



Рада Петровић¹

Прегледни стручни рад
DOI: 10.5937/VIK25077P

СПОРИ ПЕШЧАНИ ФИЛТРИ ЗА 21. ВЕК

Резиме: Хигијенски исправна вода за пиће остаје велики глобални изазов, посебно у руралним подручјима где, према УНИЦЕФ-у, живи 80% оних који немају приступ побољшаним системима водоснабдевања. Спори пешчани филтри (СПФ) идеално су решење за припрему воде за пиће у таквим областима. СПФ омогућавају уклањање суспендованих честица, растворених органских материја и других загађујућих материја, уклањајући тиме мутноћу, укус и мирис. Додатно, један од најважнијих аспеката примене СПФ је његова функција као биолошког филтра. Иако је принцип рада СПФ остао исти већ више од два века, дизајн, величина и примена СПФ су током година мењани и прилагођавани конкретним потребама. У овом раду разматрају се савремена решења и ефикасност СПФ по питању уклањања специфичних загађујућих материја, пре свега мутноће и микроорганизама, који су од посебног значаја за припрему воде за пиће у руралним областима.

Кључне речи: спори пешчани филтри, дизајн филтера, уклањање загађујућих материја, вода за пиће

SLOW SAND FILTERS FOR THE 21st CENTURY

Abstract: Safe drinking water remains a major global challenge, especially in rural areas where, according to UNICEF, 80% of those without access to improved water supply systems live. Slow sand filters (SPFs) are an ideal solution for preparing drinking water in such areas. SPFs allow the removal of suspended particles, dissolved organic matter, and other pollutants, thereby eliminating turbidity, taste, and odor. Additionally, one of the most important aspects of applying SPF is its function as a biological filter. Although the principle of SPFs operation has remained the same for more than two centuries, the design, size, and application of SPFs have been changed over the years and adapted to specific needs. This paper discusses modern solutions and the efficiency of SPFs in terms of removing specific pollutants, primarily turbidity and microorganisms, which are of particular importance for the preparation of drinking water in rural areas.

Key Words: slow sand filters, filter design, pollutant removal, drinking water

1. Увод

Спори пешчани филтри (СПФ) почели су да се примењују још почетком 19. века, а посебно када је средином 19. века утврђено да је узрочник колере загађена вода. Од тада је у Енглеској употреба СПФ била прописана законом за припрему воде из реке Темзе [1]. Почетком 20. века, СПФ губе на значају у поређењу са хемијским третманом, који је подразумевао коагулацију, флокулацију и таложење, уз накнадну примену брзих пешчаних филтара, који су заузимали мање места, при чему је било могуће

¹ Универзитет у Београду, Технолошко-металушки факултет, Карнегијева 4, Београд, radaab-@tmf.bg.ac.rs, ORCID: 0000-0001-9511-5633



успешно третирали воде различитог квалитета. Међутим, интересовање за СПФ се поново повећало 80-их година прошлог века, због повећане потребе за малим системима за припрему воде за пиће. Једноставна конструкција и управљање, мала потрошња енергије и могућност изградње коришћењем локалних сировина, без потребе за специјализованом опремом чине СПФ идеалним решењем за мале системе припреме воде. Агенција за заштиту животне средине Сједињених Америчких Држава (USEPA) и Светска здравствена организација (WHO) препознале су СПФ као јефтин и поуздан поступак обезбеђивања хигијенски исправне воде за пиће [2]. СПФ омогућавају уклањање суспендованих честица, растворених органских материја и других загађујућих материја, уклањајући тиме мутноћу, укус и мирис. Суспендоване органске материје задржавају се у испуни од песка, након чега се споро минерализују микроорганизмима који формирају биофилм на песку, па је биолошка функција један од најзначајнијих аспеката примене СПФ. Основни параметар рада којим се контролише квалитет третиране воде је хидрауличко време задржавања (hydraulic retention time, HRT), који је функција протока Q , укупне запремине слоја песка V и порозности n : $HRT = V \cdot n / Q$ [1, 2]. Да би се обезбедила велика специфична површина испуне за формирање слоја микроорганизама, а да се истовремено обезбеди и велика порозност, потребно је користити песак релативно велике униформности. Широка расподела величине честица доводи до смањења порозности, што онда доводи до смањења HRT. Према томе, два параметра која најбоље описују СПФ за потребе пројектовања и поређења су HRT и расподела величина песка, односно униформност песка.

