

Izvorni znanstveni članak (Original scientific paper) | UDK: 628.35
 Primljeno (Received): 22.04.2025.; Prihvaćeno (Accepted): 27.06.2025.

OPORABA VISOKO KONCENTRIRANOG RO KONCENTRATA (50 %) IZ OTPADNIH VODA TEKSTILNE INDUSTRIJE ZA UZGOJ BOSILJKA

Iva Ćurić, mag. ing. cheming.
 Sveučilište u Zagrebu, Fakultet
 kemijskog inženjerstva i
 tehnologije
 Trg Marka Marulića 19, Zagreb,
 Hrvatska
icuric@fkit.unizg.hr

Fran Hrlić, mag. ing. cheming.
 Sveučilište u Zagrebu, Fakultet
 kemijskog inženjerstva i
 tehnologije
 Trg Marka Marulića 19, Zagreb,
 Hrvatska

prof. dr. sc. Marin Matošić
 Sveučilište u Zagrebu, Fakultet
 kemijskog inženjerstva i
 tehnologije
 Trg Marka Marulića 19, Zagreb,
 Hrvatska

prof. dr. sc. Davor Dolar
 Sveučilište u Zagrebu, Fakultet
 kemijskog inženjerstva i
 tehnologije
 Trg Marka Marulića 19, Zagreb,
 Hrvatska

Ovo istraživanje proučava uporabu 50 % koncentrata iz reverzne osmoze (RO), dobivenog iz otpadnih voda tekstilne industrije (TOV), kao alternativnog izvora navodnjavanja za bosiljak (*Ocimum basilicum*). Za maksimalno iskorištavanje vode i zadržavanje hranjivih tvari korišten je hibridni sustav ultrafiltracije i RO. Bosiljak navodnjavan RO koncentratom pokazao je najveći udio suhe tvari (14,96 %) i unos hranjiva, osobito P_2O_5 (1,37 %), K_2O (4,39 %) i Cu (8,58 mg/kg). Iako je TOV sadržavao više Mn, Ca i Mg, ipak je rezultirao nižom biomasom, vjerojatno zbog ionske neravnoteže ili stresa izazvanog mikroelementima. Korištena vodovodna voda, dovela je do najmanjeg rasta i unosa hranjiva. Ovi rezultati ukazuju da se 50 % RO koncentrata, koji se često smatra otpadom, može sigurno prenamijeniti za poljoprivredno navodnjavanje, podržavajući ciljeve kružnog gospodarstva kroz smanjenje potrošnje pitke vode.

Ključne riječi: reverzna osmoza, koncentrat, tekstilna otpadna voda, bosiljak, uporaba

1. UVOD

Povećana nestašica vode, u kombinaciji s rastućim pritiscima iz poljoprivrednog sektora, dodatno je naglasila hitnost pronalaženja održivih rješenja za upravljanje vodnim resursima (Ungureanu i dr., 2020.). S nastavkom industrijske ekspanzije i urbanizacije, osobito u zemljama u razvoju, globalna potražnja za pitkom vodom očekuje se da će se znatno povećati, što bi do 2030. godine moglo dovesti do manjka u opskrbi od 40 %. Ovaj rastući pritisak rezultat je niza međusobno povezanih čimbenika: brzog rasta stanovništva, prehrambenih promjena prema vrstama hrane koje zahtijevaju veće količine vode, pretjeranog crpljenja podzemnih voda, zaslaničavanja uzrokovano neučinkovitim metodama navodnjavanja te prodiranja morske vode, pogoršanog porastom razine mora. Ovi trendovi naglašavaju hitnu potrebu za smanjenjem ovisnosti o konvencionalnim izvorima pitke vode. Među alternativnim pristupima koji sve više privlače pozornost

je i korištenje otpadnih voda kao sekundarnog izvora vode i korisnih materijala – mogućnost koja je još uvijek u velikoj mjeri nedovoljno iskorištena. Stopa pročišćavanja otpadnih voda uvelike se razlikuje među regijama; dok visokorazvijene zemlje obrađuju značajan udio svojih otpadnih voda, mnoge zemlje s niskim i srednjim prihodima pročišćavaju tek mali dio, što rezultira ispuštanjem većine otpadnih voda u okoliš bez prethodne obrade (Šteflová i dr., 2018.). Uviđajući taj neiskorišteni potencijal, Europska komisija naglasila je važnost integracije pročišćenih otpadnih voda u okvir kružnog gospodarstva s ciljem smanjenja ovisnosti o konvencionalnim izvorima vode i zatvaranja vodnog ciklusa (Directors, 2016.).

