

Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
Higra d.o.o. Split

MJERENJE IZDAŠNOSTI IZVORIŠTA MODRO OKO



Rijeka, prosinac 2020.

Predmet: Mjerenje izdašnosti izvorišta Modro oko

Naručitelj: Hrvatske vode
Ulica grada Vukovara 220
10000 Zagreb

Izvršitelji:
(zajednica ponuditelja): Građevinski fakultet u Rijeci HIGRA d.o.o.
Radmile Matejčić 3 Doveska 13
51000 Rijeka 21000 Split

Evidencijski broj ugovora: 24-272/19

Pozicija plana: A.04.02.01.

Nositelj zadatka: dr. sc. Josip Rubinić, *josip rubinic* dipl. ing. građ.

Izrada izvješća: Građevinski fakultet u Rijeci
dr. sc. Josip Rubinić, dipl. ing. građ.
Maja Radišić, mag. ing. aedif.

HIGRA d.o.o. Split
Dražan Milanović, ing.građ.
Marin Milin, mag. ing. građ.
Marko Džaja, mag. ing. građ.

Podaci: Državni hidrometeorološki zavod
Hrvatske vode
IZVOR Ploče d.o.o.



Dekanica Građevinskog fakulteta u Rijeci

Štimac

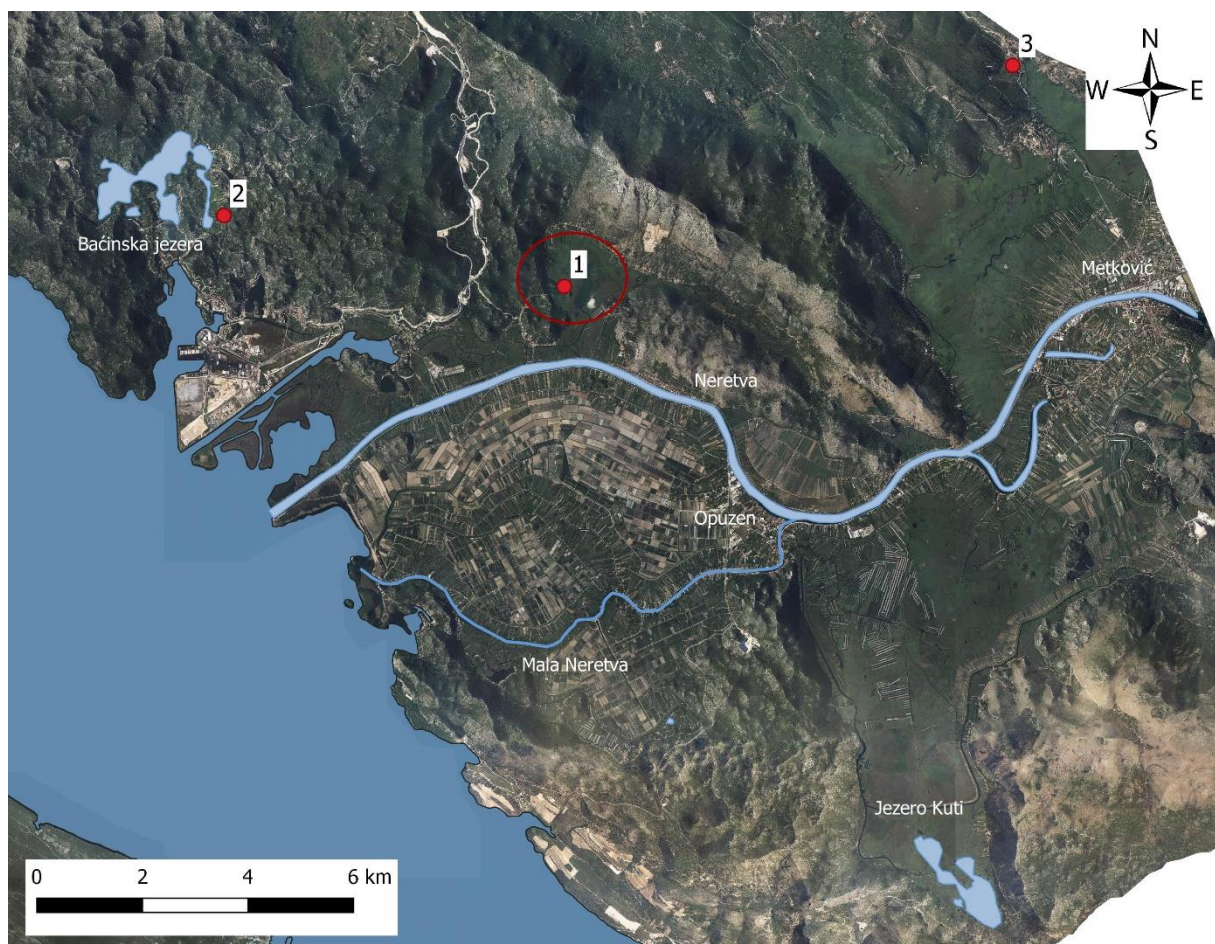
prof. dr. sc. Ivana Štimac Grandić

SADRŽAJ

1.	Uvod	1
2.	Opće značajke istraživanog područja	6
2.1.	Sliv i vodni resursi	6
2.2.	Korištenje voda s Modrog oka	9
2.3.	Batimetrija Modrog oka.....	10
