_0 \cdot L} + e^{\alpha \cdot t} - 1) \cdot (e^{\alpha \cdot t} + 3)} - 15 \cdot \ln \frac{4 \cdot e^{\lambda_0 \cdot L} + e^{\alpha \cdot t} - 1}{e^{\alpha \cdot t} + 3} \right\}$$

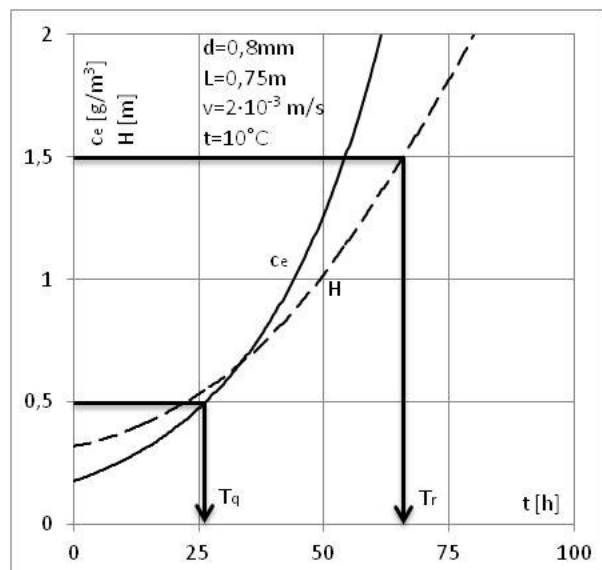
Za isti primer koji je naveden u prethodnom poglavlju $L=0,75$ m, $d=0,8$ mm, $p_0=0,4$, $v=7,2$ m/h, $c_0=15$ g/m³, $t=10$ °C, $v=1,31 \cdot 10^{-6}$ m²/sec, $\lambda_0=6$ m⁻¹, $\rho_d=50$ kg/m³, $I_0=0,423$ i

$$\alpha = \frac{v \cdot c_0 \cdot \lambda_0}{n \cdot \rho_d \cdot p_0} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 6}{0,75 \cdot 50 \cdot 0,4} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$$

i prikazani su na grafiku (slika 3).

Tabela 2. Rezultati filtracije za $d=0,8$ mm

t [10 ⁵ s]	t [h]	c _e [g/m ³]	$\frac{s}{v}$ [m ³ /m ³]	H [m]
0	0	0,17	0	0,32
0,5	13,9	0,30	0,039	0,41
1,0	27,8	0,54	0,078	0,57
1,5	41,7	0,96	0,116	0,82
2,0	55,6	1,65	0,153	1,18
2,5	69,4	2,77	0,187	1,62
3,0	83,3	4,37	0,218	2,13



Slika 3. Rezultati izračunatog vremena rada filtra pomoću modifikovane Lerk-ove teorije filtracije

Za rezultate filtracije prikazane na slici 3 standard za efluent je da je sadržaj suspendovanih materija manji od 0,5 g/m³, a da je maksimalno dozvoljen otpor filtra 1,5 m. Vreme rada filtra između 2 pranja po osnovu kvalitetaefluente (T_q), odnosno maksimalno dozvoljenog otpora filtra (T_r) iznosi:

$$T_q=26 \text{ h} \quad T_r=64 \text{ h}$$

Ove vrednosti bi mogle da se približe korišćenjem finijeg filtarskog materijala. Saglasno teoriji

$$\lambda_0 \approx \frac{(1-p_0) \cdot p_0}{d_0^3 \cdot v \cdot v}; \alpha = \frac{v \cdot c_0 \cdot \lambda_0}{n \cdot \rho_d \cdot p_0}; I_0 \approx \frac{(1-p_0)^2}{p_0^3} \cdot \frac{v}{d_0^2}$$

Smanjivanjem prečnika zrna d_0 sa 0,8 mm na 0,7 mm doći će do promene ovih parametara

$$\lambda'_0 = \left(\frac{0,8}{0,7}\right)^3 \cdot 6 = 8,956 \text{ m}^{-1}$$

$$\alpha' = \left(\frac{0,8}{0,7}\right)^3 \cdot 12 \cdot 10^{-6} = 17,913 \cdot 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$$

$$I'_0 = \left(\frac{0,8}{0,7}\right)^2 \cdot 0,423 = 0,552$$

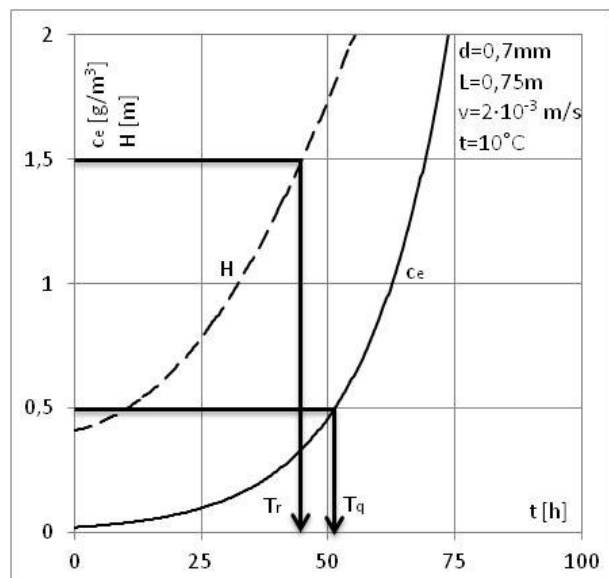
Sa istom debljinom filtarske ispune $L=0,75$ m i brzinom filtracije $v=72$ m/h, dobijaju se sledeći rezultati koji su prikazani u tabeli 3 i na grafiku na slici 4, sa koga se dobijaja vreme rada filtra između dva pranja koje iznosi:

$$T_q=51 \text{ h} \quad T_r=45 \text{ h}$$

Ovo zadovoljava sve praktične potrebe, vreme rada filtra između dva pranja je poprilično dugo. Veća brzina filtracije bi se mogla primeniti, to bi omogućilo manju površinu filtarskog sloja odnosno uštedu u troškovima izgradnje. Ipak, sa svoje strane takva veća brzina može zahtevati krupniju strukturu filtarskog materijala i veću debljinu filtarskog sloja što je drugi faktor povećanja troškova izgradnje. Pomoću matematičke teorije filtracije ovaj problem se može jednostavno rešiti optimizacijom, tako što će se željeni rezultati u procesu filtracije u pogledu kvaliteta efluente i vremena rada filtra između dva pranja izabrati unapred.

Tabela 3. Rezultati filtracije za $d=0,7$ mm

t [10 ⁵ s]	t [h]	c _e [g/m ³]	H [m]
0	0	0,02	0,41
0,5	13,9	0,04	0,55
1,0	27,8	0,11	0,86
1,5	41,7	0,26	1,36
2,0	55,6	0,63	2,02
2,5	69,4	1,45	2,76
3,0	83,3	3,11	3,55



Slika 4. Određivanje vremena rada filtra

Sumirajući, mora se reći da glavna vrednost matematičke teorije filtracije jeste to što poboljšava uvid i pomaže da se razume ovaj komplikovani proces. U praksi dozvoljava blagu ekstrapolaciju posmatranih podataka, predviđajući na primer efekat nešto sitnije granulacije na vremena rada filtra između dva pranja filtra, T_q i posebno T_r . Matematička teorija filtracije je od velike pomoći prilikom vršenja testova na pilot postrojenju, što ukazuje kako eksperimentalni model treba da se koristi pod važećim uslovima, koja zapažanja imaju smisla i kakva treba da budu, u kom se pravcu istraživanja mogu primeniti na date rezultate od praktične vrednosti itd. Za pravilno projektovanje filtra veoma je važno bazirati se na praktičnom iskustvu sa postojećih postrojenja.

3. KONTROLA FILTRA

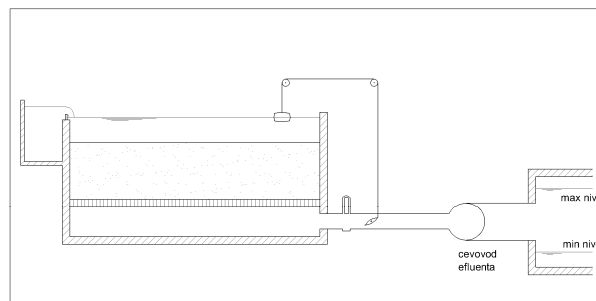
Tokom rada brzih gravitacionih filtra, nečistoće iz sirove vode deponuju se u pore filtarskog sloja i tako se povećava otpornost kretanju vode. Uz druge nepromenjene faktore, time će doći do smanjenja brzine filtracije. Što se tiče kvaliteta filtrirane vode, brzina filtracije mora da bude što je moguće konstantnija, a posebno treba izbegavati nagle fluktuacije. Prilikom naglog porasta brzine filtracije nečistoće iz sirove vode mogu se probiti kroz filtarski sloj i time umanjiti kvalitet filtrirane vode, a u slučaju negativnih nivoa, iznenadno smanjenje stope filtracije može osloboditi mehuriće gasa koji je akumuliran u filtarskom sloju. Kada ovi mehurići gasa putuju na gore, može doći do stvaranja rupa u

filtrarskom sloju, kroz koje sirova voda kasnije može proći bez odgovarajućeg tretmana.

Kontrola brzine filtracije se postiže ubacivanjem dodatnih hidrauličkih gubitaka na liniji uliva sirove vode (uzvodna kontrola) ili na liniji izlaza filtrirane vode (nizvodna kontrola) i podešavanja ovih hidrauličkih gubitaka na takav način da zadrži snabdevanje sirove vode ili zahvatanje filtrirane vode stalnom na željenu vrednost. Zbog brze promene uslova rada ova podešavanja zahtevaju stalni nadzor odnosno automatsku kontrolu.

Za potpuno regulisanje rada brzog pešćanog filtra, kontrola brzine filtracije mora biti dopunjena kontrolom nivoa vode, bilo nivoa sirove vode iznad filtarskog sloja ili nivoa filtrirane vode ispod tog filtracionog sloja. S jedne strane, ova kontrola služi da bi se operacija filtriranja vode odvijala nezavisno od varijacija pritiska pod kojim se sirova voda isporučuje ili se filtrirana voda izdvaja, dok sa druge strane ona mora da nadoknadi povećanje otpora filtra do kog dolazi usled začepljenja filtarskog sloja tokom filtracije. Podrazumeva se da kontrola brzine filtracije i kontrola nivoa vode nikada ne može da se podesi iza drugog na istoj liniji. To znači da je nizvodna kontrola brzine filtracije mora biti kombinovana sa uzvodnom kontrolom vodostaja i obrnuto, što ukupno daje 4 mogućnosti:

- Nizvodna kontrola brzine i uzvodna kontrola nivoa sirove vode
- Nizvodna kontrola brzine i uzvodna kontrola nivoa filtrirane vode
- Uzvodna kontrola brzine i nizvodna kontrola nivoa sirove vode
- Uzvodna kontrola brzine i nizvodna kontrola nivoa filtrirane vode



Slika 5. Uzvodna kontrola brzine, nizvodna kontrola nivoa, sa konstantnim nivoom sirove vode i promenljivim nivoom filtrirane vode

4. PRANJE FILTRA

4.1 Uvod u pranje filtra

Kada za vreme procesa filtracije, hidraulički otpori dostignu svoj dozvoljeni maksimum ili kada kvalitet filtrirane vode više ne zadovoljava neke propisane vrednosti, čišćenje (pranje) filtra je neophodno da bi se vratio potreban kapacitet filtracije tj. da bi se poboljšao kvalitet filtrirane vode.

Filtracija se ostvaruje prolaskom vode kroz sloj granuliranog materijala postavljenog na perforiranu podlogu. Tokom filtracije mogu se odigravati procesi, kao što su biološka oksidacija amonijaka, katalitičko uklanjanje mangana, sorpcija teških metala i rastvorenih organskih materija, kao i zadržavanje bakterija i virusa.