Jedan od obećavajućih pristupa uključuje obradu i uporabu (ponovnu primjenu) industrijskih otpadnih tokova, osobito iz vodno intenzivnih industrija poput tekstilne. Tekstilna industrija jedna je od najintenzivnijih po potrošnji vode, jer se tijekom proizvodnog procesa oslanja na velike

količine pitke vode. U prosjeku, za proizvodnju jednog kilograma tekstilnog materijala potrebno je približno 200 litara vode iz vodovoda (Ahsan i dr., 2023.). Tekstilna otpadna voda (TOV) poznata je po svom složenom sastavu, koji uključuje visoke razine organske tvari, soli, bojila i teških metala, što predstavlja izazov za konvencionalne sustave obrade (Tasneem i dr., 2021.). Brojne studije istražile su različite strategije obrade tekstilne otpadne vode, uključujući fizikalne, kemijske i biološke procese, koji se često primjenjuju u kombinaciji kako bi se smanjilo opterećenje onečišćujućom tvari. Iako konvencionalne metode poput koagulacije, flokulacije i aerobne biološke obrade mogu biti djelotvorne u određenoj mjeri, ipak često ne uspijevaju postići kvalitetu pročišćene vode koja bi omogućila sigurno ispuštanje, a pogotovo ne uporabu. Te metode često uključuju značajnu upotrebu kemikalija, što može dovesti do sekundarnog onečišćenja, primjerice, povećanog stvaranja mulja. Osim toga, zahtijevaju velika prostorna rješenja, visoke troškove rada i održavanja, što njihovu primjenu čini izazovnom, osobito u sredinama s ograničenim resursima. Tlačni membranski procesi, kao što su ultrafiltracija (UF), nanofiltracija (NF) i reverzna osmoza (RO), proglašeni su kao "najbolje raspoložive tehnike" (eng. *Best Available Technique*, BAT) za obradu tekstilne otpadne vode, što je dokumentirano u BAT referentnom dokumentu Europske komisije za tekstilnu industriju (Joze i dr., 2023.). Za razliku od tradicionalnih metoda, membranske tehnologije obično ne zahtijevaju dodatak kemikalija, čime se smanjuje sekundarno onečišćenje i stvaranje mulja. Također su vrlo učinkovite u pročišćavanju otpadnih voda do razine prikladne za uporabu, doprinoseći naporima za očuvanje vodnih resursa.

Međutim, iako je dobiveni permeat često prikladan za ponovnu uporabu u različite industrijske, pa i poljoprivredne svrhe, ipak se koncentrat obično smatra neprikladnim za izravnu uporabu zbog visokih koncentracija soli, organskih spojeva i drugih zadržanih otopljenih tvari. Taj koncentrat ne predstavlja samo ekološki rizik ako se neadekvatno zbrinjava, već i značajan tehnički i ekonomski izazov, jer njegovo odlaganje često zahtijeva dodatne postupke obrade ili specijalizirano zbrinjavanje. U mnogim industrijskim postrojenjima, zbrinjavanje koncentrata ostaje ključna prepreka u sustavima za obradu otpadnih voda temeljenima na membranama (Qasim i dr., 2019.). Tradicionalne strategije za upravljanje ovim zaostalim tokom uključuju razrjeđivanje i ispuštanje u kanalizacijski sustav, lagune ili napredne metode naknadne obrade kao što su oksidacija ili kristalizacija (Ahmed i dr., 2000.). Međutim, ti pristupi često su povezani s visokim operativnim troškovima, regulatornim ograničenjima i ekološkim rizicima, osobito zbog nakupljanja soli, teških metala i postojanih organskih onečišćivala. U obalnim područjima, izravno ispuštanje u morski okoliš izaziva zabrinutost zbog dugoročnih ekoloških učinaka. Prisutnost toksičnih ili postojanih tvari dodatno komplicira sigurno ispuštanje ili uporabu bez prethodne prilagodbe, što dodatno

naglašava potrebu za održivijim rješenjima. Kao rezultat toga, identificiranje ekonomičnih i okolišno prihvatljivih alternativa za upravljanje koncentratom postaje sve veći prioritet.

Jedna od najperspektivnijih opcija za koncentrat je uporaba u poljoprivredi, osobito kod kultura s većom potrebom za hranjivim tvarima pod kontroliranim sustavima navodnjavanja, što nudi dvostruku korist: smanjenje potreba za zbrinjavanjem te povrat vrijednih hranjivih tvari poput dušika (N), fosfora (P) i kalija (K), koji bi inače bili neiskorišteni. Najnovija istraživanja sugeriraju da bi se koncentrat, posebno ako je obogaćen hranjivim tvarima kao što su N, P i K, mogao koristiti u poljoprivredi pod kontroliranim uvjetima (Corzo i dr., 2018.; El Sayed i dr., 2022.; Yoon i dr., 2004.). Takva ponovna uporaba ne samo da zatvara vodni ciklus, već nudi i mogućnost povrata hranjivih tvari koje bi inače bile kategorizirane kao otpad.