3.	Osnovna analiza hidroloških podataka	13
3.1.	Osnovne klimatološke značajke.....	15
3.2.	Osnovne hidrološke značajke	17
3.2.1.	Vodostaji.....	17
3.2.2.	Protoci	21
3.3.	Elementi vodne bilance	23
4.	Rezultati monitoringa tijekom 2019./2020. godine.....	27
4.1.	Obnova monitoringa.....	27
4.2.	Praćenje kolebanja razina, električne vodljivosti i temperature vode.....	28
4.3.	Vodomjerenja	31
4.4.	Kolebanja razine mora, Neretve i prikupljenih podataka sa Modrog oka.....	35
5.	Hidrološke analize	38
5.1.	Rezultati vodomjerenja DHMZ-a i procjena pouzdanosti konsumpcijskih krivulja Modrog oka	38
5.2.	Analize hidroloških podataka sa lokaliteta šireg utjecajnog područja	42
5.3.	Analize kompletiranih protoka izvorišta Modro oko.....	44
5.4.	Ocjena hidroloških elemenata ekološki prihvatljivog protoka (EPP) za zahvat voda iz izvora Modro oko	55
5.4.1.	Metodologija procjene EPP	55
5.4.2.	Rezultati preliminarne procjene EPP za vodozahvat na Modrom oku	62
6.	Zaključci s prijedlogom monitoringa Modrog oka	65
7.	Literatura.....	67
8.	PRILOG – Izvještaj o provedenom batimetrijskom premjeru Modrog oka.....	69

