

Mokra polja kao potencijalno rešenje u procesu prečišćavanja otpadnih voda

Nikola Stanković

Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije“, Balkanska 13, 11 000 Beograd

Rezime - Mokra polja su inženjerski sistemi koji si koriste u procesu prečišćavanja otpadnih voda i unapređenju kvaliteta vode. Mokra polja su projektovani sistemi koji su izgrađeni da iskoriste prednosti procesa koji se dešavaju u prirodnim močvarama, uključujući vegetaciju, zemljište i prateću mikrobnu aktivnost za prečišćavanje otpadnih voda. Ovi sistemi se mogu koristiti kao deo decentralizovanih sistema za tretman otpadnih voda i mogu se koristiti za prečišćavanje različitih vrsta otpadnih voda. U radu su prikazani različiti tipovi mokrih polja, njihova primena, kriterijumu za dizajn i načini prečišćavanja otpadne vode. Ovi sistemi se koriste kao sekundarni proces tretmana što znači da se otpadna voda prečišćava u primarnom koraku prečišćavanja pre ulaska u filter mokrih polja. Postoje različite vrste mokrih polja, kao što su mokra polja sa površinskim kretanjem otpadne vode, mokra polja sa podzemnim kretanjem otpadne vode, gde voda može horizontalno i vertikalno da se kreće, kao i hibridni sistem koji je kombinacija prethodno dva navedena sistema. Korišćenje mokrih polja za prečišćavanje otpadnih voda postaje sve popularniji sistem u različitim delovima sveta, kao u razvijenim zemljama tako i u zemljama u razvoju.

Ključne reči - prečišćavanje otpadnih voda, tipovi mokrih polja, dizajn mokrih polja, procesi prečišćavanja otpadne vode

I UVOD

Voda je jedna od najvažnijih dobara ekosistema [1]. Pristup vodi je osnovno ljudsko pravo [2] i vitalni element za ostvarivanje drugih ljudskih prava. Danas postoji ogromna i neodrživa upotreba vode koja rezultira njenim prekomernim korišćenjem i visokim nivoom zagađenja. Zagađenje se javlja jer otpadne vode mogu sadržati mnoge vrste patogenih mikroorganizama, suspendovane čestice, organske i neorganske supstance koje mogu imati veliki uticaj na ljudsko zdravlje. Glavni uticaj na ljudsko zdravlje određen je prisustvom patogena koji uključuju bakterije, viruse, protozoe i parazitske crve (helminthe) koji mogu izazvati različite bolesti [3]. Mineralno zagađenje uključuje pesak, glinu, rastvorene mineralne soli, kiseline, baze itd. Organsko zagađenje može biti biljnog, ljudskog ili životinjskog porekla. Zagađenje u otpadnim vodama može se javiti u obliku rastvora, koloida i suspenzija. Stoga, hemijski i bakteriološki sastav otpadnih voda mora se kontrolisati i pratiti kako bi se obezbedilo javno zdravlje [4].

II TEHNOLOGIJE ZA PRERADU OTPADNE VODE

Konvencionalna obrada otpadnih voda uključuje fizičke, hemijske i biološke procese i operacije. Sastoje se od primarne,

sekundarne i tercijarne faze različitih stepena obrade otpadnih voda čija je funkcija uklanjanje čvrstih materija, organske materije i hranljivih materija iz otpadnih voda [5]. Ove tehnologije troše mnogo energije za svoj rad [1]. Nadalje, jedan od najvažnijih aspekata za poboljšanje kvaliteta vode je uklanjanje hranljivih materija što zahteva naprednu i skupu tehnologiju [6]. Tipična stopa uklanjanja za konvencionalne sisteme zagađivača je 80-90% za biohemijsku potrošnju kiseonika (BPK), 70-80% za suspendovane čestice, 20-30% za ukupni azot (TN) i manje od 20% za ukupni fosfor (TP) [7]. Ipak, čak i sa visoko efikasnim sistemom obrade, postoji gubitak od 20% azota, 5% fosfora i 90% kalijuma [8].

U slučaju alternativnih tehnologija, ističe se jedan od trenutnih predloga, a to je obrada otpadnih voda korišćenjem akvatičnih biljaka u posebno konstruisanim močvarama ili mokrim poljima. Ovo je biološka metoda obrade otpadnih voda koja se zasniva na složenom skupu sledećih elemenata: vode, supstrata, otpada, mikroorganizama i biljaka [9]. Sistem imitira prirodni proces prečišćavanja otpadnih voda koji postoji u prirodnim močvarama. To znači da su to konstruisane ekosistemske usluge koje su slične prirodnim ekosistemskim uslugama. Stoga, mokra polja predstavljaju sistem koji ima određene ekološke i ekonomske vrednosti. Ove vrednosti mogu biti izražene u obliku direktnih ili indirektnih vrednosti koje su konačno važne za ljudsko blagostanje. Nadalje, mokra polja pružaju vitalne dobra i usluge poput regulacije gasova, punjenja podzemnih voda, izlazne vode, one su stanište za raznolike vrste i imaju naučne i obrazovne vrednosti [10].

Dodatno, kao moguće rešenje za male i srednje zajednice, Vodič Evropske komisije (2001): "Procesi za obradu otpadnih voda prilagođeni malim i srednjim zajednicama (od 500 do 5000 ekvivalenata populacije)" predlaže sledeće tehnike za obradu otpadnih voda: Biološki filteri; Rotirajući biološki kontaktni sistemi (Biodiskovi); Aktivni mulj - Proširena aeracija; Infiltracija - perkolacija kroz pesak; Vertikalni filteri sa trskom; Horizontalni filteri sa trskom; Prirodne lagune (stabilizacioni bazeni); Lagune sa makrofitima; i Aerotankovi.