Kod spore filtracije ($v_{\text{filt.}}=0,1-0,5$ m/h), zrna filtarske ispune su sitnija nego u slučaju brze filtracije. Kod sporih filtra uvlačenje, prodiranje nečistoća je manje nego kod brzih filtra. Zadržavanje nečistoća obavlja se u svega par santimetara sloja, a zbog svoje niske opterećenosti zauzimaju velike površine.

Kod brzih filtra, penetriranje nečistoća je znatno dublje, pogotovo kod višeslojnih ispuna, čime se podiže efikasnost filtracije (dublji sloj obavlja zadržavanje čestica), ali je održavanje i pranje znatno teže nego što je to kod sporih filtra. Sa dubokom penetracijom nečistoća iz sirove vode u filtarsku ispunu, ručno pranje koje koristi vrlo teške i kabaste šmrkove za vodu, čine ovaj način pranja teškim i komplikovanim u smislu fizičkog rada (posebno ako je malo vreme između dva pranja).

Zato se danas, gotovo svuda, za pranje filtra uglavnom koristi tok vode suprotan onome kod procesa filtracije. Protoci vode za pranje su nekoliko puta veći nego protoci pri filtraciji. Voda za pranje, krećući se naviše, nečistoće akumulisane u filtru nosi sa sobom u odvodne kanale koji evakušu vodu od pranja van filtarskog polja. Nečistoće se zadržavaju na površini zrna filtarske ispune i one se prvo moraju odvojiti od njih da bi se mogle isprati vodom. Mehanizam odvajanja adsorbovanih čestica nečistoća sa zrna filtarske ispune može se podeliti u dva glavna mehanizma: mehanički, kada se zrna ispune, u toku pranja, sudaraju međusobno i tako se mehaničkim trenjem stvaraju sile potrebne za odvajanje čestica i hidraulički, kada se potrebna vrednost sila ostvaruje hidrodinamičkim dejstvom vode

za pranje. Kada se završi faza odvajanja nečistoća, onda nastupa faza iznošenja istih čestica, praćena fluidizacijom ispune (sve čestice lebde u vodenoj struji), pri čemu naglo opada rast hidrauličkog spiranja, dok mehaničko gotovo da ne postoji. Prilikom pranja u ovoj fazi dolazi do ekspanzije ispune, pri čemu joj se povećava poroznost i zapremina. Ekspanzija je obavezna jer se tako značajno povećava efekat iznošenja čestica nečistoća (veći prostor između zrna ispune za nesmetano odnošenje). Pri većim protocima prilikom pranja, tj. pri većoj ekspanziji, postiže se bolje ispiranje, ali se pri velikom stepenu može odigrati proces prirodne segregacije zrna (teže i krupnije ka dnu, lakše i sitnije ka površini ispune) što je nepovoljno jer iako se povećava zadržavanje čestica nečistoća, dobijaju se vrlo kratki ciklusi između dva pranja.

Pranje filtra može se obaviti iznošenjem cele ispune van filtarskog polja, ali ovo je vrlo težak i glomazan postupak koji se vrlo retko koristi (radi se pri eventualnoj zameni ispune ili sanaciji konstrukcije filtarskog polja tj. dna).

Efikasnije pranje može se postići primenom i nekog dodatnog postupka (mehaničko mešanje ispune grabuljama, dovođenje vazduha pod pritiskom, mlazovima vode uperenim u površinu ispune).

U mnogim slučajevima, protok vode za pranje i sam proces ispiranja i odnošenja koji se pri tome javlja, zavisiće od materija koje se javljaju i koje mogu nastati u filtru. U takvim slučajevima mora se biti vrlo obazriv pri procesu pranja, kada se moraju upotrebljavati nešto manje brzine pri pranju, jer bi pri većim brzinama došlo do uklanjanja gore pomenutih korisnih materija (nitrifikacione bakterije, koje vrše oksidaciju amonijaka u nitrate, slojevi mangan hidroksida, kojima se vrši katalitičko uklanjanje mangana).

4.2. Hidraulika pranja filtarske ispune vodom

Hidraulički gubitak h , pri laminarnom tečenju, kroz filtarski sloj debljine L , poroznosti p , koji je sastavljen od sferičnih zrna uniformnog prečnika d , dat je po Karman-Kozenijevoj jednačini kao :

$$h = 180 \cdot \frac{v}{g} \cdot \frac{(1-p)^2}{p^3} \cdot \frac{v}{d^2} \cdot L,$$

gde je v Darsijeva brzina, g gravitaciono ubrzanje, a v koeficijent kinematičke viskoznosti .

Sa Rejnoldsovim brojem Re , datim kao:

$$R_e = \frac{1}{p} \cdot \frac{v d}{\nu}$$

gornja jednačina se može pisati kao:

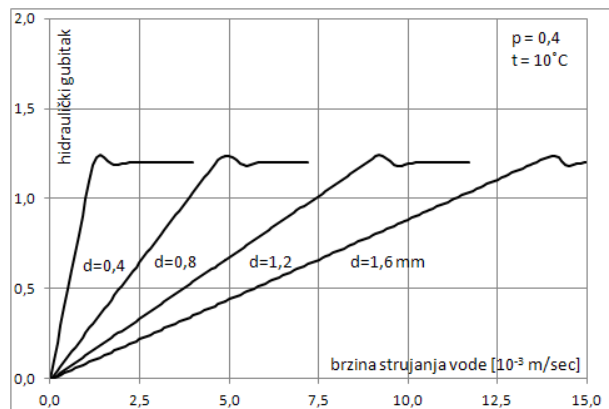
$$h = \frac{360}{R_e} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{1-p}{p^3} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Ova jednačina važi samo za laminarni tok tj. kada je $R_e < 5$. Za vreme pranja, voda kroz filter struji velikim brzinama, tako da se ovde režim strujanja nalazi u prelaznoj oblasti, a ne u laminarnoj. U prelaznoj oblasti ne postoje teorijski izrazi za hidrauličke gubitke, već postoje samo empirijske formule koje su predložene od strane mnogobrojnih istraživača.[3]

Ako je $5 < R_e < 100$, jedna od najčešće primenjenih formula je (prelazni režim):

$$h = \frac{260}{R_e^{0,8}} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{1-p}{p^3} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Upotrebljavajući ovu formulu, data je na slici 6 zavisnost hidrauličkih gubitaka od brzine strujanja vode, gde su usvojeni ostali parametri potrebni za proračun i to; $L=1,2\text{ m}$, $p=0,4$ i $t=10^0\text{ C}$, gde je t temperatura vode.



Slika 6. Hidraulički gubitak u filterskom sloju tokom pranja filtra

Hidraulički gubitak h , postaje konstantan kada se filterska ispuna fluidizira, pri čemu se izjednačava filtraciona sila i težina potopljenog peska. Ta vrednost hidrauličkog gubitka h se računa po formuli :

$$\rho g h = (1-p) \cdot L \cdot (\rho_f - \rho_w) \cdot g$$

$$\text{tj. } h = (1-p) \cdot L \cdot \frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_w}$$

gde su ρ_f i ρ_w gustina filterskog materijala i gustina vode.

Za $p=0,4$ i $(\rho_f - \rho_w) / \rho_w = 1,6$ dobija se za $h \approx L$.

Vrednost z je veća ukoliko je poroznost manja. Adhezovana voda i slojevi CaCO_3 , Fe(OH)_3 , Al(OH)_3 koji se mogu javiti na površini čestica filtra, mogu značajno smanjiti prosečnu vrednost ρ_f što prouzrokuje smanjenje maksimalnog hidrauličkog gubitka.

Brzina potrebna za fluidizaciju može se sračunati iz izraza:

$$(1-p) \cdot L \cdot \frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_w} = 130 \cdot \frac{v^{0,8}}{g} \cdot \frac{(1-p)^{1,8}}{p^3} \cdot \frac{v^{1,2}}{d^{1,8}} \cdot L$$

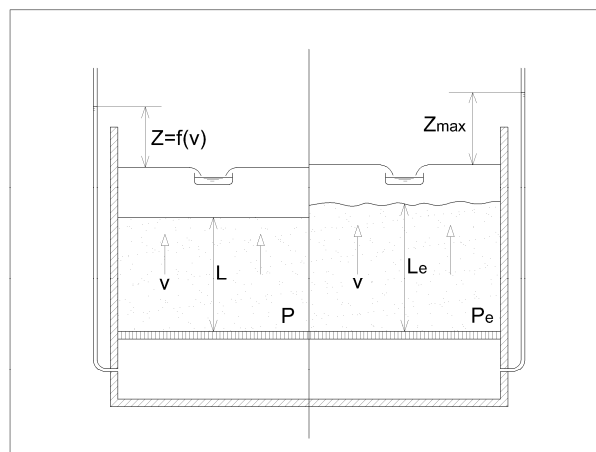
Povećanje brzine v iznad ove vrednosti, neće povećavati otpore, ali će više ekspanovati ispunu i povećavati poroznost sa p na p_e i debljinu ispune sa L na L_e (slika 7), te se može pisati:

$$(1-p)L \frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_w} = 130 \frac{v^{0,8}}{g} \frac{(1-p_e)^{1,8}}{p_e^3} \frac{v_e^{1,2}}{d^{1,8}} \cdot L_e$$

$$\text{i } (1-p) \cdot L = (1-p_e) \cdot L_e$$

Odavde se dobija:

$$p_e = 2,95 \cdot \frac{v^{1/4,5}}{g^{1/3,6}} \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_f - \rho_w} \right)^{1/3,6} \cdot \frac{v_e^{1/3}}{d^{1/2}}$$



Slika 7. Pranje filtra bez i sa ekspanzijom filterskog sloja

Vrednost koeficijenta kinematske viskoznosti je funkcija temperature. U tabeli 4 su date vrednosti koeficijenta viskoznosti u zavisnosti od temperature. Zavisnost kinematskog koeficijenta viskoznosti ν od temperature može se aproksimirati funkcijom:

$$\nu^{1/4,5} = \frac{1}{20,2 \cdot (0,94 + 0,006t)}$$

pa se konačno dobija

$$p_e = \frac{0,068}{0,94 + 0,006t} \cdot \frac{v_e^{1/3}}{d^{1/2}} = f(v_e, d, t)$$

Tabela 4. Vrednost koeficijenta kinematske viskoznosti u zavisnosti od temperature

T [°C]	v 10 ⁻⁶ [m ² /s]
0	1,172
5	1,519
10	1,310
15	1,146
20	1,011
25	0,898
30	0,804

Stepen ekspanzije se definiše kao procentualni porast debljine filtarske ispune:

$$E = 100 \cdot \frac{L_e - L}{L} = 100 \cdot \frac{p_e - p}{1 - p_e}$$

Stepen ekspanzije umnogome zavisi od temperature. Varijacije brzine vode prilikom pranja filtra (da bi se postigla ista ekspanzija), u odnosu na t=10⁰ C su dati u tabeli 5:

Tabela 5. Varijacije brzine vode prilikom pranja filtra u zavisnosti od temperature

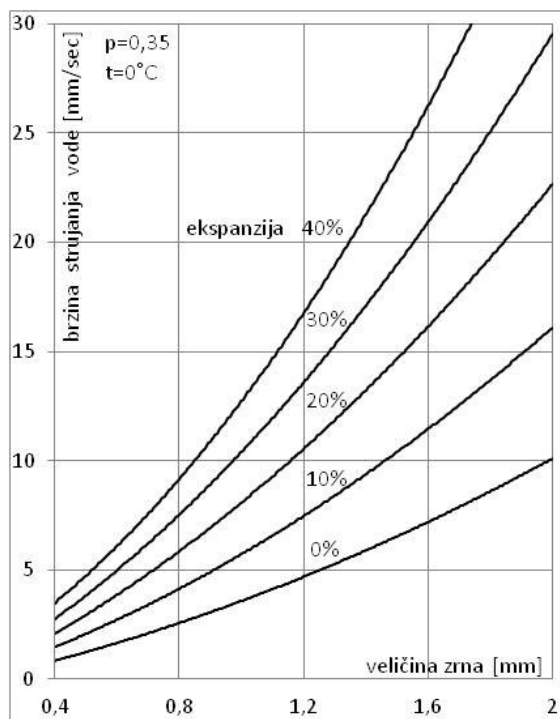
T [°C]	v [%]
0	81
5	91
10	100
15	109
20	119
25	129
30	139

Ovo znači da brzina vode pri pranju varira tokom godine, kako se menja temperatura vode tj. leti treba da je veća nego zimi, da bi se postigao isti efekat pranja (stepen ekspanzije), uz zadržavanje istih uslova koji se pri pranju javljaju. Ovaj odnos može biti čak i 129/81=1,59, što zahteva instalaciju za pranje prilagodljivu u pogledu potrebnog protoka.