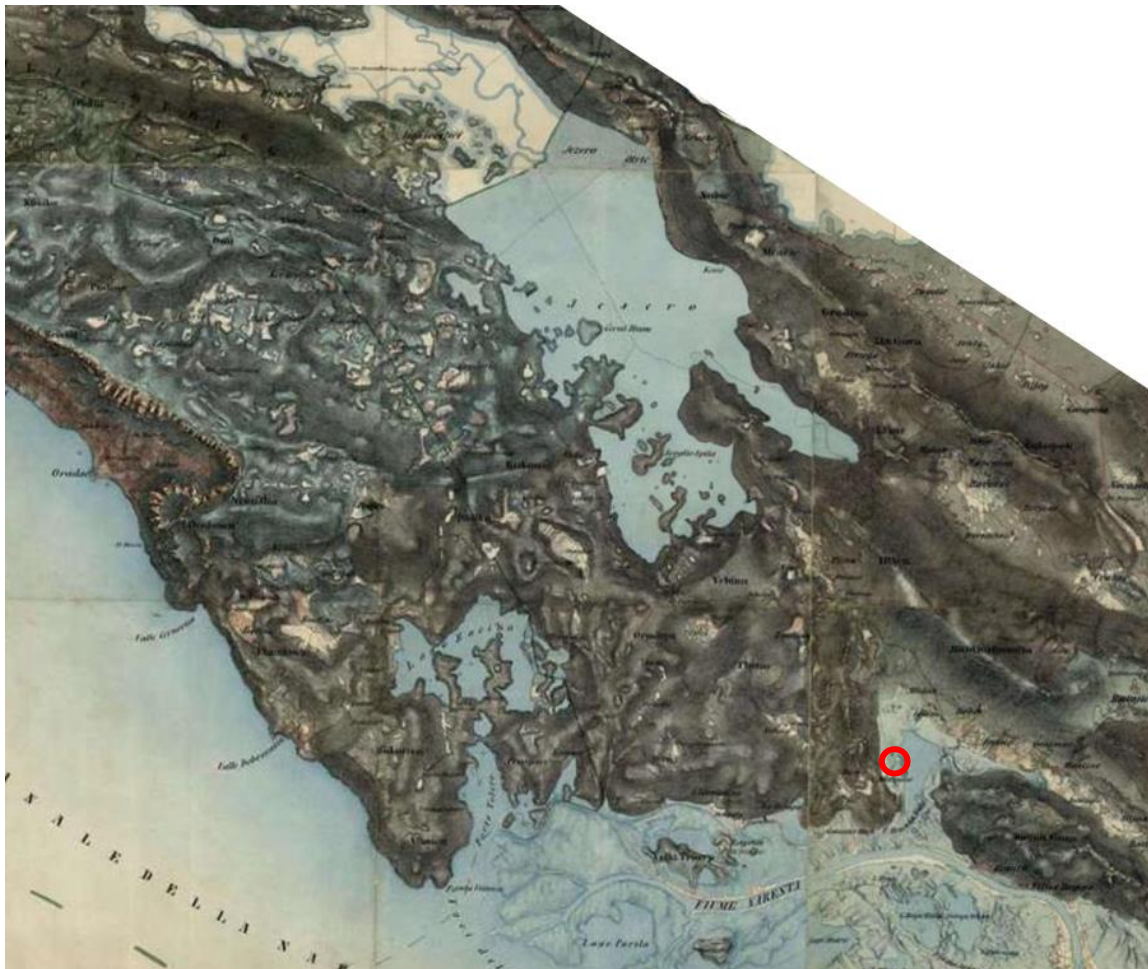
1. Uvod

Izvor Modro oko je zbog svojih hidroloških značajki vrlo značajan vodni resurs u dolini rijeke Neretve (Slika 1.1), kako s vodnogospodarskog aspekta, tako i zbog njegovih prirodno-ambijentalnih vrijednosti. Posebni ornitološki rezervat »Modro oko i jezero Desne« jedno je od reprezentativnih močvarnih ekosustava na području delte Neretve osobito značajnom zbog očuvanja staništa i raznolikosti ptica močvarica. Nekada se koristio za navodnjavanje poljoprivrednih površina u dolini Neretve s instaliranim kapacitetom od 250 L/s, a u novije doba uključen je u vodoopskrbni podsustav Desne, s crpnim kapacitetom od 7 L/s. No, koriste se puno manje količine – prosječno svega oko 0,8 L/s, a vršno oko 2,8 L/s. Iako primarni izvor vode vodoopskrbnog sustava Ploče, izvor Klokun, sa svojih 130 L/s instaliranog kapaciteta trenutno zadovoljava vodoopskrbne potrebe, planira se povezivanje izvora Modro oko s glavnim vodoopskrbnim sustavom vezanim uz izvor Klokun (<https://izvor.ploce.hr/sustav-vodoopskrbe/>), zbog čega s od strane Hrvatskih voda i inicirana predmetna istraživanja i dodatni monitoring.



Slika 1.1. Situacija područja Donjeg toka rijeke Neretve s markiranim položajem izvora Modro oko i hidroloških postaja na izvorštima vodoopskrbe: 1 – Modro oko, 2 – Klokun, 3 – Prud

Radi se o području koje je tijekom povijesti doživjelo velike hidrografske i hidrološke promjene zbog provedbe opsežnih hidrotehničkih zahvata kako na području donjeg toka Neretve, tako i gravitirajućih krških polja, gdje su najintenzivniji zahvati provedeni prve polovine 20. stoljeća. To se odnosi prije svega na Vrgoračko polje čiji je dio voda tunelom preusmjeren u Baćinska jezera, koja su pak tunelom i kanalom neposredno spojena s morem. Prikaz prirodnog stanja toga područja dan je na Slikama 1.2. i 1.3. Spomenutim zahvatima, kao i hidrotehničkim zahvatima na hipsometrijski višim krškim poljima čije su vode hidrološki povezane s vodama Vrgoračke Matice, bitno je promijenjena ne samo hidrografska mreža, nego i vodna bilanca izvorišta s desne obale Neretve, pa tako i Modroga oka. Prema danim ranijim kartografskim prikazima (Slike 1.2 i 1.3), Modro oko čak nije bilo niti izdvojeno kao zasebni hidrološki objekt, već je bilo dio jezerskog sustava jezera Desni odakle je otjecao preljevni kanal Desanka čije su se vode dijelom prelijevale u Neretvu, a dijelom nastavljale tok u podnožju doline (Crna rijeka) prema Rogotinu i Pločama.



Slika 1.2. Prikaz područja desne obale donjeg toka rijeke Neretve i njenoga zaleđa prije provedbe opsežnih hidrotehničkih zahvata s markiranim položajem Modrog oka (<http://mapire.eu/en/map/>)