2. Механизми уклањања загађујућих материја

Загађујуће материје се у СПФ уклањају и физичким и хемијским поступцима [1, 2]. Испуна од песка обезбеђује велику специфичну површину за формирање биофилма непатогених аеробних микроорганизама, које метаболишу органску материју која улази са водом у филтар. Ови микроорганизми се такође хране бактеријама и вирусима који улазе у филтер са улазном водом. Истовремено, физички механизми (механичко „просејавање“, таложење на честицама песка, „пресретање, флокулација и др) обезбеђују задржавање суспендованих честица у филтру. Уколико те честице садрже органске материје, временом ће бити разграђене биолошким поступцима. Уклањање честица одиграва се доминантно у слоју на врху испуне, док се растворене органске материје које као такве улазе у филтар или настају разградњом органских честица, минерализују у доњим деловима филтра. Поре у филтру су увек у потпуности испуњене водом, јер се изнад филтра увек налази слој воде, који је изложен ваздушном кисеонику. Захваљујући томе, након неколико недеља рада, у првих 2-5 cm филтра се формира биофилм аеробних микроорганизама, због веће брзине уклањања суспендованих честица унутар овог слоја. Захваљујући томе, много веће уклањање бактерија се одиграва у горњих 5 cm филтра него у остатку филтра, што је у складу са разноврснијом микробиолошком популацијом у овој зони. Наравно, ефикасност уклањања у горњем слоју зависи од стања развоја, тј. зрелости биофилма. Показано је да поремећај биофилма током чишћења филтра доводи до значајног смањења уклањања бактерија. Биолошки процеси који се одигравају у биофилму укључују предаторство, природну смрт, инактивацију, биоантагонизам и метаболичко распаѓање и минерализацију.



Предаторство се сматра примарним процесом уклањања и инактивације микробних патогена у СПФ: већи микроорганизми, попут протозоа, хране се мањим микроорганизмима и честицама, попут бактерија и вируса. Бактеријски антагонизам може се односити на инактивацију патогених микроорганизма од стране других организама једноставним надмашивањем патогена у погледу апсорпције хранљивих материја и раста, што у суштини резултира исцрпљивањем патогена. Доказано је да присуство природних бактерија у филтрима смањује садржај патогена у третираној води. Бактерије, као најзаступљенији микроорганизми у биофилму, су посебно значајне за минерализацију органске материје унутар биофилма. Нека истраживања су показала да је у биофилму заступљено више од 90% бактерија и да омогућавају разградњу ароматичних једињења, уклањање азота и чак, бар привремено, уклањање мангана и арсена из подземних вода. Веома је важно да вода која се обрађује у СПФ буде скоро засићена ваздушним кисеоником, јер би у супротном услови у филтру могли постати анаеробни због потрошње кисеоника за разградњу органских материја, услед чега би се добила вода непријатног мириса. То је и разлог зашто СПФ морају бити отворени према атмосфери [1, 2].

3. Карактеристике филтера

Перформансе СПФ се могу квантификовати на основу мерења неколико параметара, као нпр. мутноће, боје, укупног органског угљеника (ТОС), концентрације патогених бактерија, концентрације одређених органских загађујућих материја од локалног значаја итд. Ефикасност СПФ по питању ових параметара је одређена, пре свега, вредношћу HRT , величином честица песка и температуром (T), а за филтере са дефинисаним вредностима HRT , величине честица и T , ефикасност је одређена квалитетом воде која се обрађује и биолошком зрелошћу филтера [1, 2].