III MOKRA POLJA

Sistemi mokrih polja su dizajnirani da poboljšaju kvalitet vode. Prvobitno su razvijene kako bi se iskoristila i unapredila biodegradacijska sposobnost biljaka [11]. To su inženjerski sistemi koji su izgrađeni da iskoriste procese koji se odvijaju u prirodnim močvarama uključivanjem vegetacije, zemljišta i prateće mikrobiološke aktivnosti radi tretmana otpadnih voda [12]. Prvi eksperiment o mogućnosti korišćenja biljaka za

pročišćavanje vode u Evropi izveden je od strane Max-Planck Instituta 1950-ih godina pod vođstvom dr. Käthe Seidel [13]. U ovom radu opažena je obična rogozina (*Schoenoplectus lacustris*) i prepoznato je da ova vrsta može ukloniti organske i neorganske supstance iz zagađene vode [14].

Koncept metode korena razvijen je u Nemačkoj i bio je pionirski u sistemu prečišćavanja mokrih polja, proširio se po celoj Evropi tokom 1980-ih i 1990-ih [15]. Metoda korena sadrži ležište zasaden rogozinom (*Phragmites australis*) u laganoj glini ili teškom gornjem sloju zemljišta koji može sadržavati dodatke kalcijuma, gvožđa ili aluminijuma radi poboljšanja strukture zemljišta i sposobnosti uklanjanja fosfata [14].

Danas, metode mokrih polja široko su korišćene u Evropi, pretežno u Nemačkoj, Švedskoj, Danskoj, Italiji, Holandiji, Češkoj, Francuskoj, Sloveniji, Mađarskoj i drugim zemljama. U svakoj od ovih zemalja, Danskoj, Nemačkoj i Ujedinjenom Kraljevstvu, prisutno je oko 200 sistema mokrih polja sa podzemnim tokom, a broj ove tehnologije raste i širi se veoma brzo [14]. Kao biljka koristi se obična trska (*Phragmites australis*), ali se mogu naći i druge vrste močvarnog bilja [14]. Rad na mokrim poljima u Evropi uticao je na razvoj i pojavu ove tehnologije i u Sjedinjenim Američkim Državama. U Sjedinjenim Američkim Državama, uspostavljen je hibridni sistem za prečišćavanje otpadnih voda koristeći anaerobne mikroorganizme i trsku (*Phragmites communis*) [16]. Mokra polja sa slobodnim površinskim tokom razvijene su u nekim evropskim zemljama poput Švedske, Francuske i Mađarske. Dobar primer gde su močvare ponovo obnovljene radi poboljšanja kvaliteta vode može se naći u Mađarskoj [17]. Na drugom delu sveta, dve trećine ukupnog broja mokrih polja u Severnoj Americi su sistemi sa slobodnim površinskim tokom [18].

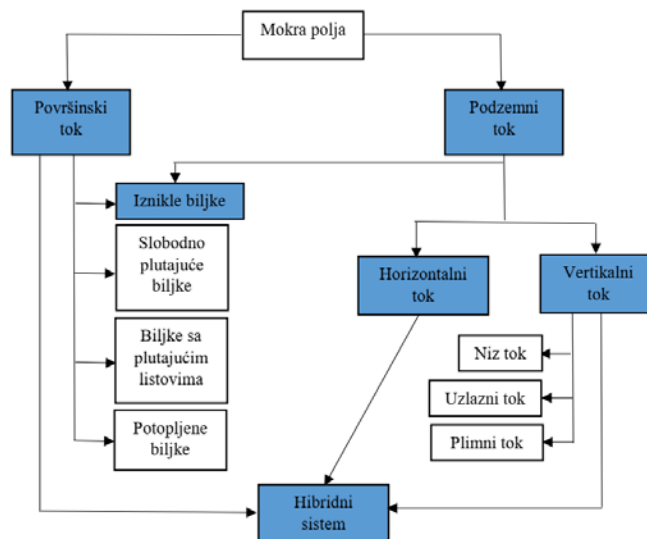
Mnoga mokra polja koriste se za prečišćavanje otpadnih voda domaćinstava gde biohemijska i hemijska potrošnja kiseonika predstavljaju indikatore za organsku materiju. Nadalje, ovaj sistem može se koristiti za uklanjanje specifičnih organskih jedinjenja, azota, fosfora, za smanjenje koncentracije teških metala, organskih hemikalija i patogena [19]. Dakle, primenljivost mokrih polja je široka, a jedino pitanje koje je važno je njihova efikasnost u prečišćavanju otpadnih voda. Takođe, danas postoje različite vrste mokrih polja, a njihova primena može biti upitna u smislu toga koja vrsta mokrih polja je najprikladnija za određene otpadne vode.

Trenutno postoje nekoliko vrsta konstruisanih močvara koje se koriste za obradu otpadnih voda (Slika 1). Mokra polja mogu se klasifikovati prema obliku života dominantne makrofite [20]:

- makrofite slobodno plutajuće,
- potopljene makrofite,
- korenovane emergentne makrofite.