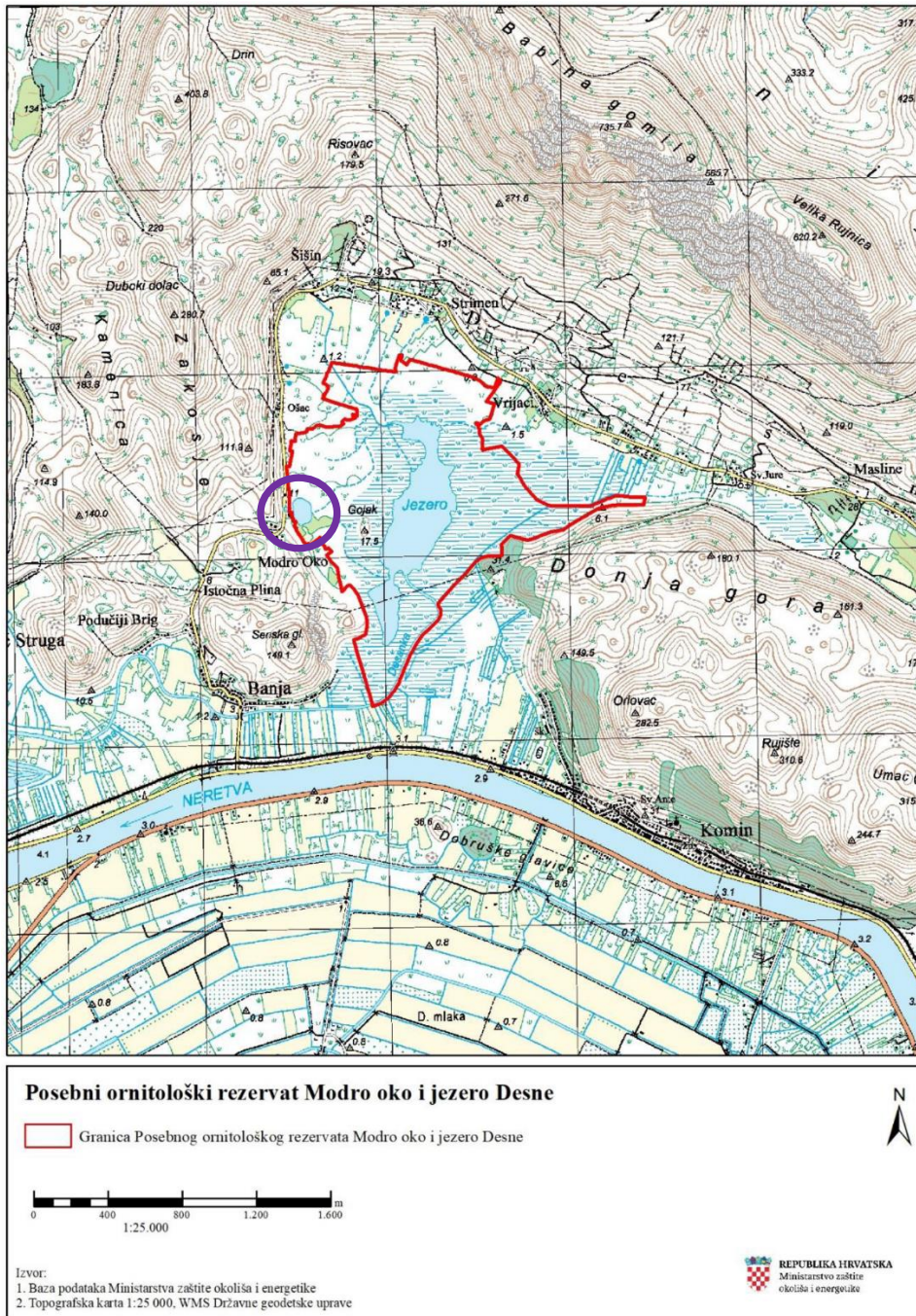


Slika 1.3. Prikaz područja lokaliteta Modrog oka i jezera Desni prije provedbe opsežnih hidrotehničkih zahvata s markiranim položajem Modrog oka (<http://mapire.eu/en/map/>)

Izvor Modro oko u sadašnjem stanju istječe u vidu jezerskog oka elipsastog oblika s duljinama osi 150 i 100 m, a površina mu je oko 1,2 ha (Slika 1.4). Uredbom o proglašavanju posebnih rezervata „Modro oko i jezero Desne“, „Ušće Neretve“ i „Kuti“, zajedno s obližnjim jezero Desne, s kojim je hidrografski vezano, Modro oko ima karakter posebnog ornitološkog rezervata (NN 94/2020), dok je ranijim odlukama imalo kategoriju zaštite značajnog krajobraza (Slika 1.5).



Slika 1.4. Pogled na izvor Modro oko
([https://hr.wikipedia.org/wiki/Modro_oko_\(jezero\)#/media/Datoteka:Modro_oko.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Modro_oko_(jezero)#/media/Datoteka:Modro_oko.jpg))



Slika 1.5. Položaj Modrog oka (markirano ljubičastim krugom) u odnosu na granice ornitološkog rezervata (NN 94/2020)

Tijekom trajanja malovodnih razdoblja, voda iz Modro oka istječe putem dvaju kanala – većeg nasuprot napuštenoj crpnoj stanici za navodnjavanje, te drugog znatno manjeg, oko 40 m udaljenog desno od spomenutog glavnog kanala. No tijekom trajanja velikovodnih razdoblja, voda iz jezerskog oka prelijeva putem većeg broja kanala.