3.1. Дизајн филтера

СПФ се могу пројектовати и изводити за индивидуална домаћинства (1 - 10 људи), за школе и мале заједнице (10 – 1000 људи) или за мале општине (1000 – 5000 људи). За одређивање HRT се препоручује конструисање мале јединице (20 – 50 литара), имајући у виду локалне карактеристике вода које се третирају, при чему је потребно узети у обзир и утицај сезонског варирања температуре и других фактора на карактеристике воде. На основу одређене вредности HRT и предвиђене потрошње воде Q , узимајући претпостављену вредност порозности слоја песка ($n = 0,4$), одређује се запремина слоја V , након чега се могу конструисати шаржни или континуални СПФ различите геометрије, коришћењем различитих материјала за медијум и основу филтра. Дубина слоја испуне је најчешће 0,6 – 1 m, величина честица испуне 0,15 – 0,35 mm, коефицијент униформности 1,5 – 3, висина слоја воде изнад медијума 1-1,5 m, а брзина филтрације 0,1 – 0,4 m/h.

Под шаржним филтерима се подразумевају филтери са повременим коришћењем, односно филтери који раде са паузом, у којој се вода задржава у филтру, пре него што се дода нова количина воде. Дужина паузе је компромис између довољно дугог HRT за ефикасан третман и потребног снабдевања микроорганизма у слоју хранљивим материјама. Ови филтри се често називају биопешчани филтри (БПФ) и примењују се



у малим заједницама, школама и домаћинствима. Праве се од бетона или од пластике, при чему се у новије време више праве пластични, јер су јефтинији за градњу и лакши. Дизајн пластичних филтера је у неким случајевима модификован тако што су носећи слојеви шљунка замењени порозном пластичном плочом, што је омогућило повећање укупне запремине пора унутар активне зоне третмана, а смањени су и трошкови и рад потребан за инсталацију и одржавање. Примењиване су и друге модификације БПФ како би се прилагодили специфичним локалним захтевима. На пример, Kanchan Arsenic Filter (КАФ) је развијен за уклањање арсена, мангана и гвожђа из подземних вода додатком отпадних материјала, уситњене цигле и ексере од гвожђа, чиме је постигнуто значајно уклањање ових елемената, али и мутноће и колиформних бактерија. Преко 5000 ових филтера је распоређено у Непалу, где је након годину дана 83% било у употреби, што је приписано побољшаном изгледу, укусу и мирису филтриране воде [3].

3.1. Филтрациони медијум

Различити материјали се могу користити као филтрациони медијум, али је најзаступљенији песак. Карактеристике песка које утичу на ефикасност филтра су ефективна величина честица (D_{10}), коефицијент униформности (C_u), састав и чистоћа песка [1, 2]. Показано је да је величина честица песка најважнији параметар који утиче на уклањање патогена из воде и да смањење вредности D_{10} доводи до ефикаснијег уклањања бактерија и протозоа из воде. Већа униформност песка обезбеђује већу порозност, а тиме и већу вредност HRT за исти проток и запремину слоја. Максимална препоручена вредност C_u је 3,0. Показано је да је уклањање *Cryptosporidium* протозоа много веће (99 %) када је $C_u = 1,72$, у односу на песак са $C_u = 3,5 - 3,8$, када је уклањање било само 48 % за исту воду. Прање филтрационог медијума пре формирања филтра је такође од значаја. Модификације филтрационог медијума. Испитиван је утицај различитих додатака у филтрациони медијум, изнад и испод, као што су комадићи гвожђа или бакра, наночестице елементарног гвожђа, зеолити, бентонити, боксит и др. Могућност унапређења ефикасности применом додатака гвожђа је зависила од састава воде, врсте загађујуће материје која се уклања и састава самог додатка. На пример, додатак слоја честица песка које су обложене гвожђа(III)-оксидом, дебљине 10 cm, је побољшао уклањање бактерија, али не мутноће. Допатак бакра је побољшао бактерицидна својства филтра, али није утицао на уклањање ТОС и мутноће. Свакако је важно нагласити да се бакар и други биоцидни материјали морају додати при дну филтра, да не би довели до инактивације биомасе при врху филтра, која је одговорна за минерализацију органске материје. Допатак бентонита је такође довео до повећања степена уклањања бактерија, што је објашњено повећањем специфичне површине, а тиме и места за адхезију бактерија. Испитивана је и могућност уклањања арсена применом одговарајућих додатака, али се ипак саветује да се примењује „пост-СПФ“ за уклањање арсена, а не да се ти материјали додају у СПФ. Последњих година се испитују и материјали за ефикасно уклањање неких нових загађујућих материја (emerging contaminants), као што су остаци лекова [4]. Дубина филтрационог слоја. Препоручена дубина за велике филтре је генерално између 1,2 и 1,4 m, мада мали филтри за домаћинства могу да раде и при дубини мањој од 0,3 m. Препоручује се