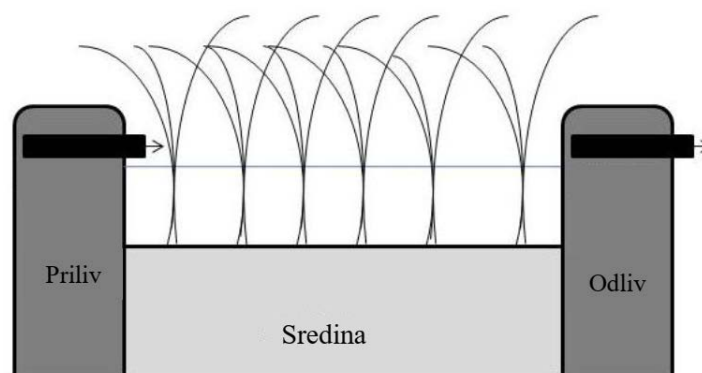
Unutar sistema sa slobodno plutajućim makrofitima prepoznate su dve pristupne strategije kao što su sistemi na temelju vodenih hijacinta i lemeša [21]. Biljke vodenih hijacinta poznate su po visokoj produktivnosti i stoga se koriste za tretman otpadnih voda. Druga klasifikacija konstruisanih močvara vrši se na osnovu hidrologije močvara [22]. Stoga razlikuju se mokra polja sa slobodnim površinskim tokom i sistemi sa podzemnim tokom.

U sistemu sa podzemnim tokom postoje horizontalni tokovi, a zbog značajne potrebe za uklanjanjem amonijaka započeo je razvoj i upotreba vertikalnih mokrih polja [23]. Postoje i hibridna mokra polja koje su obično kombinacija horizontalnog i vertikalnog toka. Ovi sistemi se koriste kako bi se postigao bolji efekat tretmana.



Slika 1. Klasifikacija mokrih polja (izmenjena prema [24]).

I pored predrasuda o mokrim poljima sa slobodnom površinskim tokom da imaju lošu efikasnost tokom hladnih perioda, mnoge su izgrađene širom sveta (Slika 2). Prvo mokro polje sa slobodnom površinskim tokom izgrađeno je u Holandiji 1967. godine [23]. Ovaj sistem se koristi u Mađarskoj za tretman otpadnih voda [25]. Ovaj sistem se takođe često koristi u Severnoj Americi [26]. Obično mokra polja sa slobodnim površinskim tokom i emergentnim makrofitima sastoje se od plitkog zatvorenog bazena ili skupa bazena koji sadrže 20-30 cm korenskog zemljišta, sa dubinom vode od 20-40 cm i guste izdignute vegetacije koja pokriva više od 50% površine [23].



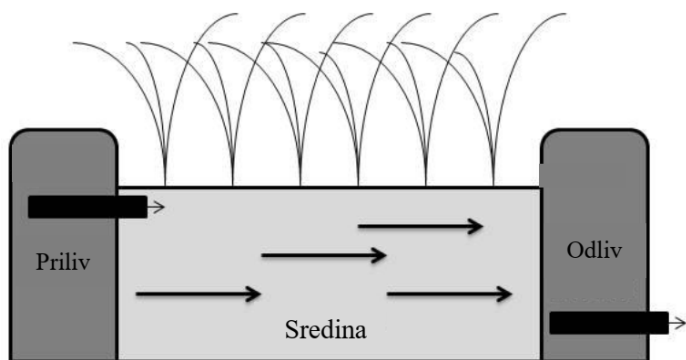
Slika 2. Šematski prikaz emergentnog sistema tretmana zasnovanog na makrofitima: sistem sa površinskim tokom

U Evropi se generalno koriste vrste za mokra polja sa slobodnim površinskim tokom kao što su: *Phragmites australis* (obična trska), *Scirpus lacustris*; u Severnoj Americi: *Typha spp.* (trska), *Scirpus spp.*, *Sagittaria latifolia*; Novi Zeland i Australija:

Phragmites australis, *Typha* spp., *Bolboschoenus* (*Scirpus*) *fluviatilis*, *Eleocharis sphacelata*, *Scirpus tubernaemontani* (*Scirpus validus*, mekostabljika) [23]. Mokra polja sa slobodnim površinskim tokom imaju dobru efikasnost uklanjanja nekih zagađivača. Organske materije uklanjaju se putem mikrobiološke aktivnosti, a ovaj proces određen je ravnotežom između snabdevanja kiseonikom i opterećenjem ugljenikom [27]. Azot se uklanja procesima nitrifikacije i denitrifikacije [23]. Postoje aerobne zone unutar mokrih polja sa slobodnim površinskim tokom koje su blizu površine zbog atmosferske difuzije i anoksične ili anaerobne zone blizu sedimenta. U aerobnim zonama amonijak se oksidiše nitrifikacionim bakterijama, dok se u anoksičnim zonama nitrat pretvara u slobodni azot ili azotni oksid denitrifikacionim bakterijama. Uklanjanje fosfora u mokrim poljima sa površinskim tokom vrši se procesima adsorpcije, apsorpcije i precipitacije [23]. Ipak, uklanjanje fosfora obično je nisko zbog ograničenog kontakta između otpadnih voda i čestica zemljišta koje apsorbuju ili precipitiraju fosfor [22]. Osim toga, precipitacija sa Al, Ca i Fe jonima je ograničena zbog manjeg kontakta između vodenog stuba i zemljišta [26].