Modro oko je bilo uključeno u sustav monitoringa DHMZ-a tijekom razdoblja 15.10.1969. - 31.8.2012.g. (Slika 1.6 – položaj vodokazne letve) u sklopu kojeg su praćeni vodostaji i provedena vodomjerenja (ukupno 162 u bazi DHMZ-a). Veza između vodostaja i protoka je

definirana samo za razdoblje 1980. - 1991., te 1995. - 2009. Zbog problema s prevelikom zaraštenosti korita u razdoblju 1992.-1994. nisu vršena vodomjerenja, te ne postoji izračun protoka. Krivulja protoka nije definirana ni za razdoblje 2010.-2011., zbog velikog rasapa rezultata vodomjerenja. Prema raspoloživim podacima, srednji godišnji protoci kretali su se u relativno malom rasponu između 1,54 i 2,58 m³s⁻¹, s prosjekom od oko 2,0 m³s⁻¹. Maksimalni zabilježeni protok iznosio je 6,63 m³s⁻¹ (20.12.2008.), a minimalni 0,216 m³s⁻¹ (27.9.1986.). Pri tome valja napomenuti da se radilo o registriranim preljevnim protocima (s vrlo upitnom točnošću posebno u razdobljima malih voda), a da su ukupne izdašnosti bile veće za količine crpljene vode za potrebe navodnjavanja, no iste nisu registrirane.

Iako se iskazane podatke o protocima može smatrati orijentacijskim veličinama, vidljivo je da se radi o izvorištu vrlo značajnog vodnog potencijala, pa je isti detaljnije sagledan u okviru provedenih aktivnosti u predmetnom projektu. Tijekom razdoblja od 28.8.2019. do 9.10.2020., uspostavljen je i ponovni hidrološki monitoring na tom lokalitetu, provedena batimetrija, te analizirani međuodnosi prikupljenih podataka tijekom povijesnog i novouspostavljenog monitoringa s podacima s drugih hidroloških postaja, te donesene preporuke oko provedbe daljnjeg monitoringa.

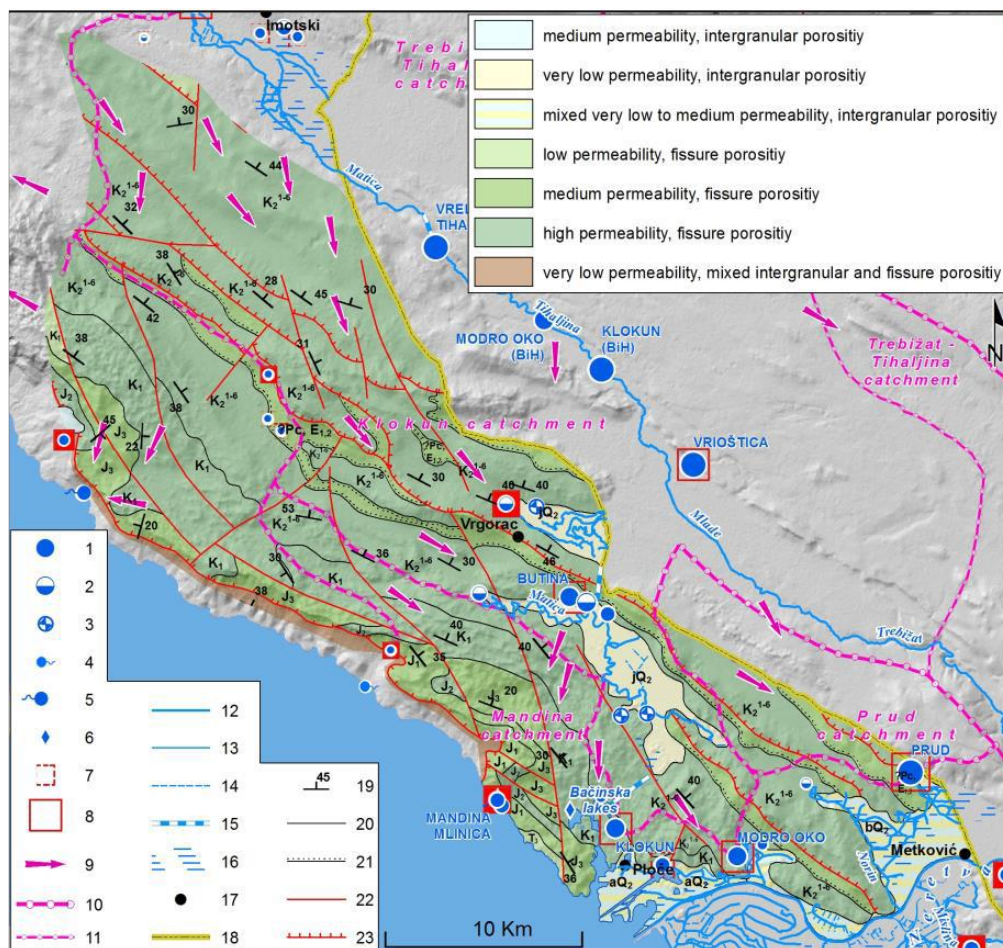


Slika 1.6. Položaj vodokazne letve DHMZ-a na Modrom oku za koju su bili vezani i podaci monitoringa 2019.-2020.