минимална дубина од 0,3 m за ефикасно уклањање мутноће и колиформних бактерија, а 0,6 m за уклањање вируса. Међутим, треба нагласити да патогене бактерије и вируси не могу бити уклоњени у потпуности ни при овим дубинама филтерске испуне, па се препоручује пост-филтерска дезинфекција. Иако се већина органских материја и микроорганизама уклања у слоју при врху филтра, дубина филтра утиче и на ове параметре, вероватно због утицаја на *HRT*. Биолошка зрелост. Зрење филтра са временом значајно утиче на ефикасност уклањања микроорганизама и органских материја. Период сазревања СПФ варира од случаја до случаја (10 до 40 дана) и функција је квалитета улазне воде, *HRT* и конструкције филтера. Када се биолошки слој у филтеру „разруши“ прањем или услед ненамерног увођења микробиолошких токсина), неопходно је обновити биолошку популацију. У једном испитивању је показано да је за то било потребно 17 дана за $\log_{10}$ уклањање колиформних бактерија, док је у случају новог филтра за то било потребно 27 дана за исти ниво редукције [1]. Друго истраживање је показало да прање или замена филтрационог медијума доводе до смањења ефикасности уклањања бактерија од један $\log_{10}$. Стога, иако се учесталост чишћења често мери годинама, може се очекивати смањење перформанси током месеца непосредно након тога.

4. Услови рада СПФ

Као што је већ речено, ефикасност СПФ зависи од времена контакта воде и филтрационог медијума, *HRT*. Вредност *HRT* је кључна за разликовање брзих и спорих пешчаних филтера. Имајући у виду да је типична брзина филтрације код СПФ од 0,1 до 0,4 m/h, а дубина филтра 1 m и порозност 0,5, вредности *HRT* се крећу од 1,25 до 5 h. Међутим, с обзиром на висину слоја воде изнад филтрационог медијума од 1 до 1,5 m, стварна времена задржавања су од 2,5 до 12,5 h. За димензионисање СПФ је много логичније користити *HRT* него брзину филтрације, због тога што модерни СПФ имају различите дубине: у случају филтера за мала насеља дубине су од 0,7 до 1,2 m, док за индивидуална домаћинства могу бити и 0,2 m. Додатно, у случају филтера који раде са паузом, брзина филтрације нема значаја. Вредност *HRT* се може контролисати варирањем: а) протока у континуалним филтерима, б) времена додавања воде у случају шаржних филтера и ц) запремином и/или порозношћу филтрационог слоја. Генерално, са повећањем вредности *HRT*, повећава се ефикасност уклањања вируса, *cryptosporidium* цисти, мутноће, колиформних бактерија, боје и др. У случају шаржних филтера, смањивањем запремине воде која се додаје у филтер повећава се ефикасност уклањања загађујућих материја. Треба истаћи да је важно да додата запремина воде буде мања од запремине пора у филтру, јер ће у супротном део додате воде имати веома кратко задржавање, односно малу вредност *HRT*. Уобичајено се запремина додате воде подешава на 80 % од запремине пора у филтру. При томе се *HRT* подешава варирањем паузе између додавања воде у филтар. И код континуалних и код шаржних филтера је показано да се повећање ефикасности уклањања не може неограничено повећавати са повећањем *HRT*, што је у складу са сугестијом да је довољно време задржавања од 8 до 12 h, што се узима као оптимално при пројектовању филтера. На ефикасност СПФ утицај има и температура, пре свега због утицаја температуре на метаболизам микроорганизама. Показано је, на пример, да се ефикасност уклањања колиформних