Mokra polja sa podzemnim tokom dizajnirane su da omoguće otpadnim vodama da teku ispod površine kroz supstrat. Supstrat kroz koje otpadne vode prolaze obično je napravljeno od šljunka ili zemlje [14]. Dubina supstrata obično je između 0,6 i 1,0 m, a dno supstrata je nagnuto kako bi se izbeglo preliivanje vodene struje [19]. Postoje dva osnovna tipa mokrih polja sa podzemnim tokom: horizontalna i vertikalna mokra polja [9]. Otpadne vode gravitaciono teku, horizontalno ili vertikalno, kroz supstrat koja sadrži i omogućava kontakt sa mikroorganizmima koji žive u vezi sa podlogom i korenjem biljaka [19].

U horizontalnim mokrim poljima sa podzemnim tokom, otpadne vode imaju više ili manje horizontalnu putanju i kreću se od ulaznog dela kroz porozni medijum ili filtracionu podlogu ispod površine do izlaznog dela gde se sakupljaju pre izlaska iz bazena (Slika 3). Tokom ovog procesa, otpadne vode su izložene mreži aerobnih, anaerobnih i anoksičnih zona gde se odvijaju glavni mehanizmi uklanjanja zagađivača i gde se zagađenje uklanja putem mikrobiološke degradacije i drugih hemijskih i fizičkih procesa [28]. Očekuje se visok efekat tretmana otpadne vode za ove sisteme ako je površina trske 3-5 m² ekvivalenta populacije [15].

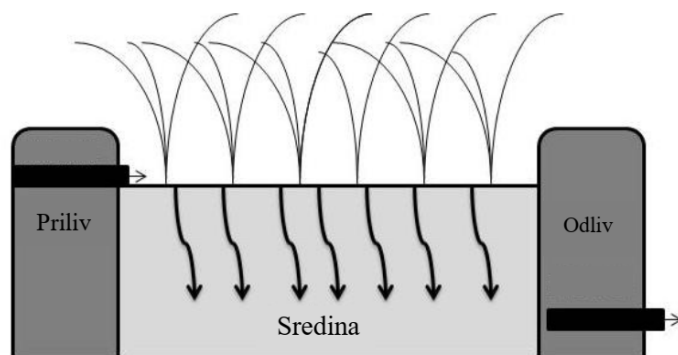


Slika 3. Šematski prikaz emergentnog sistema tretmana zasnovanog na makrofitima: sistem sa horizontalnim podzemnim tokom

Horizontalna mokra polja sa podzemnim tokom uglavnom su korišćeni za tretman komunalnih ili gradskih otpadnih voda, ali je njihova upotreba proširena na tretman poljoprivrednih, industrijskih otpadnih voda, ili otpadnih voda sa deponija [23]. U horizontalnim mokrim poljima često se koristi obična trska (*Phragmites australis*) kao biljka, ali se koriste i druge biljke kao što su *Phragmites arundinacea*, *Glyceria maxima* i *Typha* spp. [27]. Iako su neki eksperimentalni radovi pokazali da ovaj sistem ima određena ograničenja, oni predstavljaju najčešće korišćeni sistem za tretman otpadnih voda širom sveta [24].

Mokra polja sa podzemnim vertikalnim tokom zahtevaju manje prostora i imaju veću efikasnost u tretmanu otpadnih voda u poređenju sa horizontalnim tokom [29]. Ovaj sistem obično se primenjuje kao biološka faza (sekundarni tretman), a njegova efikasnost zavisi od faze prethodnog tretmana [21]. Ipak, postoje primeri gde se ovaj sistem koristi za tercijarni tretman, i efikasnost uklanjanja amonijaka bila je između 40-90% [30].

Mokra polja sa podzemnim vertikalnim tokom predstavljaju ravnu površinu poslaganog šljunka i peska koji je zasađen makrofitima (Slika 4). Obično je veličina šljunka veća u donjem sloju (30-60 mm) i manja u gornjem sloju (6 mm) [24]. Da bi se izbeglo zapušavanje sistema, veoma je važno pravilno odabrati materijal za filtraciju, hidrauličku opterećenost i ravnomerno raspodeliti otpadnu vodu po površini sistema [31].

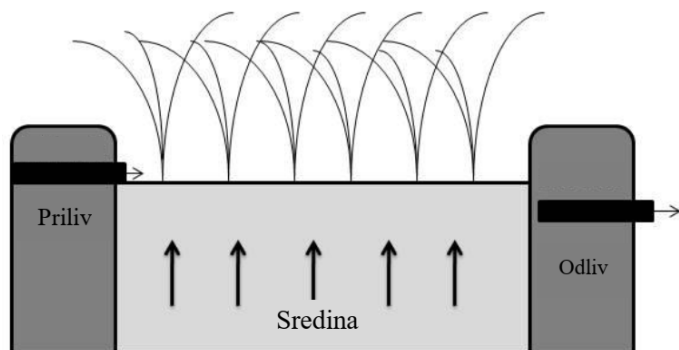


Slika 4. Šematski prikaz emergentnog sistema sa vertikalnim podzemnim tokom vode

U ovom sistemu, otpadne vode periodično se pumpaju na površinu, a zatim prolaze naniže kroz sloj filtera ka odvodnom delu [23]. Najvažniji faktori koji se moraju uzeti u obzir pri dizajniranju ovog sistema odnose se na filter sistem koji mora biti napravljen na način da omogući prodiranje otpadne vode kroz medijum pre dolaska naredne doze, a istovremeno mora zadržati dovoljno otpadne vode kako bi obezbedio kontakt sa rastućim bakterijama radi postizanja potrebnog tretmana [32]. Dakle, otpadne vode se intermitentno dovode u serijama, i tek nakon što sva voda prođe kroz krevet, nova serija može biti napunjena vodom. Ovo omogućava difuziju kiseonika u aerobnijim uslovima i kao rezultat bolji proces nitrifikacije [22]. Još jedan faktor koji se mora uzeti u obzir kako bi se postigle efikasne performanse i dobar dizajn je dovoljna površina koja mora omogućiti transfer kiseonika i adekvatan rast bakterija [32]. U poređenju sa horizontalnim sistemima, ovaj sistem zahteva manje zemljišta, obično 1-3 m² ekvivalenta populacije [22]. Pokazano je da vertikalni sistemi, u skladu sa zakonodavstvom u