2. Opće značajke istraživanog područja

2.1. Sliv i vodni resursi

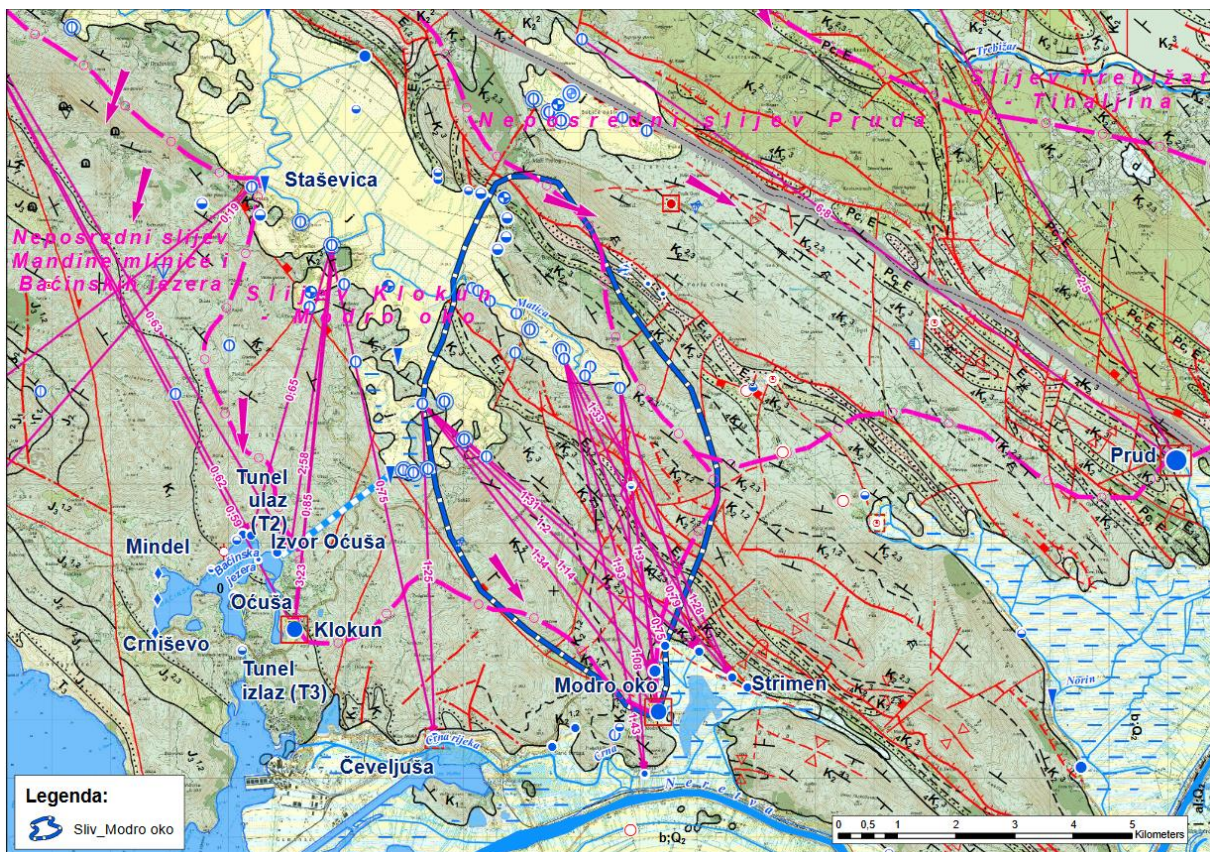
Izvorište Modro oko nalazi se na području desne obale ušća Neretve, između dvaju drugih izdašnijih izvora – uzvodnijeg izvora Prud koji prihranjuje Norinsku rijeku, desni pritok Neretve, te izvora Klokun koji napaja Baćinska jezera. U okviru projekta PROLINE-CE, Hrvatske geološki institut (HGI, 2017) je proveo detaljno hidrogeološko zoniranje šireg područja prihranjivanja izvorišta desne obale donjeg toka Neretve u Hrvatskoj te priobalja, u okviru koga je sagledavano i područje prihranjivanja glavnih izvorišta toga područja – izvora Prud, Klokun, Mandine Mlinice i izvora Modro oko. No, zbog kompleksnosti hidrogeoloških i hidroloških odnosa na analiziranom području, sliv Modrog oka nije posebno izdvajan, već je dan objedinjeno sa slivom izvora Klokun, te gornjim dijelovima sliva izvora Prud, koji se prihranjuju i vodama sliva Trebižata u susjednoj Bosni i Hercegovini (Slika 2.1).



Slika 2.1. Hidrogeološka karta slivnog područja izvorišta Prud, Modro oko, Klokun i Mandina mlinica.