бактерија смањује са 97 % на 87 % са снижењем температуре од 17 °C на 5 °C. Режим рада филтера има утицај на ефикасност, односно постоји разлика у ефикасности континуалних и шаржних СПФ при истој вредности *HRT*. Разлог томе је другачији начин распоређивања воде код шаржних поступака у односу на континуалне, јер ће део воде брзо проћи кроз површински слој у коме је највећа концентрација микроорганизама. Једноставна модификација шаржних филтера која може да допринесе побољшању ефикасности јесте уградња пумпе на изласку из филтра, која ће да рециркулише воду у филтар током паузе. На овај начин се повећава и ефективна вредност *HRT*, што је посебно од значаја при третману воде веће загађености. Квалитет воде која се обрађује има утицај на ефикасност СПФ по питању уклањања неких параметара, у опсегу одређених вредности. На пример, у једном истраживању је показано да повећање мутноће смањује ефикасност уклањања вируса, а у другом да повећање мутноће у опсегу од 10 до 50 NTU нема утицај на микробиолошки квалитет обрађене воде. Такође, утврђено је да повећање мутноће, укупних колиформних бактерија и фекалних колиформних бактерија нема утицај на ефикасност уклањања протозоа.

5. Закључак

Спори пешчани филтри се већ више од два века користе за припрему воде за пиће. Без обзира на велики напредак у развоју система за припрему воде за пиће, настављена је примена СПФ и у 21. веку, али превасходно у малим и средњим системима. Такође, СПФ се сада примењују у комбинацији са другим процесима обраде, посебно са накнадном дезинфекцијом, јер се не може гарантовати потпуно уклањање патогених микроорганизама. СПФ уклањају ефикасно многе микробиолошке, физичке и хемијске загађујуће материје из воде, при чему је уклањање мутноће и органских примеса од посебног значаја у случају када се примењује накнадна дезинфекција, да би се спречило настајање дезинфекционих нуспродуката. Да би се повећала ефикасност уклањања одређених загађујућих материја, предложен је додатак одређених материјала у филтерску испуну од песка, али се као ефикасније препоручује коришћење пост-СПФ филтера са тим материјалима. Посебан аспект истраживања у области примене спорих филтера у новије време је коришћење модификованих испуна за уклањање неких нових загађујућих материја (*emerging contaminants*).

6. Литература

- [1] J. K. Maiyo, S. Dasika, C. T. Jafvert, Division of Slow Sand Filters for the 21st Century: A Review, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 20, 2023, 1019.
- [2] K. Abdiyev, S. Azat, E. Kuldeyev, D. Ybyraiymkul, S. Kabdrakhmanova, R. Berndtsson, S. Sultakhan, Review of Slow Sand Filtration for Raw Water Treatment with Potential Application in Less-Developed Countries, *Water*, 15, 2023, 2007.
- [3] T.K.K. Ngai, R.R. Shrestha, B. Dangol, M. Maharjan, S.E. Murcott, Design for sustainable development—Household drinking water filter for arsenic and pathogen treatment in Nepal, *J. Environ. Sci. Health Part A-Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.* 42, 2007, 1879–1888.
- [4] J. Qi, C. Zhang, Y. Song, H. Yu, B. Ma, C. Hu, J. Qu, Prolonged operating cycle and enhanced removal of emerging contaminants in slow sand filters: Significance of algae-bacteria interaction, *J. Hazard. Mater.*, 496, 139470, 2025.