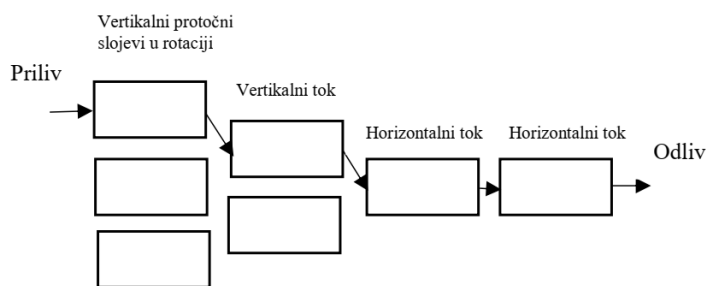
različitim zemljama, mogu zadovoljiti stroge zahteve za izlazne vode [21]. Ipak, neka iskustva pokazuju da njihova efikasnost zavisi od procesa prethodnog tretmana kao što su taložni rezervoar ili septička jama [21].

U Brazilu su korišćene mokra polja sa vertikalnim tokom usmerenim naviše za tretman komunalnih i industrijskih otpadnih voda (Slika 5). Ovaj sistem u Brazilu naziva se "filtrirajuće zemljište" i proučavan je u Švedskoj, Australiji i Novom Zelandu [24]. Hidraulika vertikalnog toka naviše može se kombinovati sa sistemom perkolacije naniže sa ciljem recikliranja hranljivih materija za poljoprivrednu upotrebu ili ishranu životinja [33].



Slika 5. Šematski prikaz mokrih polja sa vertikalnim uzlaznim tokom

Kako bi se poboljšale performanse mokrih polja, dizajniran je hibridni sistem. Različiti tipovi mokrih polja mogu se kombinovati kako bi se poboljšala efikasnost prečišćavanja otpadnih voda u slučaju uklanjanja azota ili fosfora. Međutim, najčešće, hibridni sistem se sastoji od sistema horizontalnog i vertikalnog toka. U ovom hibridnom sistemu, nekoliko mokrih polja sa podzemnim horizontalnim i vertikalnim tokom radi u seriji, što poboljšava procese prečišćavanja otpadne vode [22]. Vertikalne faze toka obično su zasađene *Phragmites australis*, dok horizontalne faze toka sadrže druge vrste emergentnih makrofitnih biljaka kao što su *Iris*, *Schoenoplectus*, *Sparganium*, *Carex*, *Typha* i *Acorus* [21].



Slika 6. Hibridni sistem sa vertikalnim tokom praćen horizontalnim tokom, zasnovan na konceptima Seidela

Prvi hibridni sistem sastojao se od nekoliko mokrih polja postavljenih paralelno ili u kaskade vertikalnih faza toka, koje su sledile dve ili tri horizontalne faze toka u seriji. Nazvan je Seidel sistem (Slika 6) [21]. U ovom sistemu su iskorišćene prednosti horizontalnih i vertikalnih sistema toka kako bi se obezbedila

efektivna izlazna voda sa niskim biodegradabilnim zahtevom za kiseonikom i konačno sa niskim sadržajem azota [15].

Zbog toga postoji sve veći interes za korišćenje i testiranje ovakvog sistema za tretman otpadnih voda. Ovaj sistem je implementiran u Italiji, Sloveniji, Francuskoj, Nemačkoj, Austriji, Norveškoj, Danskoj, Poljskoj i Irskoj. Osim komunalnih otpadnih voda, ovaj sistem se koristi za tretman raznovrsnih otpadnih voda sa deponija, klanica, uzgoja škampa i ribe i vinarija [22]. U Danskoj je izgrađena dvostepena sistem koji je imao mehanički pretretman, horizontalni podzemni tok za denitrifikaciju, biološko uklanjanje kiseonika i suspendovanih čestica i vertikalni tok za nitrifikaciju. Ovaj sistem takođe primenjuje recikliranje nitrifikovane izlazne vode iz vertikalnog toka na krajnji deo horizontalnog sistema gde denitrifikacija može da se odvija u manje aerobnim uslovima kako bi se uklonio azot (Slika 7) [34].



Slika 7. Hibridni sistem zasnovan na konceptu Briksa i Johansena

IV PRIMENA MOKRIH POLJA

Pretežno, mokra polja se koriste za tretman komunalnih i industrijskih otpadnih voda. Nedavno je njihova upotreba proširena na prečišćavanje poljoprivrednih, industrijskih otpadnih voda, gradskih atmosferskih voda, različitih otpadnih voda sa deponija [26]. Takođe, vrste otpadnih voda koje se mogu tretirati u mokrim poljima variraju od sirove do sekundarne otpadne vode [35]. Mokra polja koja se koriste za tretman svih ovih otpadnih voda i drugih izvora zagađene vode pokazuju veliko obećanje zbog velike mogućnosti kontrole procesa i manje šanse za izazivanje nepovoljnih ekoloških efekata [35]. U slučaju tretmana komunalnih otpadnih voda, mokra polja se koriste kao glavna ili treća faza [36]. Za tercijarni tretman mogu se koristiti i površinski i podzemni sistemi mokrih polja.