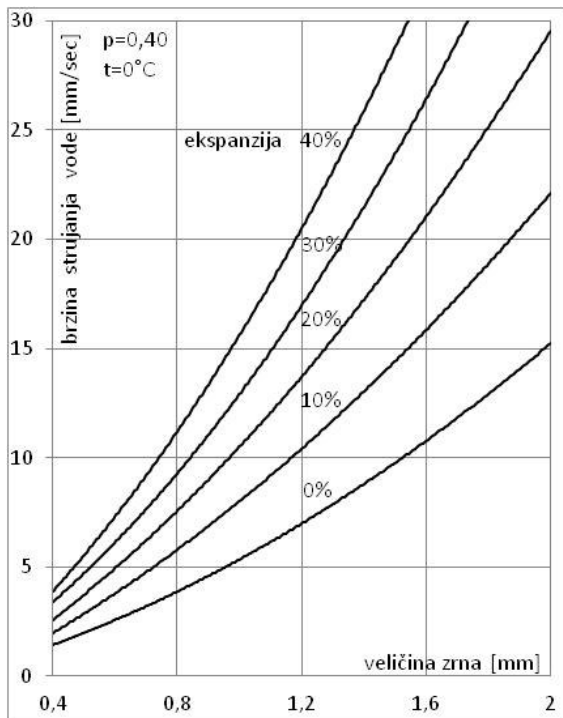
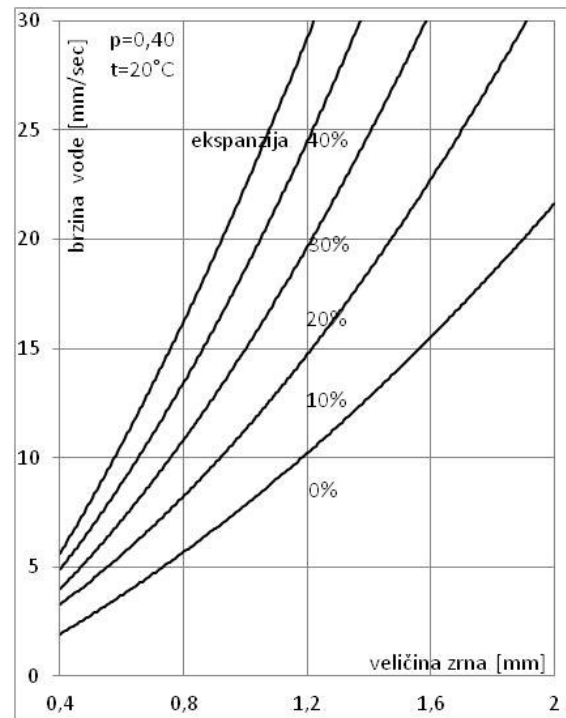
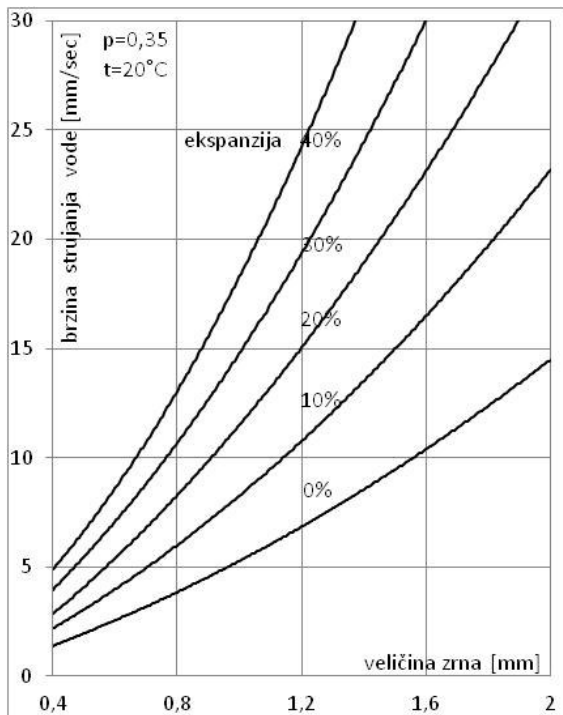
Treba napomenuti da je sve ovo do sada važno za loptasta zrna ispune, iste krupnoće. Za proračun zrna

drugih oblika koriste se iste formule, u kojima sada postoji faktor oblika tj. stepen sferičnosti. Pri istim uslovima (brzina pranja, temperatura i dr.), ispuna od nesferičnih čestica ima manju ekspanziju nego ispuna sa sferičnim česticama. Ispuna jednoličnijeg sastava, pri istoj brzini vode prilikom pranja, pokazuje manje varijacije stepena ekspanzije između slojeva pa tako i bolju kontrolu i manje eventualne gubitke filtarskog materijala. Pranje po dubini filtarskog polja se efikasnije vrši, jer su sve čestice pod istim hidrauličkim uslovima. Zato se koeficijent uniformnosti K_u kreće od 1,1 do 1,7. Proračun gubitaka se vrši sa nekim ekvivalentnim prečnikom, obično se kreće od d₁₀ do d₁₅.

Na slikama 8.1-8.4 daje se pomenuti grafički prikaz rezultata proračuna stepena ekspanzije, ispune uniformnog sastava sferičnih zrna.



Slika 8.1. Ekspanzija filtarskog sloja za uniformna sferična peščana (p=0,35; t=0°C)

Slika 8.2. Ekspanzija filternog sloja za uniformna sferična peščana ($p=0,40$; $t=0^{\circ}\text{C}$)Slika 8.4. Ekspanzija filternog sloja za uniformna sferična peščana ($p=0,40$; $t=20^{\circ}\text{C}$)Slika 8.3. Ekspanzija filternog sloja za uniformna sferična peščana ($p=0,35$; $t=20^{\circ}\text{C}$)

4.3. Raspodela vode za pranje

Na slici 7 zanemareni su otpori u filternom dnu koji utiču na povećanje energije i samim tim na troškove procesa prečišćavanja. Ipak, određeni otpor u filternom dnu je neophodan jer bi njegovo nepostojanje ili suviše mala vrednost, pogoršalo raspodelu vode za pranje duž filternog polja. Neravnomerna distribucija vode za pranje dovodi do neefikasnosti procesa pranja. U filternom polju onda postoje privilegovane struje i mrtve zone koje ne učestvuju u procesu pranja.

Ukupan otpor u sistemu filterno dno- filterna ispuna iznosi:

$$H = H_{\text{dna}} + H_{\text{ispune}}; \quad H_{\text{dna}} = \alpha v^2$$

$$H_{\text{ispune}} = (1 - p_e) L_e \frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_w} = 130 \frac{v^{0,8}}{g} \frac{(1 - p_e)^{1,8}}{p_e^3} \frac{v^{1,2}}{d^{1,8}} L_e$$

gde je α konstanta proporcionalnosti koja direktno zavisi od primenjenog sistema pranja tj. drenažnog sistema.

Na slici 9, H je razlika pijezometričkih kota pre ulaska vode u filter i posle prolaza vode kroz ispunu, dakle to je ukupna vučna sila vode za pranje, a dH je diferencijal (razlika, promena) ove razlike duž filterske jedinice.

Sušтина projektovanja sistema za pranje filtra leži u, što je moguće većem smanjivanju veličine dH , jer bi se onda sva voda za pranje pod istim uslovima dovodila u filtarsku jedinicu (celom njenom dužinom), pa bi i pranje bilo ravnomernije. Zato pravimo njen diferencijal i koristeći gornje izraze, uz pretpostavku da je d_2H zanemarljivo, dobija se:

$$dH = d_1H \pm d_2H$$

(u zavisnosti od lokalnih uslova) tj.

$$dH = d_1H$$

pa je:

$$dH_{dna} = 2\alpha v dv,$$

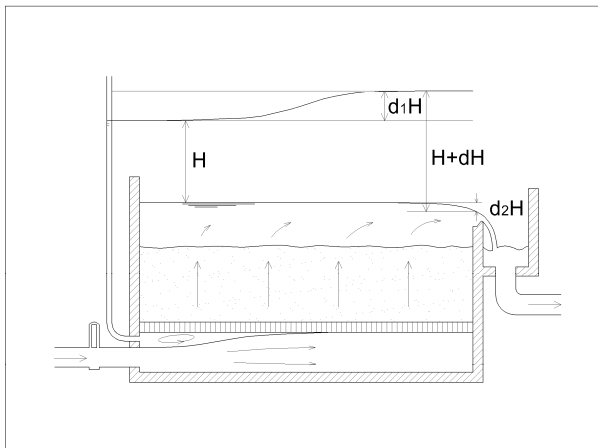
$$dH_{ispune} = -L_e \frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_w} dp_e,$$

što zajedno daje:

$$dH = 2\alpha v dv - L_e \cdot \frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_w} \cdot dp_e.$$

Od ranije je:

$$H = 130 \frac{v^{0,8}}{g} \frac{(1-p_e)^{1,8}}{p_e^3} \frac{v^{1,2}}{d^{1,8}} L_e.$$



Slika 9. Raspored pritiska prilikom pranja filtra

Povećanjem H menjaju se samo brzina pranja v i poroznost p_e . Gornja formula može se uprostiti, pa se dobija:

$$H_{ispune} = \beta \frac{(1-p_e)^{1,8}}{p_e^3} v^{1,2},$$

gde je β konstanta. Sledi:

$$dH_{ispune} = \frac{\partial H_{ispune}}{\partial v} dv + \frac{\partial H_{ispune}}{\partial p_e} dp_e,$$

(totalni diferencijal funkcije od dve promenljive), pa je:

$$dH_{ispune} = \beta \frac{(1-p_e)^{1,8}}{p_e^3} \cdot 1,2v^{0,2} \cdot dv + \beta \left\{ \frac{-1,8(1-p_e)^{0,8} dp_e}{p_e^3} - \frac{3(1-p_e)^{1,8} dp_e}{p_e^4} \right\} v^{1,2} \quad \text{ili:}$$

$$dH_{ispune} = H_{ispune} \left\{ \frac{1,2dv}{v} - \frac{1,8dp_e}{1-p_e} - \frac{3dp_e}{p_e} \right\}.$$

Zamenjujući ove izraze, dobija se:

$$-L_e \frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_w} dp_e = (1-p_e) L_e \frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_w} \left\{ \frac{1,2dv}{v} - \frac{1,8dp_e}{1-p_e} - \frac{3dp_e}{p_e} \right\}$$

odakle sledi:

$$dp_e = \frac{1,2(1-p_e)p_e}{3-2,2p_e} \frac{dv}{v}.$$

Totalni diferencijal tako je jednak:

$$dH = 2\alpha v dv - L_e \frac{(\rho_f - \rho_w)}{\rho_w} \frac{1,2(1-p_e)p_e}{3-2,2p_e} \frac{dv}{v},$$

što se još može uprostiti u:

$$dH = 2H_{dna} \frac{dv}{v} - 1,2H_{ispune} \frac{p_e}{3-2,2p_e} \frac{dv}{v},$$

odakle se dobija izraz za gubitak u dnu:

$$H_{dna} = 0,6H_{ispune} \cdot \frac{p_e}{3-2,2p_e} + \frac{1}{2} \frac{v}{dv} dH$$

tj. sa 20% ekspanzije ispune dobija se:

$$H_{dna} = 0,15H_{ispune} + \frac{1}{2} \frac{v}{dv} dH$$

Dozvoljavajući najviše 2% promene brzine pranja duž filtarskog polja, tj. $dv=0,02v$ i $dH=0,05$, uz pretpostavku da je debljina sloja 1,2 m, što ujedno predstavlja i hidraulički gubitak u filtru H_{ispune} , za gubitak u dnu se dobija da iznosi :

$$H_{dna} = 0,15 \cdot 1,2 + \frac{1}{2} \cdot 50 \cdot 0,05 = 1,43m$$

Pretpostavljena vrednost za $dH=0,05$ može biti mala, i to je razlog zašto filtarsko dno obično daje hidrauličke otpore veće nego gore izračunata vrednost od 1,43 m. Ovi hidraulički otpori u filtarskom dnu mogu iznositi i do 2-3 m. pa i više.