U ovom je istraživanju hibridni UF–RO postupak primijenjen za obradu realne tekstilne otpadne vode. Rezultirajući 50 % RO koncentrat korišten je za navodnjavanje bosiljka (*Ocimum basilicum*), s ciljem ocjene njegovog utjecaja na proizvodnju biomase i unos hranjivih tvari u usporedbi s netretiranom tekstilnom otpadnom vodom i pitkom vodom, te ispitivanja njegove održivosti kao alternativnog rješenja za navodnjavanje usjeva. Bosiljak je odabran kao pokusna kultura zbog svoje agronomске i fiziološke osjetljivosti na kvalitetu vode i salinitet, što ga čini idealnim modelom za procjenu učinaka nekonvencionalnih izvora navodnjavanja. Kao široko uzgajana aromatična biljka visoke ekonomske vrijednosti u svježem i prerađenom obliku, bosiljak se često uzgaja u plastenicima i u malim urbanim poljoprivrednim sustavima, gdje su učinkovitost i održivost uporabe vode prioritet. Njegov kratak vegetacijski ciklus i osjetljivost na raspoloživost hranjiva omogućuju brzo ocjenjivanje učinaka obrade tekstilne otpadne vode, dok ga njegova dokazana uloga bioindikatora za teške metale i salinitet čini posebno prikladnim za praćenje dinamike unosa hranjiva i mogućih fitotoksičnih učinaka (Qurie i dr., 2013.). Te ga karakteristike pozicioniraju kao praktičnu i relevantnu vrstu za ispitivanje potencijala poljoprivredne ponovne uporabe RO koncentrata u uvjetima stvarne primjene.

2. MATERIJALI I METODE

2.1. Uzorkovanje tekstilne otpadne vode

Otpadna voda iz tekstilne industrije (TOV) prikupljena je iz pogona za proizvodnju tekstilne trikotaže smještenog u Omišu u Hrvatskoj. Industrija djeluje u području proizvodnje pletiva od pamuka i obuhvaća i "suhe" i "moke" faze obrade. Suhi procesi uključuju pletenje, krojenje, šivanje, sušenje i glačanje, dok mokri procesi obuhvaćaju pranje, izbjeljivanje, bojenje i oplemenjivanje. Pogon dnevno troši približno 180 m³ vode, uglavnom tijekom mokrih procesa, koji su ujedno glavni izvor nastanka otpadnih voda. Uzorci

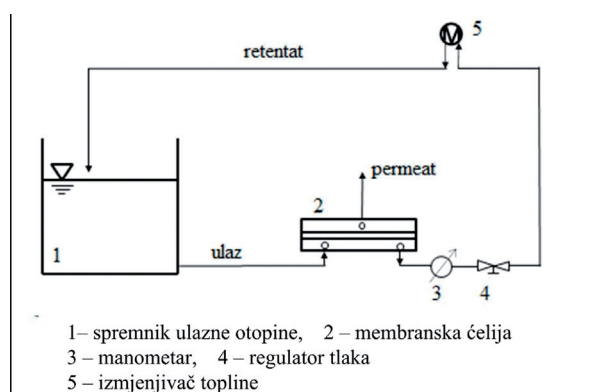
TOV-e prikupljeni su iz egalizacijskog bazena, prije bilo kakve obrade. Spremljeni su u polietilenske spremnike volumena 25 L te odmah transportirani u laboratorij na daljnju obradu.

2.2. Obrada TOV-e u laboratorijskom mjerilu

Za obradu TOV-e korišten je laboratorijski UF/RO sustav, čija je shema prikazana na slici 1. Sustav se sastojao od membranskog kućišta Sterlitech Sepa CF (SAD) s membranskom površinom od 140 cm², separatorom debljine 0,45 mm te dimenzijama protoka unutar kanala 14,5 × 9,5 × 0,17 cm³. U kućištu su korištene membrane u obliku ravne plahte: GK ultrafiltracijska membrana granične molekulske mase 3,5 kDa (eng. *molecular weight cut-off*, MMWCO) proizvođača SUEZ Water Technologies & Solutions (Mađarska) te RO membrana XLE (MWCO 100–200 Da) proizvođača DUPONT (SAD). Tehničke karakteristike korištenih membrana, prema podacima proizvođača, prikazane su u tablici 1. TOV je potiskivana s pomoću pumpe Hydracell MO3SASGSNSPA (Wanner Engineering Inc., Minneapolis, SAD) s protokom od 3 L/min, što odgovara brzini ukriženog strujanja od 0,75 m/s. Za održavanje stabilne radne temperature (24,7 ± 0,2 °C) korišten je termostatski Julabo-ED-5 (Njemačka) u kombinaciji s izmjenjivačem topline Sentry Sample Cooler WSW8222-OEM (Sentry Equipment Corp., SAD). Protok permeata kroz membranu praćen je kontinuiranim mjerenjem mase s pomoću tehničke vage KERN PFB-2000 (Njemačka), povezane s računalom, uz bilježenje mase svakih 10 sekundi. Prije početka obrade, membrane su isprane s približno 3 L demineralizirane vode bez primjene tlaka, u svrhu uklanjanja konzervansa. Nakon ispiranja provedena je stabilizacija protoka demineraliziranom vodom pri radnim tlakovima. Radni tlak za UF iznosio je 10 bara, dok je za RO bio 12 bara.