Mokra polja sa slobodnim površinskim tokom sa emergentnom vegetacijom, osim za tretman komunalnih otpadnih voda, imaju primenu i za druge otpadne vode poput stajnjaka, oticaja sa pašnjaka, poljoprivredne drenaže, atmosferskih oticaja, otpadnih voda iz rudnika, rafinerija, fabrika papira i celuloze, uzgoja škampa, deponija, fabrika šećera, otpadnih voda drvne i metalurške industrije [22].

Oba tipa podzemnih mokrih polja, horizontalni i vertikalni, imaju primenu u tretmanu komunalnih i industrijskih otpadnih voda, ali se njihova upotreba proširila i na druge vrste otpadnih voda poput industrijskih, poljoprivrednih, deponijskih, otpadnih voda

rafinerija, različitih oticaja, otpadnih voda iz proizvodnje mleka i sira [22]. Kao glavna faza tretmana, podzemna mokra polja sa horizontalnim ili vertikalnim tokom primenjuju se u zavisnosti od željenog kvaliteta izlazne ili prečišćene vode [36]. Ako je potrebna niska koncentracija amonijaka u izlaznoj vodi, tada vertikalna mokra polja sa dovoljnim snabdevanjem kiseonikom i periodičnim punjenjem mogu obezbediti dobru nitrifikaciju i dobre performanse prečišćavanja [36]. Vertikalna mokra polja obično se koriste za tretman otpadnih voda gde su postavljeni limiti za azot [22].

U slučaju hibridnih mokrih polja, različiti tipovi mokrih polja mogu se koristiti kako bi se poboljšale karakteristike prečišćavanja otpadne vode. Ipak, ova kombinacija se obično vrši kako bi se poboljšalo uklanjanje azota. Za različite vrste otpadnih voda primenjene su različite kombinacije mokrih polja. Primeri su vertikalni (VF) i horizontalni tok (HF) koji se koriste za tretman komunalnih otpadnih voda u kombinaciji VF-HF ili HF-VF. Osim toga, ove kombinacije (VF-HF/HF-VF) mogu se koristiti za tretman otpadnih voda kao što su procedne otpadne vode sa deponija, otpadne vode iz bolnica, otpadne vode mlekara i farmi svinja [23]. Takođe, prijavljene su i druge kombinacije mokrih polja sa slobodnim površinskim tokom vode i horizontalnog toka, kao i vertikalni tok u kombinaciji sa horizontalnim i slobodnim površinskim tokom vode.

Dodatno, industrijske otpadne vode poput rudarskih i metalurgijskih otpadnih voda, otpadne vode od naftne industrije, otpadnih voda od obrade metala, specifičnih organskih jedinjenja proizvedenih od strane vojske kao što su hlorisani ugljovodonici, aromatična organska jedinjenja, cijanidi, surfaktanti, rastvarači, antifrizi, pesticidi, trihloretilen mogu se ukloniti ili prečistiti sistemom mokrih polja [36].

V ŽIVOTNI VEK MOKRIH POLJA I ZAKLJUČAK

Imajući u vidu da su mokra polja kompleksni sistemi koji obuhvataju biološke, hemijske i hidrološke procese, to dovodi do pretpostavke da održivost ovih sistema ili dugoročna efikasnost može biti upitna. Životni vek mokrih polja može biti važan prilikom upoređivanja ovih sistema sa konkurentnim ili sličnim tehnologijama. Efikasnost mokrih polja zavisi od različitih faktora. Ti faktori takođe utiču na životni vek mokrih polja. Dizajn i konstrukcija mokrih polja su jedan od ključnih faktora koji utiču na buduće upravljanje i održavanje sistema. Stoga, funkcionalna očekivana starost treba da bude uključena u parametre dizajna. U nekim tipovima mokrih polja mogu se desiti procesi poput zapušnja ili nagomilavanja čvrstih materija i nagomilavanja mrtvog biljnog materijala, što može smanjiti kapacitet mokrih polja. Dugovečnost mokrih polja zavisi od različitih faktora kao što su hidrauličko opterećenje, vreme zadržavanja otpadne vode, rast biofilma, opterećenja i koncentracija različitih zagađivača poput fosfora [37]. Kao rezultat, efikasnost uklanjanja različitih zagađivača može opasti, što na kraju dovodi do loših performansi. U tom smislu je neophodno ponovo izgraditi sistem ili promeniti neke ključne komponente mokrih polja. Podmlađivanje mokrih polja može se postići čišćenjem filtera od mulja, blata i ponovnom vegetacijom [38]. U slučaju tretmana otpadne vode opterećena organskim zagađenjem, životni vek mokrih polja pokazan je otprilike 20