4.4. Načini obezbeđivanja potrebne vode za pranje

Postoji mnogo načina za dovođenje vode za pranje. To može biti iz vodovodne mreže, pumpama koje vodu

uzimaju iz bunara, iz nekog bazena, ili rezervoara čiste vode ispod samog filtra, kao i gravitacijom iz zasebnog rezervoara. Koji će se sistem primeniti najviše zavisi od potrebne količine vode za pranje i zahtevanog vremena između dva pranja. Kvalitet vode za pranje mora biti takav da ona ne izazove dodatne probleme u filtru (to je prečišćena voda, često puta i hlorisana). Da bi se sprečio nagli pad proizvodnje vode u sistemu usled potrošnje vode za pranje, potrebno je imati veliki broj filtarskih polja (da bi manja količina vode išla za pranje). Velike brzine u sistemu, bi mogle prouzrokovati nedozvoljenu ekspanziju prilikom pranja, nekad čak toliko da dođe do izdizanja i gubljenja filtarskog materijala preko zidova filtarske jedinice. Pumpe koje direktno pumpaju vodu za pranje moraju biti prilično velike snage i kapaciteta, pa su samim tim i skupe. Velike oscilacije temperature vode tokom godine utiču na značajne promene potrebne brzine pri pranju, a samim tim i na rad crpki. Potrebno je predvideti merenje i regulaciju protoka.

Rezervoari za pranje izdignuti iznad postrojenja pokazuju značajne prednosti u pogledu fleksibilnosti prilagođavanja potrebnom kapacitetu, omogućavajući pranje brzinama i većim od predviđenih. Oni se pune pomoću pumpi relativno malih kapaciteta. Čak i kada su na minimalnoj zapremini oni moraju dati željeni kapacitet za pranje do najudaljenijih filtarskih jedinica. To se postiže dovoljnom visinom rezervoara iznad filtra koja obično iznosi od 5 do 10 m, a nekad i manje, (kada se rezervoar stacionira na pogodno mesto, blizu filtarskih jedinica). U slučaju velikog broja filtarskih jedinica i malog vremena između dva pranja, zbog velike zaprljanosti vode, mogućnost pranja dve filtarske jedinice istovremeno bi morala da se predvidi. Ovi rezervoari predstavljaju najfleksibilnije rešenje sistema za pranje filtra.

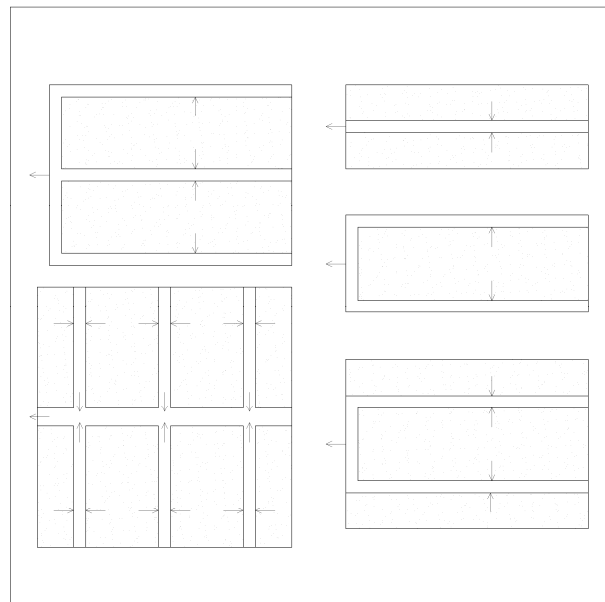
Treba izbegavati pranje filtra vodom iz vodovoda. Kada se male filtarske jedinice mogu tokom cele godine prati istom brzinom vode, pumpe za pranje mogu dati zadovoljavajuće rezultate, po niskoj ceni. Ako imamo veće površine polja, onda rezervoari izdignuti iznad filtarskih jedinica mogu dati ekonomičnije rezultate, dok su sigurno najbolje rešenje u slučaju kada brzine vode prilikom pranja značajno variraju tokom godine. Rezultate primenjene tehnike pranja treba stalno beležiti i to će pružiti značajnu pomoć, kao podloga za upravljanje, eksploataciju i za dalje projektovanje. Računa se da potrošnja vode za pranje iznosi od 1 do 3% od ukupne količine filtrirane vode.

Za vreme pranja, zatvaračima se mora rukovati oprezno. Za dobijanje željene brzine pri pranju, zatvarači se moraju otvarati lagano, dok se ne dostigne željeni stepen ekspanzije, a isto tako i zatvarati. Obično se zatvaračima upravlja automatski, u zavisnosti od potrebnog protoka.

4.5. Odvod vode od pranja filtarske ispune

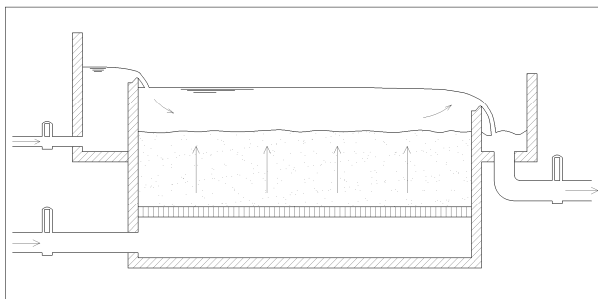
Voda za pranje, zajedno sa nečistoćama mora se odvesti iz filtarskog polja za šta se obično koriste kolektorski kanali u koje voda dospeva preko preliva. Na slici 10 date su neke dispozicije kolektorskih kanala za odvođenje vode od pranja. Na slici 11 dat je jedan način pranja filtra vodom kome se voda dovodi kao za vreme procesa filtracije odozgo radi bržeg odnošenja čestica nečistoća (smanjuje se vreme pranja, a višak vode koja se uvodi odozgo se kompenzuje sa nešto manjom količinom vode za pranje koja se uvodi odozdo).

Preporučljivo je koristiti i pokretne prelive, čija je osnovna prednost da i onu preostalu (zaostalu prljavu vodu) mogu ispustiti.



Slika 10. Dispozicije kolektorskih kanala za odvođenje vode od pranja filtra

Visinski položaj prelivne ivice kolektorskog kanala mora biti takav da prilikom pranja ispune ne dođe do iznošenja čestica filtra zajedno sa vodom od pranja. Prelivanje mora biti nepotopljeno. Zato se uglavnom primenjuju visinski rasporedi preliva dati na slici 11.



Slika 11. Pranje filtra

Dubina na uzvodnom delu kanala mora biti jednaka kritičnoj dubini.

$$h_1 = \sqrt{h_2^2 + \frac{2Q^2}{gb^2h_2}}$$

gde je Q izlazni protok, b širina kanala a h_2 kritična dubina koja iznosi:

$$h_2 = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gb^2}}$$

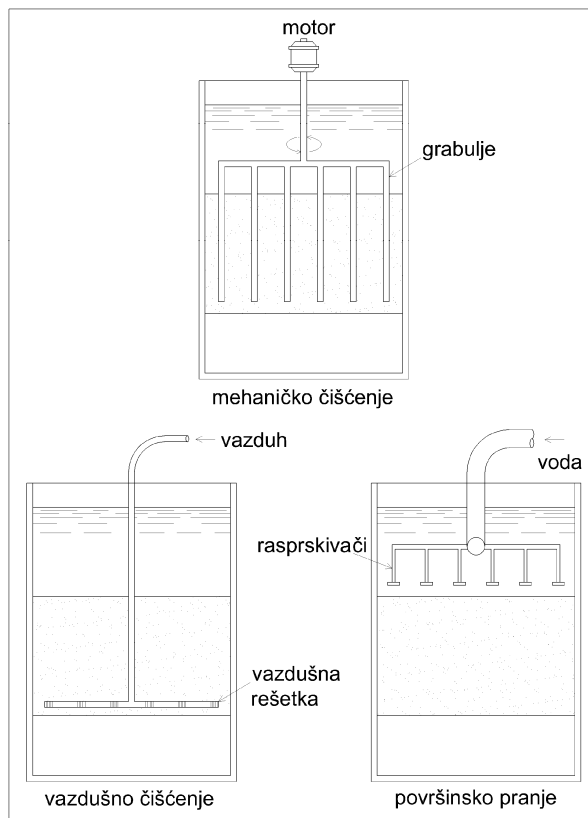
(za kanal je pravougaonog poprečnog preseka)

4.6. Neka zapažanja kod pranja samo vodom

Izabere se dovoljna količina vode da izazove ekspanziju peska, tj. Povećanje njegove zapremine za najmanje 15%. U tako rastresenom filtarskom polju formiraju se strujnice, koje u nekim zonama pomeraju pesak naniže, a u drugima naviše. Zbog toga se dešava da se delovi kompaktne kore mulja s površine peska pomeraju u unutrašnjost filtarske mase i da se tamo, pod dejstvom vrtložnih strujnica, od njih formiraju blatne lopte (mud-balls).

Formiranje blatnih lopti se može delimično sprečiti razbijanjem površinske kore pomoću snažnih mlazeva vode pod pritiskom koje razbacaju rotacione ili nepokretne mlaznice (površinski ispirajući kao na slici 12).

Ovakvo pranje treba vršiti uz mnogo predostrožnosti, a za vreme procesa neophodno je da se tačno meri povećanje zapremine peska. Još veći nedostatak ovakvog načina pranja je u tome što on može da dovede do granulometrijskog klasiranja, s tim što se fine čestice peska penju ka površini i otežavaju filtriranje odozgo naniže.



Slika 12. Pomoćno pranje filtra

4.7. Dodatne mere koje se koriste radi efikasnijeg pranja prilikom pranja filtra

Da bi se dobilo što je moguće duže vreme između dva pranja, pranje samo vodom nije dovoljno za potpuni efekat pranja. Moraju se često sprovesti dopunske mere da bi se postigao pomenuti efekat. Načini za povećanje efikasnosti pranja mogu biti: mehanički, sa rotirajućim grabuljama, koji mešaju ispunu, pneumatski, uduvanjem vazduha pod pritiskom u filtarsku ispunu ili hidraulički, gde se površina ispune izlaže dejstvu jakih mlazeva čiste vode. Smisao ovih metoda je da se poveća mehaničko spiranje (prve dve metode, tj. hidrauličko (u trećem slučaju). Sva tri načina prikazana su na slici 12.

Pranje vodom i vaduhom

Ovaj postupak se sve više primenjuje. Sastoji se u puštanju slabijeg mlaza vode odozdo na gore (u kombinaciji sa vazduhom, koji obično ide na početku procesa, pa su najčešće kombinacije vazduh-voda,

vazduh-vazduh i voda-voda, vazduh i voda-voda). Vodom se najčešće završava proces pranja. Kako pesak ovde ne povećava zapreminu, a vazduh savršeno razara površinsku koru, nije moguće formiranje „blatnih lopti,.. Potrebna količina vode za pranje je manja nego u prethodnom slučaju, a i granulacija ispunje po vertikali ne trpi štetne promene.