Membrana	GK	XLE
MWCO, Da	3500	100-200
Dopušteni pH raspon	2-10	2-11
Maksimalna radna temperatura, °C	50	45
Maksimalni radni tlak, bar	27	41
Tipični radni protok permeata, l m ⁻² h ⁻¹	8-34	54

Tablica 1: Karakteristike korištenih membrana prema podacima dobavljača



Slika 1: Shema prikaza Sterlitech aparature

Postotak iskorištenja na RO procesu bio je postavljen na 50 %. Dobiveni RO koncentrat prikupljen je i pohranjen za daljnja istraživanja, s ciljem ispitivanja njegova potencijala za uporabu u navodnjavanju bosiljka.

2.3. Sustav navodnjavanja i analiza uzoraka voda i biljnog materijala

Bosiljak je uzgajan u posudama ispunjenima komercijalnim hortikulturnim supstratom (Potgrond H, Klasmann) u kontroliranim laboratorijskim uvjetima. Potgrond H je višenamjenski supstrat namijenjen proizvodnji presadnica povrća (slika 2). Sastoji se od mješavine smrznutog sphagnum crnog treseta i finog bijelog sphagnum treseta, obogaćenog vodotopivim gnojivom (NPK 14:10:18 kg/m³) i mikroelementima. Navodnjavanje sa svim korištenim vodama bilo je izvedeno u četiri ponavljanja, a svako ponavljanje uključivalo je jednu posudu s četiri posijane sjemenke bosiljka.

U plastične posudice (promjera 8,2 cm i visine 6,5 cm) stavljeno je približno 340 cm³ supstrata. U svaku posudicu posađene su četiri sjemenke bosiljka na dubinu od približno 1 cm. Površina svih posuda prekrivena je slojem perlita kako bi se smanjilo isparavanje tijekom navodnjavanja. Redoslijed postavljanja posuda bio je nasumičan, a pozicije su se periodično rotirale kako bi se izbjegle moguće razlike uzrokovane položajem, osvjetljenjem i strujanjem zraka.

Biljke su navodnjavane svakodnevno (75 mL) tijekom 21 dana s jednom od tri vrste vode: (i) vodovodna voda (kontrolne biljke), (ii) netretiranom TOV-om i (iii) 50 % RO koncentratom. Navodnjavanje je provedeno u isto vrijeme svaki dan kako bi se osigurali ujednačeni uvjeti za sve tretmane.

Prije navodnjavanja, analizirani su sljedeći fizikalno-kemijski parametri u svim uzorcima vode: mutnoća, ukupni organski ugljik (TOC), električna vodljivost, pH, nitriti, nitrati i sulfati. Mutnoća je mjerena uređajem Turb 430 IR (WTW, Njemačka); vodljivost i pH određeni su multimetrom HandyLab 680 (SI Analytics, Njemačka); a TOC analizatorom TOC-Vws (Shimadzu, Japan). Sadržaj sulfata, nitrita i nitrata određen je ionskom kromatografijom s pomoću uređaja Dionex Aquion (Kemolab, Hrvatska). Analiza voda napravljena je jednokratno te se uzorak tijekom perioda od 21 dana čuvao na hladnom i mračnom. Potreban dnevni volumen (75 mL) ostavljen je do 12 sati na sobnoj temperaturi prije navodnjavanja u svrhu ujednačavanja temperature vode za navodnjavanje.

Okolišni uvjeti održavani su na temperaturi od 24,2 ± 0,8 °C i relativnoj vlažnosti zraka od 47,2 ± 2,3 %, praćenih s pomoću uređaja Trotec BL30 (Njemačka), uz LED osvjetljenje i fotoperiod od 16 sati svjetla i osam sati tame s LED lampom BESTVA DC serija LED svjetiljki za uzgoj stakleničkih hidroponskih sobnih biljaka, povrća i cvijeća (model GW-DMD200, 2000 W).

Nakon 21 dana uzorci bosiljka su podvrgnuti detaljnoj

analizi. Analiza se sastojala od utvrđivanja prinosa biomase i unosa hranjivih tvari (N, fosfori pentoksid – P_2O_5 , P, kalijev oksid – K_2O , K, kalcij – Ca, magnezij – Mg, željezo – Fe, cink – Zn, mangan – Mn, bakar – Cu). Za analize je korištena sljedeća oprema: sušionik, analitička



Slika 2: Korištena vrsta bosiljka i supstrata za sadnju

vaga ($\pm 0,0001$ g), mikrovalna pećnica, blok za digestiju s isparivačem, Kjeltex destilacijska jedinica, ultravioletni-vidljivi spektrofotometar, plameni fotometar i spektrometar atomske apsorpcije prema protokolu ISO 13196.