godina [11]. Dugovečnost mokrih polja može se odrediti kapacitetom uklanjanja medija ili materijala koji se koriste. U slučaju uklanjanja nutrijenata, potencijal zasićenja mokrih polja može uticati na njihov životni vek. Proces uklanjanja fosfora je ograničen filtera medija i stoga je potrebno zameniti ili oprati supstrat [39]. Stoga se supstrat može odabrati prema njihovom kapacitetu zadržavanja fosfora i time uticati na dugovečnost mokrih polja. Zavisno od dizajna i tipa otpadne vode koja se tretira, dugovečnost supstrata može se predvideti između 7-20 godina [39]. Ipak, postoje različiti materijali koji se mogu koristiti za uklanjanje fosfora i to može na kraju uticati na životni vek mokrih polja.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Ahmed, M. T. Life Cycle Analysis in Wastewater: A Sustainability Perspective, in: Barcelo, D., Petrovic, M. (Eds.), *Waste Water Treatment and reuse in the Mediterranean Region. The Handbook of Environmental Chemistry*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 125-154. 2011. <https://doi.org/10.1007/978-2010-75>
- [2] Scanlon, J., Cassar, A., Nemes, N. Water as a human right? IUCN Environmental policy and law paper, No. 51, 2008. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2005.EPLP.51.en>
- [3] Drinan, J.E. *Water and wastewater treatment – a guide for the nonengineering professional*, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida. 2001.
- [4] Ellis, T.G. Chemistry of wastewater, in: *Environmental and ecological chemistry*, Vol. 2, pp. 327-350, (EOLSS) Publications, 2004.
- [5] Pescod, M.B. *Wastewater treatment and use in agriculture-FAO irrigation and drainage, paper 47*, Food and agriculture organization of the United Nations, Rome. 1992. <https://www.fao.org/4/T0551E/t0551e00.htm> [pristupljeno 28.01.2024]
- [6] Carey, R.O., Migliaccio, K.W. Contribution of wastewater treatment plant effluents to nutrient dynamics in aquatic systems: a review, *Environmental Management*, Vol. 44, pp. 205-217, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9309-5>
- [7] Lee, C., Fletcher, T.D., Sun, G. Nitrogen removal in constructed wetland systems, *Engineering in Life Sciences*, Vol. 9, No. 1, pp. 11-22, 2009. <https://doi.org/10.1002/elsc.200800049>
- [8] Gajurel, D.R., Li, Z., Oterpohl, R. Investigation of the effectiveness of source control sanitation concepts including pre-treatment with Rottebehalter, *Water Science and Technology*, Vol. 48, No. 1, pp. 111-118, 2003. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12926627/> [pristupljeno 02.02.2024]
- [9] Davis, L. *Handbook of constructed wetlands - a guide to creating wetlands for: agricultural waste water, domestic waste water, coal mine drainage, storm water in the Mid-Atlantic region*, Vol. 2, Natural Resources Conservation Service and the US Environmental Protection Agency, 1995.
- [10] Yang, W., Chang, J., Xu, B., Peng, C., Ge, Y. Ecosystem service value assessment for constructed wetlands: a case study in Hangzhou, China, *Ecological Economics*, Vol. 68, No. 1-2, pp. 116-125, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.02.008>
- [11] Shutes, R.B.E. Artificial wetlands and water quality improvement, *Environment International*, Vol. 26, No. 5-6, pp. 441-447, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00025-3](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00025-3)
- [12] Vymazal, J. Removal of nutrients of various types of constructed wetlands, *Science of the Total Environment*, Vol. 380, No. 1-3, pp. 48-65, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- [13] Vymazal, J. Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience, *Environmental Science and Technology*, Vol. 45, No. 1, pp. 61-69, 2011. <https://doi.org/10.1021/es101403q>
- [14] Brix, H. Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives, *Water Science and Technology*, Vol. 30, No. 8, pp. 209-223, 1994. <https://doi.org/10.2166/wst.1994.0413>
- [15] Wolverton, B.C. Hybrid wastewater treatment system using anaerobic microorganism and reed (*Phragmites communis*), *Economic Botany*, Vol. 36, No. 4, pp. 373-380. 1982. <https://doi.org/10.1007/BF02862693>
- [16] Brix, H., Schierup, H.H. The use of aquatic macrophytes in water-pollution control, *Ambio*, Vol. 18, No.2, pp. 100-107, 1989.