4.8. Tipovi konstrukcija sistema za pranje brzih filtra

Filtarska ispuna zajedno sa drenažnim sistemom, je smeštena u “ kutiju “ dubine od 2 do 4 m, površine osnove od 15 do 150 m². Ova konstrukcija je obično od prethodno-napregnutog ili armiranog betona. Sva filtarska polja su iste površine i strogo je preporučljivo da budu pravougaonog oblika. Kod primene brzih gravitacionih filtra trebalo bi se držati sledećih pravila:

- predvideti najmanje tri filtarska polja (jedno je uvek van pogona radi ispiranja; kod većeg broja filtarskih polja, iznad šest treba predvideti dva polja za rezervu).
- nastojati da broj filtarskih polja bude paran jer bi se bolje iskoristio prostor u filtarskoj zgradi (ako su filtri u dva reda).
- intenzitet pranja treba da je takav da se postigne 30-50% ekspanzije filtarske ispunje.
- što je intenzivniji protok vode i vazduha, efikasnije je pranje filtra, pod uslovom da se ne prekorači granica protoka pri kojoj se ispuna iznosi iz filtra.

Filtarsko dno brzog gravitacionog filtra ima tri zadatka: da drži (nosi) filtarsku ispunu, da omogući izlaz filtrirane vode i za snabdeva filtre vodom za pranje sa donje strane filtarskog polja. Filtarsko dno mora biti konstruisano tako da ne dozvoli nikakav gubitak filtarskog materijala i da se obezbedi ravnomerna distribucija vode za pranje. Izbor konstrukcije filtarskog dna tj. drenažnog sistema predstavlja najbitniju stvar a istovremeno izaziva mnogo kontroverzi i nedoumica.

Jedan od najstarijih i još uvek najšire primenjenih konstrukcija drenažnog sistema jeste sistem perforiranih cevi, povezanih sa glavnim dovodom vode (kanalom). Perforirane cevi imaju male otvore na svojoj donjoj strani. Kroz te otvore voda za pranje izlazi vertikalno nadole ili pod uglom 30⁰ ili 45⁰ od vertikale. Kinetička energija izlazećeg mlaza brzo se smanji jer mlaz udara u dno filtra ili u okolne čestice šljunka te nema opasnosti da utiče na preraspodelu čestica ispunje. Šljunak oko perforiranih cevi se smešta ručno te nema opasnosti da

se pojavi začepjenje otvora na lateralama. Hidraulički otpor u filtarskom dnu jednak je brzinskoj visini izlazećeg mlaza iz otvora. Ta brzinska visina se može sračunati:

$$\frac{v_0^2}{2g} = \frac{8}{\pi^2 g \mu^2} \frac{v^2}{n^2 D_0^4}$$

gde je : n-broj otvora prečnika D₀ po m² filtarskog polja, v-brzina vode pri pranju (m³/m²s.), a m-koeficijent protoka, približno jednak 0,7.

Usvajajući brzinu pranja v=15 10⁻³ m/s. I 50 otvora prečnika D₀=10 mm po m² dobija se sledeći rezultat:

$$v_0^2 / 2g = \frac{1}{6} \frac{(225)10^{-6}}{(2500)10^{-8}} = 1,5 \text{ m}$$

U praksi ovaj otpor varira od 1 do 4 m, broj otvora varira od 25 do 75 na m², dok njihov prečnik varira od 6 do 15 mm. Da bi se obezbedila ravnomerna distribucija vode za pranje, potrebno je da promena pijeziometarske linije duž sistema za pranje nije velika (jer protok zavisi direktno od nje). Pijeziometarska linija unutar laterala raste sa porastom ulazne brzine dok opada usled trenja i turbulencije.

Najveća razlika će se pojaviti između otvora A i C (slika 13). Hidraulički otpori A¹-A i B¹-B su približno jednaki. Razlika pijeziometrijskih kota je (otpori duž cevi sa usputnom potrošnjom):

$$D_{A^1-B} = \frac{v_m^2}{2g} - \frac{1}{3} \lambda_m \frac{L_m}{D_m} \frac{v_m^2}{2g} - \frac{1}{n_m^2} \frac{v_m^2}{2g} = \alpha_m \frac{v_m^2}{2g}$$

$$D_{B-C} = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{1}{3} \lambda_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{v_1^2}{2g} - \frac{1}{n_1^2} \frac{v_1^2}{2g} = \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g}$$

U gornjim jednačinama je: L-odgovarajuća dužina dovodnog kanala tj. Laterala; D-prečnik; λ-linijski koeficijent trenja; v-ulazna brzina; indeksi n i m označavaju broj laterala tj. broj otvora na svakom od njih.

Totalni pad pijeziometra je, dakle, jednak:

$$D_{A-C} = a_m \frac{v_m^2}{2g} + a_1 \frac{v_1^2}{2g},$$

gde se vrednosti veličina a_m i a₁ kreću od 0,5 do 0,8.

Kao što je ranije već računato minimalno potreban hidraulički otpor u filtarskom dnu je:

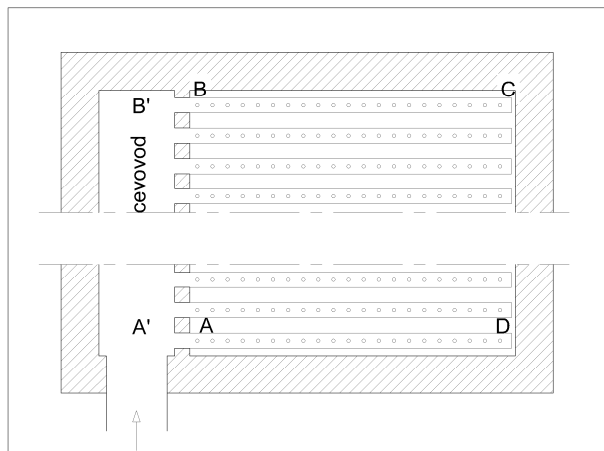
$$H_{dna} = 0,18 + 25dH,$$

gde je dH razlika pijeziometarskog nivoa.

Nivo vode iznad filtra ima približno istu kotu duž filtarskog polja. Na kraju se dobija:

$$\frac{v_0^2}{2g} = 0,18 + 25\left(\alpha_m \frac{v_m^2}{2g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g}\right) .$$

Koeficijent protoka m nije konstantan već zavisi od brzine i to tako da je veći ukoliko je brzina manja. To je drugi razlog zbog kog će lateral B-C primati više vode nego lateral A-D i zbog čega će otvor C dobiti više vode nego otvor B.



Slika 13. Osnova brzog pešćanog filtra

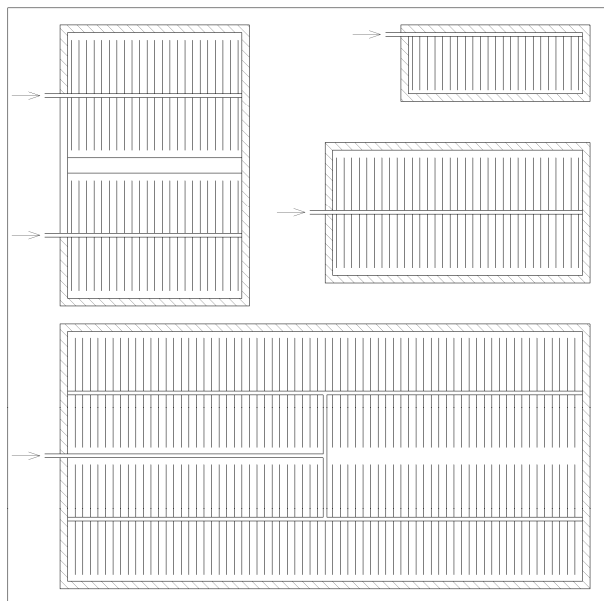
Ove razlike u protoku mogu se povećavanjem rastojanja između laterala duž kanala i rastojanja između otvora na lateralama da bi se kompenzovalo povećavanje pijezometrijske kote.

Glavni dovodni kanal se obično pravi od livenog gvožđa, čelika sa omotačem od betona, od prethodno-napregnutog ili armiranog betona. Što se tiče laterala čelik, gvožđe i bakar više nisu tako popularni, u sve veću upotrebu ulaze razni plastični materijali.

Unutrašnji prečnici glavnog dovodnog kanala i laterala moraju zadovoljavati gore pomenute hidrauličke uslove (brzine vode prilikom pranja), dok debljina njihovih zidova mora biti tolika da omogući dovoljnu otpornost, da bi mogli da drže filtarsku ispunu, ali eventualne visoke pritiske koji bi se mogli javiti pri samom početku procesa pranja (naglo otvaranje zatvarača). Unutrašnji prečnici laterala variraju od 0,05 do 0,12 m, njihov razmak od 0,15 do 0,30 m, otvori na njima od 6 do 15 mm, dok su rastojanja između otvora između 0,10 do 0,25 m. Ne treba zaboraviti da je ovaj drenažni sistem relativno nepristupačan za pregled. Posebna pažnja mora se posvetiti materijalu od koga će se praviti cevi ovog drenažnog sistema, s obzirom da sirova voda može

biti agresivna (oksidacijom organskih materija dolazi do formiranja CO_2 , što rezultira smanjenju pH vrednosti). Zato se cevi moraju praviti od koroziono otpornih materijala ili se njihova unutrašnjost oblaže slojem plastike. Takođe, treba zaštititi i prostor oko otvora na lateralama, jer je on izložen eroziji vode, te se najčešće oblaže slojem od bronce ili od bakra. Neke klasične dispozicije ovog načina pranja date su na slici 14.

Ovaj sistem pranja ne sadrži samo glavni dovodni kanal i laterale. Vrlo bitna komponenta ovog sistema su slojevi šljunka čija je glavna uloga da ne dozvoli da filtarski materijal ulazi u drenažni sistem i da omogući ravnomernu distribuciju vode, koja se pojavljuje iz mnogobrojnih otvora na lateralama. Debljina šljunčanog sloja mora biti izabrana tako da zadovolji oba ova uslova, bez nepoželjnog efekta premeštanja čestica šljunka unutar sloja usled dejstva toka vode prilikom pranja. Ovi slojevi moraju biti pažljivo i precizno graduisani. Šljunak na vrhu sloja mora biti dovoljno sitan da onemogući filtarski materijal (pesak) da prodre u sloj šljunka, dok istovremeno mora biti dovoljno krupan da ne bi došlo do njegove ekspanzije za vreme pranja. Sloj šljunka na dnu sloja mora biti dovoljno krupan tako da ne dolazi do dislociranja za vreme pranja, usled jakih mlazeva vode. Isto tako, najniži sloj ne sme da prouzrokuje začepljenje i blokiranje otvora na lateralama. Obično se ovaj sloj sastoji od zrna prečnika od 30 do 60 mm, dok se u gornjem sloju ovi prečnici kreću od 2 do 20 mm. Debljina pojedinih slojeva šljunka ne bi trebalo biti manja od 0,07 m, sem gornjeg sloja čija je debljina nešto veća i kreće se od 0,1 do 0,15 m, kao i nešto veća debljina donjeg sloja da bi obuhvatila laterale. Neki tipični rasporedi šljunčanih slojeva date su na slici 15. Na levoj dispoziciji veći je broj otvora na lateralama, te su izlazne brzine manje, pa i nema potrebe za nekom velikom debljinom šljunčanog sloja. Dispoziciji u sredini odgovara veće rastojanje između otvora na lateralama ili veće rastojanje između samih laterala, tako da se veća debljina šljunčanog sloja opravdava potrebom za boljom raspodelom vode duž filtarskog polja. Desna dispozicija se primenjuje u slučaju kada postoji opasnost od ekspanzije gornjeg sloja šljunka, a kasnije i disperzija u filtarskoj ispunu. U ovom slučaju, gornji sloj može da se sastoji od zrna veće težine, od magnetita ili od granita. Kada je ovo suviše skupo, onda se treba truditi da gornji sloj šljunka bude što je moguće krupniji i što je moguće veće debljine, npr. 0,15 m. Veće debljine slojeva doprinose ravnomernijoj distribuciji vode.