3. REZULTATI I RASPRAVA

Fizikalno-kemijska analiza voda za navodnjavanje (tablica 3) pokazala je značajne razlike u sastavu. RO koncentrat imao je najviše vrijednosti vodljivosti ($4470 \mu S/cm$), pH (8,82) i sadržaja sulfata ($742 mg/L$), što potvrđuje učinak koncentriranja uzrokovan obradom TOV-e membranskim procesom. Međutim, TOC je bio niži ($115,1 mg/dm^3$) u odnosu na netretiranu TOV-u, koja je imala najvišu vrijednost TOC-a od $321,8 mg/L$. To ukazuje na djelomično zadržavanje organskih spojeva UF membranom prije RO obrade. TOV je sadržavala značajne koncentracije i anorganskih i organskih onečišćivala, što je tipično za otpadne vode iz tekstilne proizvodnje, pri čemu organsko opterećenje potječe od bojila, površinskih aktivnih tvari i pomoćnih sredstava, dok sulfati i drugi ioni potječu iz sredstava za izbjeljivanje i soli za fiksaciju boje (Bakar i dr., 2020.). Vodljivost TOV-e ($3.949 \mu S/cm$) bila je niža nego u 50 % RO koncentratu ($4.470 \mu S/cm$), ali znatno viša u usporedbi s vodovodnom vodom ($689 \mu S/cm$), što odražava složen ionski sastav. Razina nitrata u TOV-i bila je vrlo niska ($0,005 mg/L$), vjerojatno zbog brze oksidacije u nitrate u aerobnim uvjetima. Koncentracije nitrata bile su umjereno povišene ($23,6 mg/L$), kao rezultat dodataka kemikalija na bazi dušika i pomoćnih sredstava korištenih tijekom predobrade i bojenja (Sivakumar i dr., 2011.). RO koncentrat imao je nešto niže koncentracije nitrata ($19 mg/L$), vjerojatno zbog djelomičnog prolaska nitrata kroz membranu, dok su se nitriti lagano povećali na $0,01 mg/L$ uslijed koncentriranja. Koliko su se pojedine tvari uklanjale UF i RO postupcima, ovisilo

je o njihovoj veličini molekula i kemijskom sastavu. Uklanjanje TOC-a iznosilo je približno 64 % (od $321,8$ do $115,1 mg/L$), dok je mutnoća znatno smanjena s 97 NTU u TOV-u na $10,2 NTU$ u RO koncentratu, što ukazuje na učinkovito uklanjanje suspendiranih čestica i koloidnog materijala. S obzirom na to da je RO postupak namijenjen zadržavanju otopljenih soli, očekivano je da je koncentracija sulfata povećana u RO koncentratu. Njihova prisutnost posljedica je učinkovitog zadržavanja iona u procesu ugušćivanja. Vodovodna voda, korištena kao kontrolna voda za navodnjavanje, pokazivala je najniže vrijednosti svih analiziranih parametara, uključujući TOC ($8,22 mg/L$), sulfata ($20,4 mg/L$) i nitrate ($17,4 mg/L$). S obzirom na to da se vodovodna voda koristila kao kontrolna voda za navodnjavanje navedene vrijednosti smatraju se kao referentne vrijednosti bez onečišćenja.

Kako se vidi iz tablice 3 ove kemijske karakteristike (tablica 2) jasno su se odrazile na unos hranjivih tvari u biljkama bosiljka. Najveća akumulacija suhe tvari uočena je kod bosiljka navodnjavanog 50 % RO koncentratom (14,96 %), zatim TOV-om (12,96 %) i vodovodnom vodom (12,26 %), što upućuje na to da je korištenje 50 % RO koncentrata stvorilo optimalne uvjete za rast. Najveći unos dušika (3,04 %) u biljke uočen je korištenjem TOV-e za navodnjavanje, dok je kod 50 % RO koncentrata iznosio 2,62 %, a u vodovodne vode 2,11 %. Iako TOV-a sadrži veći udio dušikovih spojeva, ipak se to nije odrazilo na veću biomasu, što može ukazivati na neravnotežu hranjiva ili antagonističke učinke u interakciji s drugim elementima (Sultana i dr., 2025.).

U usporedbi s vodovodnom vodom unos fosfora, izražena kroz koncentracije P_2O_5 i P, bila je najviša u 50 % RO koncentratu (1,37 i 0,60 %) i TOV-u (1,41 i 0,62 %). Fosfor je ključan za razvoj korijena i prijenos energije, a učinkovit unos fosfora prisutnog u 50 % RO koncentratu vjerojatno je pridonijelo boljem rastu biljaka. Unos kalija, izražen kao K_2O i K, također je bio povišen kod TOV-e (5,59 i 4,64 %), što može potaknuti metaboličku aktivnost, ali istovremeno može izazvati ionsku konkurenciju, osobito s Mg i Ca. Suprotno tome, 50 % RO koncentrat osigurao je uravnoteženiju razinu kalija (4,39 i 3,64 %) koja je podržala rast biljaka bez izazivanja antagonizama među hranjivima (Fageria, 2001.; Varga i dr., 2024.).