- [17] Knight, R.L., Ruble, R.W., Kadlec, R.H., Reed, S. Wetlands for wastewater treatment: Performance database, in: Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed wetlands for water quality improvement*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp: 35-58. 1993. <http://dx.doi.org/10.1201/9781003069997-5>
- [18] Haberl, R., Grego, S., Langergraber, G., Kadlec, R.H., Cicalini, A.R., Dias, S.M., Novais J.M., Aubert, J., Gerth, A., Hartmut, T., Hebner, A. Constructed Wetlands for the Treatment of Organic Pollutants, *Journal Solis and Sediments*, Vol. 3, No. 2, pp. 109-124, 2003. <https://doi.org/10.1007/BF02991077>
- [19] Brix, H. Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance, in: Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed Wetland for Water Quality Improvement*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp. 9-22. 1993. <http://dx.doi.org/10.1201/9781003069997-3>
- [20] Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Haberl, R., Perfler R., Laber J. Removal mechanisms and types of constructed wetlands, in: Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Green, M.B., Haberl, R., *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Backhuys Publishers, Leiden, pp. 17-66, 1998.
- [21] Vymazal, J. Constructed wetlands for wastewater treatment, *Water Open Access*, Vol. 2, No. 3, pp. 530-549, 2010. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- [22] Vymazal, J. Constructed wetlands for wastewater treatment: a review, in *Proc. 12th World Lake Conference (Taal 2007)*, Jaipur, Rajasthan, India, pp. 965-980, 28 October - 2 November, 2007.
- [23] Vymazal, J., Kröpfelova, L. *Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow*, Springer Science & Business Media, 2008.
- [24] Lakatos, G., Kiss, M. K., Kiss, M., Juhász, P. Application of constructed wetlands for wastewater treatment in Hungary, *Water Science and Technology*, Vol. 35, No. 5, pp. 331-336, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00087-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00087-5)
- [25] Kadlec, R.H., Knight, R.I. *Treatment wetlands*, CRC Press, Lewis Publishers. Boca Raton, Florida, 1996.
- [26] Kadlec, R.H., Knight, R. H., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., Haberl R. *Constructed wetlands for pollution control: processes, performance, design and operation, Scientific and technical Report No. 8*, IWA Publishing, London, 2000. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/30978> [pristupljeno 10.02.2024]
- [27] Vymazal, J. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of waste water, *Ecological Engineering*, Vol. 35, No. 1, pp. 1-17, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.08.016>
- [28] Vymazal, J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment, *Ecological engineering*, Vol. 25, pp. 478-490, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.010>
- [29] Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M., Muench von, E. *Technology review of constructed wetlands: Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH (GTZ), Eschborn, 2011. <https://www.susana.org/resources/documents/default/2-930-giz2011-en-technology-review-constructed-wetlands.pdf> [pristupljeno 11.02.2024]
- [30] Schönerklee, M., Koch, F., Perfler, R., Laber, J. Tertiary treatment in a vertical flow reed bed system: a full scale pilot plant for 200-600 p.e., *Water Science and Technology*, Vol. 35, No. 5, pp. 223-230, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00072-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00072-3)
- [31] Lianfang, Z., Wei, Z., Wei, T. Clogging processes caused by biofilm growth and organic particle accumulation in lab-scale vertical flow constructed wetlands, *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 21, No. 6, pp. 750-757, 2009. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62336-0](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62336-0)
- [32] Cooper, P. The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates, *Water science and Technology*, Vol. 51, No. 9, pp. 81-90, 2005. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0293>
- [33] Farahbakhshazad, N., Morrison, G.M., Filho, E.S. Nutrient removal in a vertical upflow wetland in Piracicaba, Brazil, *A Journal of the Human Environment*, Vol. 29, No. 2, pp. 74-77, 2000. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-29.2.74>
- [34] Brix, H., Johansen, N-H. Treatment of domestic sewage in a two-stage constructed wetland - design principles, in: Vymazal, J. (Ed.), *Nutrient cycling and retention in natural and constructed wetlands*, Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands, pp. 155-163, 1999.
- [35] Bastian, R. K., Shanaghan, P. E., Thompson, B. P. Use of wetlands for municipal wastewater treatment and disposal- regulatory issues and EPA policies, in: Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed wetlands for water quality improvement*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp. 265-278, 1989. <http://dx.doi.org/10.1201/9781003069850-26>
- [36] Haberl, R., Grego, S., Langergraber, G., Kadlec, R.H., Cicalini, A-R., Dias, S. M., Novais J. M., Aubert, J., Gerth, A., Hartmut, T., Hebner, A. Constructed Wetlands for the Treatment of Organic Pollutants, *Journal Solis and Sediments*, Vol. 3, No. 2, pp. 109-124, 2003. <https://doi.org/10.1007/BF02991077>
- [37] Arias, C.A., Brix, H. Phosphorus removal in constructed wetlands: can suitable alternative media be identified?, *Water Science and Technology*, Vol. 51, No. 9, pp. 267-273, 2005. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0335>
- [38] Miller, B.K., MacGowan, B.J., Reaves, R.P. Are constructed wetlands a viable option for your waste management system? *Historical Documents of the Purdue Cooperative Extension*, Paper 1044, Purdue University, USA, 2015. <https://docs.lib.purdue.edu/agext/1044> [pristupljeno 13.02.2024]
- [39] Drizo, A., Comeau, Y., Forget, C., Chapuis, R.P. Phosphorus saturation potential: a parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems, *Environmental Science and Technology*, Vol. 36, No. 21, pp. 4642-4648, 2002. <https://doi.org/10.1021/es011502v>

AUTORI/AUTHORS

msr Nikola Stanković – vodeći inženjer za zaštitu životne sredine za TE i TE-TO, Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije“, stankovic.nikola@eps.rs, ORCID [0000-0002-8053-4488](https://orcid.org/0000-0002-8053-4488)

Constructed Wetlands as a Potential Solution in the Wastewater Treatment Process

Abstract – Constructed wetlands are engineering systems that are used in the process of purifying waste water and improving water quality. Wetlands are engineered systems that are built to take advantage of the processes that occur in natural wetlands, including vegetation, soil, and associated microbial activity to treat wastewater. These systems can be used as part of decentralized wastewater treatment systems and can be used to treat different types of wastewater. The paper presents different types of wet fields, their application, design criteria and methods of wastewater treatment. These systems are used as a secondary treatment process meaning that the wastewater is treated in a primary treatment step before entering the wet field filter. There are different types of wet fields, such as wet fields with surface movement of wastewater, wet fields with underground movement of wastewater, where water can move horizontally and vertically, as well as a hybrid system that is a combination of the previously mentioned two systems. The use of wet fields for wastewater treatment is becoming an increasingly popular system in various parts of the world, both in developed and developing countries.

Index Terms – Wastewater treatment, Types of wetlands, Design of wetlands, Wastewater treatment processes