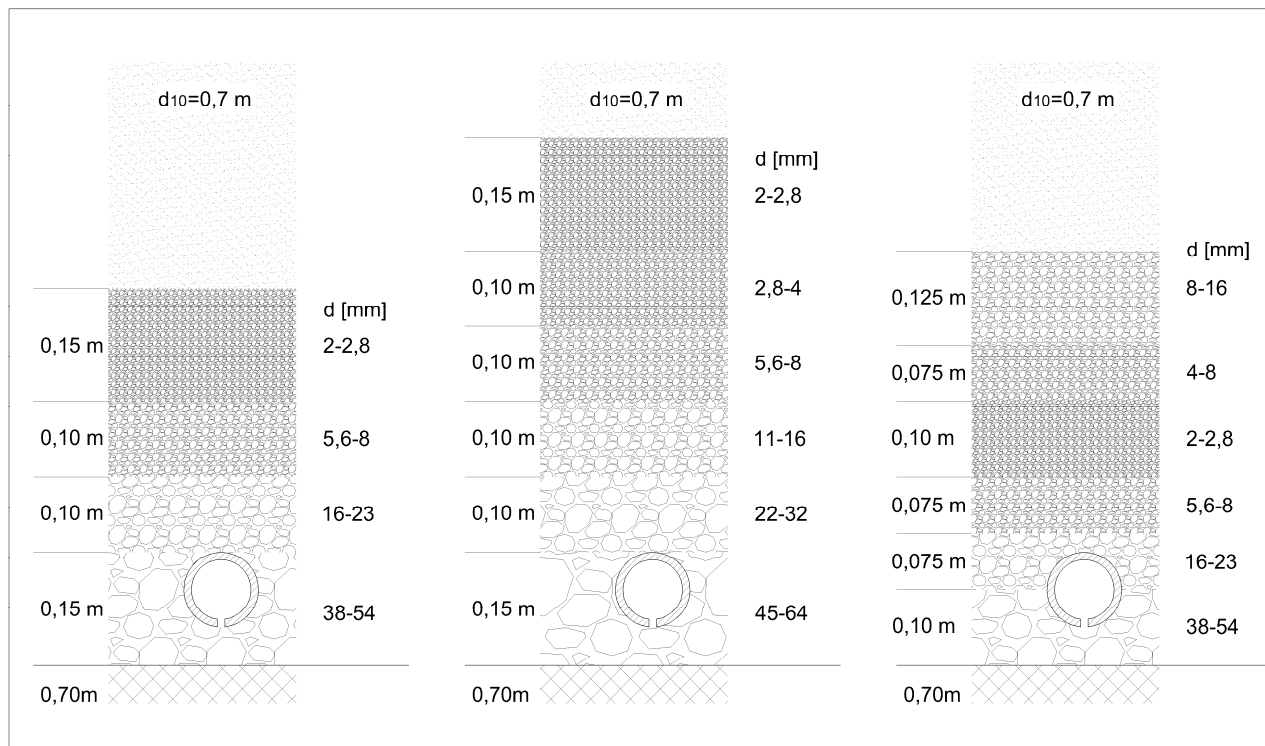


Slika 14. Raspored perforiranih drenažnih cevi

Šljunak koji se ovde koristi ne bi trebalo da ima gustinu manju od 2500 kg/m^3 i morao bi da se pre upotrebe pažljivo opere, da bi se otklonile primese (pesak, glina, razne nečistoće, organske materije). Šljunak se u

filtrarsko polje vrlo pažljivo postavlja. Donji slojevi se postavljaju ručno, da bi se onemogućile bilo kakve nestabilnosti u strukturi sloja za vreme pranja filtra. Ako se ovo ne poštuje, te se šljunak postavlja bez neke veće opreznosti, već vrlo mala klizanja unutar njega izazivaju promenu unutrašnje strukture, što dovodi do neravnomerne distribucije vode.

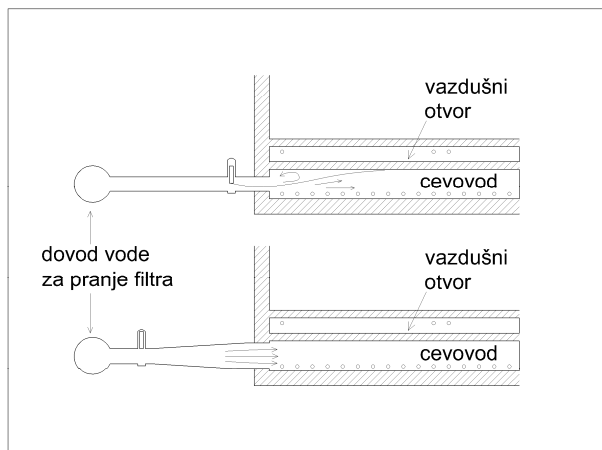
Kada se očekuje da pranje samo vodom nije dovoljno da filtar bude dugo čist, tj. ako je vreme između dva pranja suviše kratko a i da bi se razbila površinska kora, onda se mora primeniti i pranje vazduhom, čime se bitno povećava efikasnost pranja. Najprostije i najjeftinije rešenje upravljanja ovim dodatnim sistemom pranja je, da se iskoriste laterali koji već postoje. Laterale bi sad imale dodatne otvore koji bi se nalazili na vrhu cevi, dok bi na dnu ovih cevi bili otvori za vodu. Kada se vrši istovremeno pranje vodom i vazduhom, svakako bolja distribucija vode i vazduha bi se dobila upotrebom odvojenih sistema za vodu i vazduh, dopuštajući i veći broj otvora za vazduh, 50-100 na m^2 . Brzina pranja vazduhom bi trebalo biti ista kao i vodom, znači od $(10)10^{-3}$ do $(20)10^{-3} \text{ m/s}$ (pod atmosferskim pritiskom). Brzine vazduha u dovodnim cevima su velike i obično iznose od 10 do 15 m/s . Zato su prečnici ovih cevi vrlo



Slika 15. Raspored slojeva šljunka kod brzih pešćanih filtra

mali i kreću se od 15 do 25 mm. Otvori su prečnika od 1 do 2 mm. Materijali koji se najčešće upotrebljavaju za ove cevi su bakar i plastika. Svi vazdušni otvori bi trebalo biti postavljeni na jednom istom nivou da bi se što ravnomernije izvršila raspodela vazduha po filtru. Najbolje bi bilo da se vazдушna cev smesti direktno na vrh laterala za vodu.

Na ovaj način noseć sloj šljunka zaštićen je od jakih mlazeva vazduha, koji bi mogli da ga raskomešaju, jer se vazduh pojavljuje na dnu šljunčanog sloja i njegova kinetička energija se rasipa udarima o najkrupnije čestice šljunka (20-30 mm). Kada se ne vrši pranje filtra vazduhom, postoji opasnost da se cevi za dovod vazduha ispune filtriranom vodom, koja sadrži suspendovane materije te da se izazove začepljenje otvora za vazduh. Ovo začepljenje može biti prouzrokovano i raznim bakterijama. Ova opasnost može se otkloniti povremenom hlorisanjem ili ako se u cevima za vazduh stalno drži vazduh pod nekim minimalnim pritiskom, dovoljnim da spreči dotok vode. Pranje vazduhom u ovom slučaju veoma je otežano, što ovaj sistem čini nepovoljnim. Noseći sloj šljunka može znatno otežati funkcionisanje sistema (začepljenja), a velika dubina polja prouzrokuje i veću cenu koštanja konstrukcije. Zato je ovaj sistem brzo napušten. Na slici 16 dati su primeri dobre i loše hidrauličke dispozicije glavnog dovodnog kanala.



Slika 16. Hidrauličko oblikovanje dovoda vode za pranje filtra

Potrebna brzina vode za pranje dobija se upravljanjem zatvaračem, koji se nalazi na glavnoj dovodnoj cevi. Kada se voda dovodi iz rezervoara koji se nalazi iznad filterskih jedinica, ovaj zatvarač služi i za regulisanje protoka, tako da voda ulazi u ulaznu cev brzinama koje

obezbeđuju dovoljno malu ulaznu brzinu. Na slici 16, zahvaljujući levkastim fazonskim komadom, omogućena je ravnomernija raspodela vode, tj. smanjena je ulazna brzina.

Najveća mana ovog drenažnog sistema je u tome, što je neophodna primena nosećeg sloja, čime se komplikuje rad sistema uz dodatno poskupljenje konstrukcije zbog šljunka a i zbog velike dubine filterarskog dna. Još ako pridodamo i mogućnost lošeg projektovanja nosećih šljunčanih slojeva, onda problemi postaju još veći. Uz prisustvo stalne ljudske tendencije za novim konstrukcijama a za izbegavanje starih, postaje jasno zašto se danas ovaj tip drenaže sve manje koristi.

Mana drenažnog sistema perforiranih cevi (velika debljina nosećeg sloja), može se izbeći primenom istog ovog sistema, ali sa diznama koje su umetnute u laterale, na njihovom vrhu. Ove dizne, na svom gornjem delu, imaju mnogo malih otvora, iz kojih voda ili vazduh horizontalno izlaze u okolni šljunak. Mlazevi vode ili vazduha nisu jaki, tako da ne može doći do neželjenih premeštanja nosećeg sloja, čak i ako su zrna sloja male krupnoće. Zrna šljunka moraju biti i dovoljno krupna da ne dođe do njihovog prodiranja u otvore dizni. Sa otvorima na diznama od 1 mm, jedan sloj šljunka krupnoće od 2 do 2,8 mm i debljine od 0,15 m je sasvim dovoljan. Debljina sloja šljunka od 0,2 do 0,25 m je dovoljna za ravnomernu distribuciju vode za pranje, bez obzira na njegovu krupnoću. Dizne poboljšavaju distribuciju vode i vazduha duž celog filterarskog polja. Efikasnost ovog sistema zavisi od broja dizni i on se obično kreće od 70 do 100 po m². Mogući kvar na diznama mogao bi prouzrokovati vrlo velike gubitke filterarskog materijala unutar drenažnog sistema, koji bi se kasnije začepio. Ovo bi dalje dovelo do komplikovane opravke sistema pa tim i do dodatnih troškova. Zato se dizne prave od materijala dovoljne čvrstoće i korozione otpornosti kao što su bakar, čelik, bronza i dr (u zadnje vreme najviše od koroziono otporne plastike).

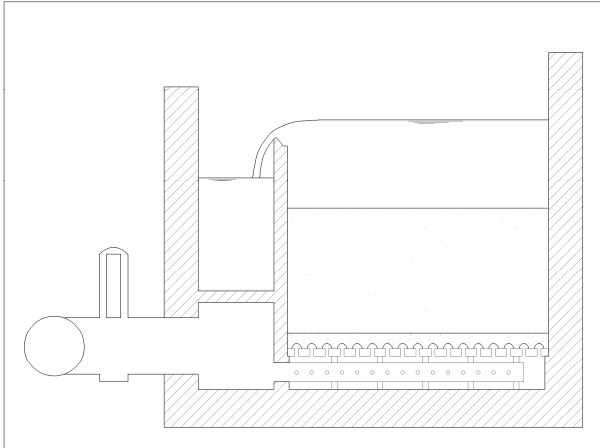
Ovaj sistem pranja je povoljan i za slučaj pranja vodom-vazduhom (bilo odvojeno, bilo paralelno). U gornjem delu diznine cevi, kojom se ostvaruje veza sa lateralom, nalazi se mali otvor, koji služi za ulaženje vazduha u diznu.