Razine Ca i Mg u biljkama bosiljka bile su značajno manje u biljkama navodnjavanih 50 % RO koncentratom i TOV-om u usporedbi s vodovodnom vodom. Kontrolne biljke (navodnjavane vodovodnom vodom) imale su najviši sadržaj Ca (1,85 %) i Mg (0,65 %). Međutim, snižene vrijednosti Ca i Mg u biljkama bosiljka navodnjavane 50 % RO koncentratom (0,12 i 0,25 %) nisu ometale rast, što upućuje na dovoljnu biološku dostupnost ili kompenzaciju drugim hranjivima. Razlog navedenih razlika je u prekomjernoj količini K u TOV-u koja je mogla doprinijeti smanjenom unosu Ca i Mg, što ukazuje na neravnotežu hranjivih tvari unatoč visokim

pojedinačnim koncentracijama (Yang i dr., 2024.).

Unos mikroelemenata također je značajno varirao. Najviša razina Fe nađena je u kontrolnim biljkama (45,7 %), dok su biljke navodnjavane TOV-om i 50 % RO koncentratom imale niže vrijednosti Fe koje su iznosile 37,9 odnosno 32,8 %. To može biti rezultat promjena u pH vrijednosti ili konkurentske dinamike unosa, iako je 50 % RO koncentrat ipak omogućio dovoljne količine Fe bez toksičnosti. Cink je pokazao najveći unos kod biljaka navodnjavanih 50 % RO koncentratom (67,0 mg/kg), u usporedbi s kontrolnim biljkama (55,4 mg/kg) i biljkama navodnjavanih TOV-om (32,6 mg/kg), što upućuje na pojačanu enzimsku aktivnost i sintezu

proteina (Hamzah Saleem i dr., 2022.). Nasuprot tome, razine Mn bile su najviše u kontrolnim biljkama (32,6 mg/kg) i biljkama navodnjavanih TOV-om (23,4 mg/kg), dok su bile najniže u biljkama navodnjavanim 50 % RO koncentratom (15,6 mg/kg). Budući da višak Mn može inhibirati rast biljke izazivanjem oksidacijskog stresa, smanjeni unos Mn-a u biljkama navodnjavanim 50 % RO koncentratom je povoljan (Hai-hua i dr., 2009.).

Unos Cu također je bio najviši kod biljaka navodnjavanih 50 % RO koncentratom (8,58 mg/kg), što podržava funkciju respiratornih enzima i stvaranje lignina bez dosezanja fitotoksičnih koncentracija. Sveukupno, nutritivni profil 50 % RO koncentrata

Parametar	Jedinica	Vodovodna voda (kontrola)	TOV	50 % RO koncentrat
Mutnoća	NTU	2,82	97,00	10,2
TOC	mg/L	8,22	321,8	115,1
Vodljivost	µS/cm	689	3949	4470
pH	-	7,45	7,29	8,82
Nitriti	mg/L	0,00	0,005	0,01
Nitrati	mg/L	17,4	23,6	19,0
Sulfati	mg/L	20,4	240,8	742,0

Tablica 2: Fizikalno-kemijske karakteristike vodovodne vode, TOV-e i 50 % RO koncentrata

Parametar	Jedinica	Vodovodna voda (kontrolne biljke)	TOV	50 % RO koncentrat
Biomasa	%	12,26	12,96	14,96
N	%	2,11	3,04	2,62
P2O5	%	1,06	1,41	1,37
P	%	0,46	0,62	0,60
K2O	%	3,29	5,59	4,39
K	%	2,73	4,64	3,64
Ca	%	1,85	0,33	0,12
Mg	%	0,65	0,31	0,25
Fe	%	45,7	37,9	32,8
Zn	mg/kg	55,4	32,6	67,0
Mn	mg/kg	32,6	23,4	15,6
Cu	mg/kg	4,39	1,95	8,58

Tablica 3: Biomasa i unos hranjivih tvari u biljkama bosiljka

pokazuje se uravnoteženijim, izbjegavajući akumulaciju potencijalno toksičnih elemenata, dok osigurava dostupnost ključnih makroelemenata i mikroelemenata.

4. ZAKLJUČCI

Ovo istraživanje pruža uvjerljive dokaze da se 50 % RO koncentrata dobivenog obradom TOV-e može učinkovito oporabiti za navodnjavanje biljaka bosiljka. Oporaba ovog toka ne samo da podržava načela održivog upravljanja vodnim resursima i recikliranja hranjivih tvari, već i redefinira tradicionalno problematičan otpadni proizvod kao vrijedan resurs u poljoprivrednim sustavima. Među tri istraživana režima navodnjavanja (vodovodna voda, nepročišćena TOV-a i 50 % RO koncentrat), 50 % RO koncentrat je dosljedno rezultirao

najvećom produkcijom suhe tvari i unosom hranjivih tvari u biljnim tkivima bosiljka. Osigurao je povišene razine esencijalnih makroelemenata poput P2O5, K2O i mikroelemenata poput Cu, bez izazivanja toksičnih učinaka. Nasuprot tome, TOV-a, iako bogata određenim elementima (primjerice, Mn, Ca, Mg), nije dovela do povećanja biomase, što je vjerojatno rezultat ionske neravnoteže ili akumulacije fitotoksičnih elemenata. Ovi rezultati potvrđuju da je uravnotežena opskrba hranjivima ključna za optimalan rast biljaka. Nadalje, fizikalno-kemijska analiza voda za navodnjavanje pokazala je da 50 % RO koncentrata ima poboljšane karakteristike u pogledu organskog opterećenja (što potvrđuju niže TOC vrijednosti u usporedbi s TOV-om), istovremeno koncentrirajući korisne ione. Ovo