1 stalni izvor 2 povremeni izvor 3 estavela 4,5 izvori različite izdašnosti 7 primitivni vodozahvat 8 zahvat vode za javnu vodoopskrbu 9 podzemni tok 10 granica sliva 11 pretpostavljena granica sliva 12-14 površinski tokovi 16 poplavna područja, močvare 17 naselje 18 državna granica 19 položaj sloja 20 normalna lithostratigrafska granica 21 erozisko-discordantna geološka granica 22 normalni rasjed 23 reversni rasjed (Croatian Geological Survey, 2017)

Kako bi se mogli dobiti barem orijentacijski podaci o tome koliko je neposredno područje prihranjivanja izvora Modro oko, te procijeniti bilančni međuodnosi, na osnovu spomenute hidrogeološke podloge HGI-a (2017), u okviru predmetnih istraživanja vezanih uz Modro oko provedeno je izdvajanje neposrednog slivnog zaleđa Modrog oka (Slika 2.2). Radi se dakle o samo dijelu njegova sliva, no koji bitno utječe na dinamiku režima istjecanja njegovih voda. Površina tako izdvojenog sliva, koji se nalazi između slivova izvora Prud i Klokun i s kojim dijeli dio zajedničkog područja prihranjivanja iznosi oko 29 km².



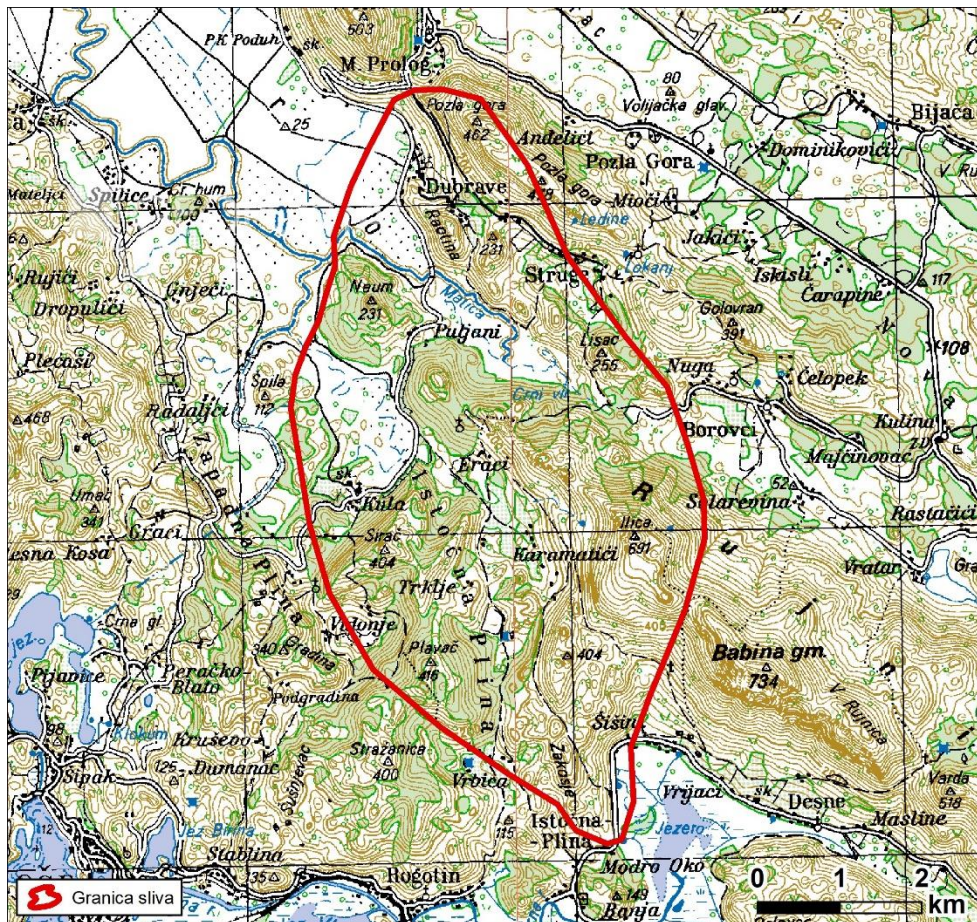
Slika 2.2. Neposredni sliv Modrog oka, izdvojen na hidrogeološkoj karti – prema HGI (2017)

Izvor Prud je glavni izvor regionalnog vodoopskrbnog sustava NPKLM (Neretva – Pelješac – Korčula – Lastovo – Mljet) s kojim se napaja više podsustava. Instalirani kapacitet na vodozahvatu je 382 L/s, a voda se zahvaća na koti od 2,3 m n.m. (IGH i Hidroing, 2009). No, vodni potencijal toga izvora je daleko značajniji, pa mu je prosječna izdašnost procijenjena na oko 6 m³s⁻¹, a minimalna na oko 2 m³s⁻¹ (Građevinski fakultet u Rijeci, 2015).