Ipak, upotreba ovog sistema nije tako rasprostranjena, najviše zbog suviše složene konstrukcije (laterala i dizni). Zato se pojavila konstrukcija "lažnog dna" preko koje se na mnogo jednostavniji način vrši distribucija

vode i vazduha nego što je to u prethodnom slučaju. Kada se ispod "lažnog dna" ostavi dubina od 0,2 do 0,3 m, varijacija pijezometarskih kota duž polja je skoro neznatna, tako da već mali hidraulički otpori na diznama su dovoljni za ravnomernu distribuciju vode i vazduha. Bitno je da ulazna brzina vode nije velika, jer bi velika brzinska visina dala veću razliku pijezometarskih kota, što bi pogoršalo proces pranja. Imajući ovo na umu, filtarske jedinice su opremljene betonskim kanalom, koji služi da prihvati vodu iz glavnog dovodnog kanala i da je dalje sprovede u prostor ispod "lažnog dna" uz pomoć dizni (slika 17).

Da bi se dobio prostor za perforirane cevi, neophodno je da se "dubina lažnog dna" poveća na 0,4-0,5 m. Povećavanje ove vrednosti na vrednost od 0,7 m, objašnjava se činjenicom da je potreban i prostor za eventualne popravke i kontrolu. Kao što se vidi, ipak nije ostvaren glavni cilj, da se dobije filtarsko dno manje dubine od sistema perforiranih cevi.

Hidraulički gubici na diznama potrebni za efikasno pranje se ovde kreću u granicama od 0,5 do 1 m. Međutim, proračun ovih gubitaka je vrlo težak zbog komplikovanog mehanizma začepljivanja dizni (okolni šljunak ili filtarski materijal), pa se otpori na diznama proveravaju i izračunavaju na modelu.



Slika 17. Konstrukcija "lažnog dna"

Moderan trend u konstruisanju ovog sistema pranja je da se upotrebljavaju slojevi šljunka nešto veće debljine, čime bi se značajno mogao smanjiti broj dizni (sa recimo nekih prosečnih 80 na 36 po m^2), a time i cena konstrukcije. Bolja distribucija vode i vazduha a istovremeno i bolja zaštita dizni, bi se dobila ako bi

dizne bile smeštene u udubljenja, kada glava dizne ne bi štrčala u šljunak.

"Lažno dno" se obično pravi u kvadratnim sekcijama, stranice oko 0,6 m, najčešće od čelika ili armiranog betona. Kvadratne ploče su pomoću kratkih betonskih stubova ili čelečnih klinova ankerovane za armirano betonsko dno filtarske jedinice. Posebnu pažnju treba posvetiti spojevima između pojedinih sekcija, koji moraju biti vodonepropusni. Nekad su se dizne pravile od bakra, bronz, nerđajućeg čelika i drugih materijala dovoljne otpornosti na koroziju, ali koji su bili i dosta skupi. Danas, dizne se najčešće prave od plastike. Najveća opasnost dolazi od mogućnosti da se dizna slomi usled mehaničkih ili hidrodinamičkih opterećenja. Ipak, uvek je obavezno ostaviti dovoljno prostora ispod "lažnog dna", kako bi se eventualna popravka mogla lako izvršiti. Na diznama se nalaze fini otvori, tj. razrezi širine manje od 0,5 mm. Tako uzani otvori mogu vrlo lako da se začepe algama ili mikroorganizmima, koji rastu u prostoru ispod "lažnog dna". Brzina vode prilikom pranja filtra od $15 \times 10^{-3} m/s$ je sasvim dovoljna za normalno pranje filtra (nastaje ključanje filtra, tj. dolazi do potrebne ekspanzije), ali brzina vode ispod lažnog dna od 15 mm/s, je sasvim nedovoljna da izvrši iznošenje biljnog i životinjskog sveta kroz dizne. Zbog ovoga dolazi do produkcije organske mase, koja prouzrokuje na taj način, začepljenja filtarskih dizni. Već posle začepljivanja nekoliko dizni dolazi do neravnomerne distribucije vode za pranje. Začepljivanje većeg broja dizni, prouzrokuje veliko povećanje pritiska ispod lažnog dna, koje se neće moći odupreti, tako da će doći do potpunog uništavanja filtra. Rast organskog sveta može se sprečiti povremenim hlorisanjem sirove vode ili čak vode za pranje, ali to bi moglo izazvati sprečavanje bilo kakve biološke aktivnosti (ukoliko su količine hlora prevelike).

Ovaj sistem pranja može se lako primeniti i u slučaju istovremenog ali i u slučaju odvojenog pranja vazduhom i vodom. Voda za pranje ulazi sa donje strane diznine cevi, dok vazduh ulazi kroz otvor koji se nalazi na gornjem delu iste cevi. Otvori bi morali biti, radi ravnomernijeg pranja, istog dijametra i homogeno raspoređeni na dizninoj glavi. Dizne bi morale biti na istom nivou, zbog ravnomerne distribucije, što može biti vrlo težak i komplikovan posao prilikom njihove montaže.

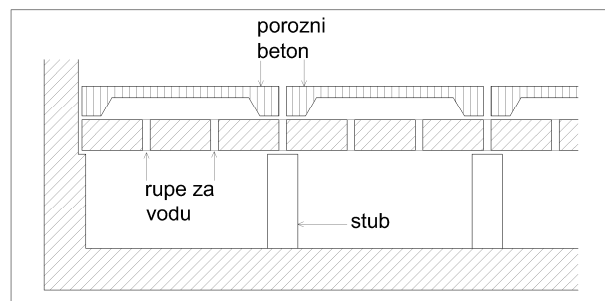
Sa povećavanjem broja dizni po filtarskom polju, efekti pranja filtra se poboljšavaju. To je navelo neke

istraživače na ideju da cela ploča lažnog dna bude "izbušena" otvorima (preko kojih bi se voda i vazduh dovodili). U stvari, dobila bi se porozna ploča vrlo sitnih otvora, tako da i vrlo sitan pesak može biti smešten na vrhu ploče, bez bojazni da će doći do gubitka filtarskog materijala. Noseći sloj od šljunka ovde nije neophodan, što doprinosi znatnom smanjenju koštanja konstrukcije, a istovremeno se smanjuju komplikovanosti koje mogu nastati postojanjem ovog sloja (njegovo uvlačenje u filtarsku ispunu). Porozna ploča se sastoji od kvadrata stranice oko 0,6 m, pričvršćenu na rastojanjima od 0,2 do 0,3 m pomoću betonskih stubova ili čeličnih klinova o završnu ploču konstrukcije. Velika pažnja mora se posvetiti spojevima ovih kvadratnih ploča, koji moraju biti potpuno vodonepropustljivi. U Americi, ove ploče se prave od aluminijum oksida (materijal, poznatiji kao korund), dok se u Evropi ove ploče najčešće prave od poroznog betona.

Bez ikakve sumnje, ove porozne ploče imaju mnoge prednosti i one predstavljaju najprostije rešenje problema, ali samo naizgled. Za ravnomernu distribuciju vode za pranje, neophodni su gubici na filtarskoj ploči od 0,5 m (za brzinu pranja od $15 \cdot 10^{-3}$ m/s). Isto tako, potrebni su izuzetno fini otvori na poroznim pločama, koji su istog ili malo većeg prečnika nego pore u filtarskoj ispuni. Filtrirana voda nosi nečistoće u suspenziji koje se mogu ukloniti otvorima u filtarskom dnu (ali i eventualno začepiti rupice ploče), dok se neke rastvorene supstance, kao što su gvožđe, mangan, kalcijum, magnezijum mogu taložiti u filtarskom dnu (mogu procesima hemijske i biološke oksidacije preći u više oksidaciono stanje i samim tim u nerastvoren oblik). Posle nekog vremena rada filtra, može se pojaviti začepljivanje filtarskog dna, povećavajući na taj način otpore vodi za pranje, koja će se sada pojavljivati pod povećanim pritiskom, što može prouzrokovati i pucanje ploče. Ova pojava se ne može sprečiti sasvim, ali se zato može učiniti manje ozbiljnom periodičnim čišćenjem filtarskog dna tj. ploče 2% natrijum hidroksidom ili 5% hlorovodoničnom kiselinom, zavisno od prirode začepljenja. Nije ni potrebno reći da u ovom slučaju, sva oprema koja je u kontaktu sa ovim hemikalijama mora biti i hemijski otporna (kao i materijal same ploče). To su onda dodatna ulaganja, koja povećavaju cenu konstrukcije. Sumirajući sve ovo, može se reći da ma kako je na početku izgledala atraktivno, porozna ploča se danas ne preporučuje. To se naročito naglašava kada postoji i pranje vazduhom, koji se ovde dovodi cevima iznad filtarskog dna (ploče), da vazdušni mehurovi ne bi

izazivali začepljenje otvora na pločama. Vazduh može izazvati turbulenciju peska tj. ispune, pri čemu može doći i do velikih gubitaka peska, koji može završiti i u kanalima za skupljanje prljave vode. To se može sprečiti postavljanjem jednog ili dva šljunčana sloja, ali se onda ozbiljno dovodi u pitanje funkcionalnost konstrukcije.

Pošto se glavni problem problem javlja usled začepljivanja suviše malih otvora, došlo se na ideju da se porozne ploče prave od ne tako finog betona, koji bi bio sastavljen od šljunka veće krupnoće. Nevolja u primeni ovakve porozne ploče leži u činjenici, da ovakva betonska ploča ne bi mogla da obezbedi neophodan hidraulički otpor potreban za ravnomernu raspodelu vazduha i vode prilikom pranja filtra. Dakle, bilo bi potrebno nanošenje dodatnog hidrauličkog otpora, da bi se navedeni problem neravnomerne raspodele rešio. To se može postići primenom još jednog "lažnog" dna, napravljenog od običnog betona, koji bi imao mnogo otvora. Ti otvori bi obavljali funkciju dodatnih hidrauličkih otpora. Filtarsko dno pristupačno za opravke i pregled, bez upotrebe nosećeg šljunčanog sloja, izgleda vrlo primamljivo, ali je još uvek sporno koliko je ovakva konstrukcija skupa i komplikovana. Dvostruko (duplo lažno dno) dato je na slici 18.



Slika 18. Konstrukcija "duplog lažnog dna"

Pranje filtra – lažno dno

U domaćoj praksi pranja filtra, najčešća se upotrebljava konstrukcija duplog dna. U ovom načinu pranja, voda i vazduh se dovode sa čela. Zadatak ovako koncipirane konstrukcije je:

- da gornjom pločom prihvati težinu filtarskog sloja i vode i da spreči propadanje filtarskog materijala u komoru duplog dna,
- da omogući pravilno postavljanje mlaznica i obezbedi ravnomerno filtriranje na celoj površini filtarskog polja,
- da sakuplja i transportuje filtriranu vodu,

- da obezbedi ravnomernu raspodelu protoka vazduha i vode po celoj površini dna u toku pranja filtarske ispune,
- da omogući pristup u komoru dvojnog dna radi eventualnih popravki ili revizija i čišćenja,
- da se može jednostavno izvesti uz kontrolu položaja mlaznica

Konstrukcija dvojnog dna može se izvoditi kao armiranobetonska monolitna ili kao delimična montažna. U slučaju monolitne konstrukcije, gornja ploča dvojnog dna izvodi se kao kontinualna sa ravnom donjom površinom, betonirana na licu mesta. Visina komore dvojnog dna treba da je min.70 cm, kako bi se obezbedila prohodnost zbog izvlačenja oplata i povremenih revizija i popravki. Istovremeno, otežano je postavljanje mlaznica u projektovani položaj kao i njihovo održavanje u tom položaju prilikom betoniranja, što se može smatrati kao ne mali nedostatak. Povoljnost ovoga rešenja ogleda se u tome da nema smetnji da se čeonim dovodom vazduha i vode postigne ravnomernost protoka na celoj površini filtarskog polja pri procesu pranja.