selektivno obogaćivanje, uz izostanak viška toksičnih spojeva, pridonijelo je pozitivnom učinku na rast biljaka. U širem kontekstu, uporaba 50 % RO koncentrata za navodnjavanje izravno odgovara na globalne izazove povezane s nestašicom vode, upravljanjem otpadnim vodama i održivošću poljoprivrede. Ovakav pristup donosi dvostruku korist: smanjenje ekološkog opterećenja povezanog s odlaganjem koncentrata i povećanje poljoprivredne produktivnosti kroz povrat ugrađenih hranjivih tvari. Buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti na dugoročne učinke u terenskim uvjetima te procjenu primjenjivosti ovog pristupa na druge poljoprivredne kulture i izvore otpadnih voda. Unatoč tome, ovo istraživanje ističe obećavajuću i još uvijek nedovoljno iskorištenu priliku za zatvaranje kružnih tokova vode i hranjiva u industrijskom i poljoprivrednom sektoru. U svrhu primjene uporabe 50 % retentata za navodnjavanje buduća istraživanja bit će bazirana na većem broju uzoraka u svrhu provođenja analize varijance. Navedeni pristup omogućit će statističku potvrdu razlika između odabranih tretmana. ■

5. LITERATURA

- Ahmed, M., Shayya, W. H., Hoey, D., Mahendran, A., Morris, R., & Al-Handaly, J., (2000.). Use of evaporation ponds for brine disposal in desalination plants. *Desalination*, 130(2), 155-168.
- Ahsan, A., Jamil, F., Rashad, M. A., Hussain, M., Inayat, A., Akhter, P., Al-Muhtaseb, A. a. H., Lin, K.-Y. A., & Park, Y., (2023.). Wastewater from the textile industry: Review of the technologies for wastewater treatment and reuse. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 40(9), 2060-2081.
- Bakar, N. A., Othman, N., Yunus, Z., Daud, Z., Norisman, N. S., & Hisham, M. H., (2020.). *Physico-chemical water quality parameters analysis on textile*. Paper presented at the IOP conference series: earth and environmental science.
- Corzo, B., De la Torre, T., Sans, C., Escorihuela, R., Navea, S., & Malfeito, J., (2018.). Long-term evaluation of a forward osmosis-nanofiltration demonstration plant for wastewater reuse in agriculture. *Chemical Engineering Journal*, 338, 383-391.
- Directors, E. W. C. I. S. f. t. W. F. d. t. f. d. (2016.). Guidelines on Integrating Water-reuse into Water Planning and Management in the context of the WFD.
- El Sayed, M. M., Abulnour, A. M., Tewfik, S. R., Sorour, M. H., Hani, H. A., & Shaalan, H., (2022.). Reverse osmosis membrane zero liquid discharge for agriculture drainage water desalination: Technical, economic, and environmental assessment. *Membranes* 12(10), 923.
- Fageria, V., (2001.). Nutrient interactions in crop plants. *Journal of plant nutrition*, 24(8), 1269-1290.
- Hai-hua, W., Tao, F., Xi-xu, P., Ming-li, Y., Ping-lan, Z., & Xin-ke, T., (2009.). Ameliorative effects of brassinosteroid on excess manganese-induced oxidative stress in *Zea mays* L. leaves. *Agric. Sci. China*, 8, 1063-1074.
- Hamzah Saleem, M., Usman, K., Rizwan, M., Al Jabri, H., & Alsafran, M., (2022.). Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture. *Front Plant Sci*, 13, 1033092. doi:10.3389/fpls.2022.1033092
- Joze, R., Benoît, Z., Damien, D. G., Jorge, G. B., & Serge, R., (2023.). *Best available techniques (BAT) reference document for the Textiles Industry*. Retrieved from
- Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N. N., Darwish, N. A., & Hilal, N., (2019.). Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, 459, 59-104.
- Qurie, M., Abbadi, J., Scrano, L., Mecca, G., Bufo, S. A., Khamis, M., & Karaman, R., (2013.). Inland Treatment of the Brine Generated from Reverse Osmosis Advanced Membrane Wastewater Treatment Plant Using Epuvalisation System. *International Journal of Molecular Science*, 14(7), 13808-13825.
- Sivakumar, K., Balamurugan, C., Ramakrishnan, D., & Bhai, L. H., (2011.). Assessment studies on wastewater pollution by textile dyeing and bleaching industries at Karur, Tamil Nadu. *Rasayan Journal of Chemistry*, 4(2), 264-269.
- Sultana, R., Islam, S. M. N., Jashim, A. I. I., & Rahman, H., (2025.). Irrigation with undiluted textile wastewater retards growth and imbalances the ion homeostasis in *Amaranthus tricolor*. *Water Science*, 39(1), 84-95.
- Šteflová, M., Koop, S., Elelman, R., Vinyoles, J., & Van Leeuwen, K., (2018.). Governing Non-Potable Water-Reuse to Alleviate Water Stress: The Case of Sabadell, Spain. *Water*, 10(6), 739.
- Tasneem, A., Sarker, P., Akter, S., Mouna, S., Rahaman, M., Mohinuzzaman, M., Uddin, M., & Kabir, M., (2021.). Textile wastewater treatment by combination of chemical and phytoremediation processes. *Pollution*, 7(1), 43-54.
- Ungureanu, N., Vlăduț, V., & Voicu, G., (2020.). Water scarcity and wastewater reuse in crop irrigation. *Sustainability*, 12(21), 9055.
- Varga, I., Šmituc, I., & Panišić, T. J. G. Z. B. (2024.). Primjena kalija u gnojidbi krumpira. 47(6), 70-78.
- Yang, M., Zhou, D., Hang, H., Chen, S., Liu, H., Su, J., Lv, H., Jia, H., & Zhao, G., (2024.). Effects of Balancing Exchangeable Cations Ca, Mg, and K on the Growth of Tomato Seedlings (*Solanum lycopersicum* L.) Based on Increased Soil Cation Exchange Capacity. *Agronomy*, 14(3), 629.
- Yoon, Y., Ok, Y.-S., Kim, D.-Y., & Kim, J.-G., (2004.). Agricultural recycling of the by-product concentrate of livestock wastewater treatment plant processed with VSEP RO and bio-ceramic SBR. *Water Science and Technology*, 49(5-6), 405-412.