Vrlo često se, međutim, ide na projektovanje rešenja u kome je gornja ploča dvojnog dna izvedena od montažnih armiranobetonskih ploča. Ovakav tip konstrukcije zahteva i oslonce u komorama dvojnog dna. Oslonci se formiraju postavljanjem greda u pravcu kraćeg raspona koji odgovara dimenzijama montažnih ploča. Ispod greda ostavlja se prostor za transport vode pri filtriranju i pranju, dok se pri vrhu greda postavljaju otvori koji treba da obezbede ravnomernost raspodele protoka ispod celog filtarskog polja u toku postupka pranja filtera. Ovo rešenje može biti modifikovano time što se grede potpuno zamene zidovima sa otvorima za prolaz vazduha i vode.

Nedostatak ovako predloženih montažnih rešenja je u tome što komore dvojnog dna postaju neprohodne, pa se ne može intervenisati ukoliko se za to ukaže potreba, odnosno, pristup pločama je moguć samo odozgo, kada se mora ukloniti filtarski sloj.

Konstrukcija dvojnog dna može biti opterećena dvojako. Prilikom normalnog funkcionisanja filtra gornja ploča dvojnog dna je opterećena gravitaciono sopstvenom težinom, težinom potopljenih filtarskih slojeva i težinom vode iznad ploče.

Prilikom pranja filtra u dvojno dno se uvode voda i vazduh pod pritiskom od 0,5 do 0,6 bara, pa gornja

ploča biva opterećena u smeru suprotno gravitacionom. Ovaj pritisak treba da bude što ravnomernije raspoređen po ploči.

Na bočne zidove deluje horizontalni pritisak vode uvećan za aktivni pritisak potopljenih filtarskih slojeva. Postizanje što ravnomernijeg pritiska vazduha i vode u međuprostoru duplog dna prilikom pranja filtra je veoma značajan problem u slučaju montažno izvedene gornje ploče dvojnog dna. Naime, kako grede stvaraju dodatne otpore strujanju vode kroz duplo dno, a otvori za vazduh dodatne otpore strujanju vazduha, doći će do neravnomernog rasporeda pritiska vode i vazduha u duplom dnu, što dovodi do neravnomerne distribucije vode i vazduha za pranje po celom filtarskom polju. Ovo dovodi do negativnih efekata: ključanje peska, stvaranje blatnih lopti i sl. Ovakav proces može dovesti i do preopterećenja ploča i ankera i do havarije na objektu, što se i dešavalo na konkretnim objektima u praksi, kada su merenjima konstatovana povećana opterećenja od oko bara.

Montažno rešenje koje bi bilo hidraulički najpovoljnije i kojim bi se eliminisali ukazani nedostaci, bilo bi verovatno sa sistemom kvadratnih montažnih ploča oslonjenih na stubove (zatege) koji povezuju gornju (montažnu) i donju ploču dvojnog dna. U takvoj dispoziciji, za slučaj čeonog dovođenja vode i vazduha pri pranju, obezbeđena bi bila i prohodnost komore, a i ravnomernija raspodela pritiska prilikom pranja filtra, uz nešto komplikovanije statičko rešenje.

Jedno od najelegantnijih rešenja sistema za pranje filtra je Vilerovo lažno dno. Ova konstrukcije se sastoji od udubljenja sa otvorima, u kojim se nalaze porcelanske kugle različitih prečnika i koje služe za ravnomernu distribuciju vode i vazduha. Napominje se da je ova vrsta konstrukcije jedna od skupljih

Sve navedene konstrukcije drenažnog sistema (ujedno i sistem za pranje) suštinski se jako malo razlikuju i koja će se od njih primeniti zavisi od raspoloživog materijala, cene rada, iskustva tj. tradicije. Naravno, konačan izbor treba najpre zadovoljavati hidrauličke pa onda i ekonomske kriterijume. Na tabeli 6 dati su najvažniji zaključci, kojih bi se projektant trebalo držati prilikom projektovanja sistema za pranje brzih filtra.

U tabeli 7. dati su neki karakteristični parametri sistema pranja samo vodom i pranja vodom i vazduhom.

Tabela 6. Karakteristike različitih sistema pranja pešćanih filtra

TIPOVI KONSTRUKCIJA	DOBRO	LOŠE
1.perforirane cevi (običan drenažni sistem)	konstrukcija bez dizni, jednostavna.	Velika debljina šljunka pa samim tim i dubina filtarske jedinice, komplikacije usled loše projektovanog šljunka, slaba distribucija vazduha
2.cevi za raspodelu vode ili vazduha i vode sa diznama.	Bolja distribucija vode i vazduha od prethodne, tanji noseći sloj.	Složen sistem dizni i cevi.
3."lažno dno" sa diznama	dobra distribucija vode i vazduha, nema šljunka.	Opasnost od začepjenja velika, česta hlorisanja, povećana opasnost od havarije usled povećanih pritiska.
4. lažno dno od porozna ploča	najjednostavniji sistem za pranje i od prethodnih, najbolja distribucija.	Česta začepjenja tj. Česta pranja, povećana opasnost od havarije usled povećanih pritiska, opravka teška i komplikovana, neophodno je dobro zaptivanje spojnica.
5.duplo "lažno dno" dno	mala debljina šljunka, odlična raspodela posebno vazduha, vazduh i voda dovode se kroz mali broj cevi bez dizni.	Komplikovana konstrukcija, ujedno i skuplja od ostalih.
6.Wilerovo dno	lepa i elegantna konstrukcija.	Skupa, komplikovana konstrukcija.

Tabela 7. Karakteristike i parametric pranja pešćanih filtra

BITNE KARAKTERISTIKE	PRANJE SAMO VODOM	PRANJE VODOM I VAZDUHOM
za pranje potrebno m^3 vode/ m^2 površine (1 m visina sloja)	4-6	3-4
procenat potrebne vode za pranje u odnosu na ukupnu filtrovanu vodu	1-4%	1-2%
protok vode pri pranju ($m^3/h m^2$ filtra)	30-40	13-20
protok vazduha ($m^3/h m^2$ filtra)	nema	50-60 (računa se da je za jednu mlaznicu potrebno $1 m^3$ vazduha po času).
Ekspanzija ispune prilikom pranja filtra vodom	najmanje 15% (ide obično od 30 do 50%).	Manja nego u prethodnom slučaju, često i nepotrebna.
DOBRO	nema potrebe za složenom konstrukcijom sistema za pranje vazduhom.	Duže vreme ciklusa između dva pranja, efikasnije pranje.
LOŠE	slabiji efekti pranja, mogućnost pojave "blatnih lopti".	Složeniji sistem pranja, pa tako i nešto više investicije u ovom slučaju.

*

Imajući u vidu sve napregnutiju i težu situaciju u oblasti snabdevanja vodom naselja, koja zahteva razvoj sve složenijih regionalnih sistema za snabdevanje vodom [16], [13], [15], moraju se koristiti i izvorišta podzemnih i površinskih voda koja zahtevaju sve složenije i

pouzdanije tehnologije prečišćavanja vode u postrojenjima za prečišćavanje [6], [10]. U takvim okolnostima upotreba brzih pešćanih filtera dobija sve značajniju ulogu. Zbog toga su autori i smatrali da problem modeliranja filtera treba detaljnije razmatrati.

ZAKLJUČAK

Brzi peščani filtra su prvi put korišćeni 1885. godine u Sjedinjenim Američkim Državama u Nju Đersiju, dok su u Evropi prvi put pojavili 10 godina kasnije, 1895. godine u Švajcarskoj u Cirihu. Ovi filtra su bili izgrađeni kao potopljeni filtra sa slobodnom površinom vode i prolazom vode na dole pod dejstvom gravitacije. Uprkos pojavi novih tehnologija brzi peščani filtra opstaju opstaju u postrojenjima za pripremu vode za piće jer kvalitet vode dozvoljava da se završno bistrenje izvede ovom jednostavnom, jeftinom i veoma pouzdanom tehnikom. Za razliku od sporih filtra, brzi filtra nisu u stanju da iz izvorišta površinske vode proizvedu vodu bezbednu u bakteriološkom smislu i za pripremu vode za piće posebna dezinfekcija je neophodna.

U matematičkoj teoriji filtracije, mnogi autori su dali formule za određivanje koeficijenta filtracije λ . U tim izrazima λ nema odgovarajuću dimenziju [m^{-1}] već su oni empirijskog karaktera i različitih dimenzija zavisno od autora. Pored svih vrednosti matematičke teorije filtracije koja olakšava uvid i pomaže da se razume ovaj komplikovani proces matematičku teoriju filtracije treba prihvatiti sa određenom dozom reserve. Uprkos svim naporima teorije filtracije tariranje matematičkih modela zahtevaju obimna laboratorijska i terenska merenja, zbog čega nemaju veliku praktičnu primenu. Za pravilno projektovanje filtra veoma je važno bazirati se na praktičnom iskustvu sa postojećih postrojenja stečenih tokom više od jednog veka uspešnog korišćenja brzih peščanih filtra.

LITERATURA

- [1] Bajkin J., Vojinović-Miloradov M. (2009): Pregled najčešće korištenih postupaka prečišćavanja pijaće vode u Kanadi, *Vodoprivreda*, N^o 237-239, s.87-92
- [2] Busuladžić H. (2009): Konvencionalne metode prečišćavanja voda za piće, *Vodoprivreda*, N^o 237-239, s.61-67
- [3] Degremont G.: Tehnika prečišćavanja voda, Građevinska knjiga, Beograd, 1976.

- [4] Ives, K. J. Theory of filtration: special subject. International Water Supply Association, 1969.
- [5] Iwasaki T.: Some notes on sand filtration, *Journal (American Water Works Association)*, 1937.
- [6] Jovanović B. i drugi (2011): Uklanjanje arsena iz vode adsorpcijom na nekonvencionalnim materijalima, *Vodoprivreda*, N^o 252-254, s.127-150
- [7] Keinath T., Wanielista M: Mathematical modeling for water pollution control processes, Ann Arbor Science Publishers, 1975.
- [8] Lerk C.F.: The functioning of deep-bed filters part II: The filtration of flocculated suspensions, *Chemical Engineering Research and Design*, 1967.
- [9] Ljubisavljević D., Đukić A., Babić B.: Prečišćavanje otpadnih voda, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2004.
- [10] Ljubisavljević D. i V.Rajaković-Ognjanović (2012): Uklanjanje nitrata iz vode za piće primenom biološke denitrifikacije, *Vodoprivreda*, N^o 258-260, s.163-168
- [11] Maroudas A.: Particle Deposition in Granular Filter Media-2, *Filtration and Separation*, 1966.
- [12] Mintz D.M.: Modern theory of filtration, International Water Supply Association, 1966.
- [13] Polomčić D. i drugi (2012): Vodosnabdevanje i održivo upravljanje podzemnim vodnim resursima Srbije, *Vodoprivreda*, N^o 258-2260, s.225-232
- [14] Schroeder, Water and wastewater treatment, McGraw-Hill, 1977.
- [15] Toholj N. i drugi (2012): Pitka voda u sistemu vodosnabdevanja stanovištva Srbije, *Vodoprivreda*, N^o 258-260, s.241-246
- [16] Đorđević B. (2008): Realizacija razvoja vodoprivredne infrastrukture u skladu sa strategijom iz Prostornog plana Srbije, *Vodoprivreda*, N^o 234-236, s.215-226

MATHEMATICAL MODELING OF RAPID SAND FILTERS

by

Dejan LJUBISAVLJEVIĆ and Milko JONOVIĆ
Faculty of Civil Engineering, Belgrade

Summary

Rapid sand filters have been used successfully in drinking water treatment processes for more than a century and as a simple, inexpensive and highly reliable technique, they successfully resist new technologies. This paper describes the mechanism of filtration, with special emphasis on the dynamics of filtration and the mathematical theory of filtration. Moreover, it describes

the cleaning of the filter (backwashing), a frequent operation during the rapid filtration, it shows the types of system design for cleaning of rapid sand filters and gives the most important conclusions which the designer should keep in mind when designing these systems.

Key words: filtration, sand filters, water purification

Redigovano 25.11.2013.