ZAHVALA

Ovo istraživanje je sufinancirano projektom WaRMem: Oporaba vode i membranski separacijski procesi za pouzdanu i održivu opskrbu vodom, *NATO Science for Peace and Security Programme*, 2023.-2026. (MYP G6087).

THE REUSE OF HIGHLY CONCENTRATED RO CONCENTRATE (50 %) FROM WASTEWATER GENERATED BY TEXTILE INDUSTRY FOR BASIL CULTIVATION

Abstract: This research studies the reuse of 50 % concentrate from reverse osmosis (RO), obtained from textile wastewater (TWW) as an alternative source in the irrigation of basil (*Ocimum basilicum*). In order to maximally reuse water and retain nutrients, a hybrid ultrafiltration system and RO were used. The basil irrigated with a RO concentrate had the largest share of dry matter (14.96 %) and nutrient intake, particularly of P_2O_5 (1.37 %), K_2O (4.39 %) and Cu (8.58 mg/kg). Although the TWW contained more Mn, Ca and Mg, it resulted in a lower biomass, probably due to ionic imbalance or stress caused by microelements. The water used from the water supply system lead to the lowest growth and nutrient intake. These results indicate that the 50 % RO concentrate, which is often considered waste, can be safely reused for irrigation in agriculture, thus supporting the objectives of circular economy by reducing the consumption of drinking water.

Key words: Reverse osmosis, concentrate, textile wastewater, basil, reuse

VERWERTUNG VOM HOCHKONZENTRIERTEN UMKEHROSMOSEKONZENTRAT AUS ABWÄSSERN DER TEXTILINDUSTRIE FÜR DEN BASILIKUMANBAU

Zusammenfassung: In dieser Studie wird die Verwertung des 50-prozentigen Umkehrosmosekonzentrats aus Abwässern der Textilindustrie als alternative Bewässerungsquelle für Basilikum (*Ocimum basilicum*) untersucht. Zur Maximierung der Wasserausnutzung und Nährstoffspeicherung wurden ein hybrides Ultrafiltrationssystem und Umkehrosmose verwendet. Das Basilikum, das mit dem aus Umkehrosmose zurückbleibenden Konzentrat bewässert wurde, zeigte den höchsten Trockenmassegehalt (14,96%) und die höchste Nährstoffaufnahme, namentlich P_2O_5 (1,37 %), K_2O (4,39 %) und Cu (8,58 mg/kg). Obwohl das Textilabwasser mehr Mn, Ca und Mg enthielt, hatte es eine geringere Biomasse, wahrscheinlich aufgrund eines ionischen Ungleichgewichts oder eines Mikronährstoffstresses. Das verwendete Leitungswasser führte zu dem geringsten Wachstum und der geringsten Nährstoffaufnahme. Diese Ergebnisse zeigen, dass das 50-prozentige Umkehrosmosekonzentrat, das oft als Abfallprodukt betrachtet wird, sicher für die landwirtschaftliche Bewässerung wiederverwendet werden kann, gleichzeitig die Ziele der Kreislaufwirtschaft durch Reduzierung des Trinkwasserverbrauchs unterstützend.

Schlüsselwörter: Umkehrosmose, Konzentrat, Abwasser aus der Textilindustrie, Basilikum, Verwertung