Izvor Klokun istječe oko 220 m istočno od Baćinskih jezera, također u vidu jezerskog oka čije preljevne količine otječu u Plitko jezero. Srednji godišnji protok tog izvora iznosi oko 1,5 m³s⁻¹ (Rubinić, 2015), a minimalni oko 100-200 L/s. Instalirani kapacitet zahvata iznosi 170 L/s, a voda se zahvaća na koti od oko 2,5 m n.m. (IGH i Hidroing, 2009).

Baćinska jezera prihranjuju se kako s preljevnim vodama izvora Klokun, tako i vodama Matice Vrgorske koje dotječu tunelom te vlastitim vodama nekoliko manjih izvora koji su locirani uz

obalu jezera, tako da je srednji godišnji protok na izlazu iz jezera oko $10,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Rubinić, 2015). Prikaz izdvojenog neposrednog sliva izvora Modro oko dan je na Slici 2.3.



Slika 2.3. Izdvojeni neposredni sliv Modrog oka

2.2. Korištenje voda s Modrog oka

Korištenje voda s izvora Modro oko je u današnje vrijeme iznimno manje nego li u vrijeme kad je taj izvor bio korišten za navodnjavanje hidromelioracijskih površina u dolini Neretve s nažalost nedovoljno poznatim crpnim kapacitetom i količinama zahvaćenih voda. Prema navodima iz projektnog zadatka, kapacitet zahvaćenih količina voda za potrebe navodnjavanja iznosio je 250 l/s. U sklopu Vodnogospodarskog rješenja i uređenja sliva Donje Neretve (Građevinski fakultet u Splitu, 1996) navodi se pak da je crpna postaja na izvoru Modro oko izgrađena 1962.g., s kapacitetom od 150 L/s. Osim za navodnjavanje, do izgradnje regionalnog vodovoda s zahvatom na izvoru Prud, koristila se i za vodoopskrbu Opuzena (Štambuk-Giljanović, 1998). U današnje vrijeme voda s izvora Modro oko se koristi za vodoopskrbu naselja Desne s kapacitetom od 7 L/s. No, planira se proširenje korištenja voda toga izvora u vodoopskrbi do oko 250 L/s (s IGH i Hidroing, 2009; prema Akvaproyekt i Hidroekspert, 2002). Pregled mjesečnih količina crpljenja za razdoblje 1.2015.- 9.2020., koje su bitno manje od navedenih informacija u spomenutim dokumentima, dan je u Tablici 2.1.

Tablica 2.1. Mjesečne količine crpljenih voda (L/s) s izvora Modro oko (1.2015. – 9.2020.) - prema podacima Izvor Ploče

Mjesec / godina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	God
2015	0,44	0,51	0,477	0,47	0,52	0,53	0,57	0,59	0,62	0,55	0,51	0,49	0,52
2016	0,43	0,49	0,45	0,48	0,47	0,48	0,50	0,51	0,51	0,51	0,46	0,43	0,48
2017	0,51	0,77	0,72	0,88	0,61	1,05	1,06	1,08	1,08	1,03	1,06	1,00	0,90
2018	1,01	1,05	1,11	1,28	1,19	1,04	1,11	0,74	0,94	1,06	1,06	1,12	1,06
2019	1,17	0,67	0,70	0,89	0,72	0,84	1,24	1,27	0,64	0,46	0,24	0,33	0,76
2020	0,33	0,35	0,32	0,35	0,35	0,35	0,58	0,64	0,72				
Sr	0,65	0,64	0,63	0,72	0,64	0,72	0,84	0,81	0,75	0,72	0,67	0,67	0,75
Max	1,17	1,05	1,11	1,28	1,19	1,05	1,24	1,27	1,08	1,06	1,06	1,12	1,06
Min	0,33	0,35	0,32	0,35	0,35	0,35	0,50	0,51	0,51	0,46	0,24	0,33	0,48

Iz danih podataka vidljiv je sezonski karakter korištenja voda, ali s nekim neuobičajenim izuzecima - npr., da je u kolovozu 2018. bila najmanja mjesečna količina crpljenja u odnosu na sve druge mjesece te godine, kao i bitno manje količine zahvaćenih voda u razdoblju od rujna 2019., a što koincidira s početkom uspostave monitoringa u sklopu predmetnog zadatka. Prosječno srednje godišnje crpljenje iznosi 0,75 L/s, a prosječno tijekom mjeseca srpnja kada su potrebe za vodom u prosjeku najveće 0,84 L/s. Na osnovu dnevnih podataka crpljenih količina iz razdoblja nakon uspostave monitoringa, maksimalne dnevne količine zahvaćenih voda iznosile su 221 m³, odnosno svega 2,6 L/s.

2.3. Batimetrija Modrog oka

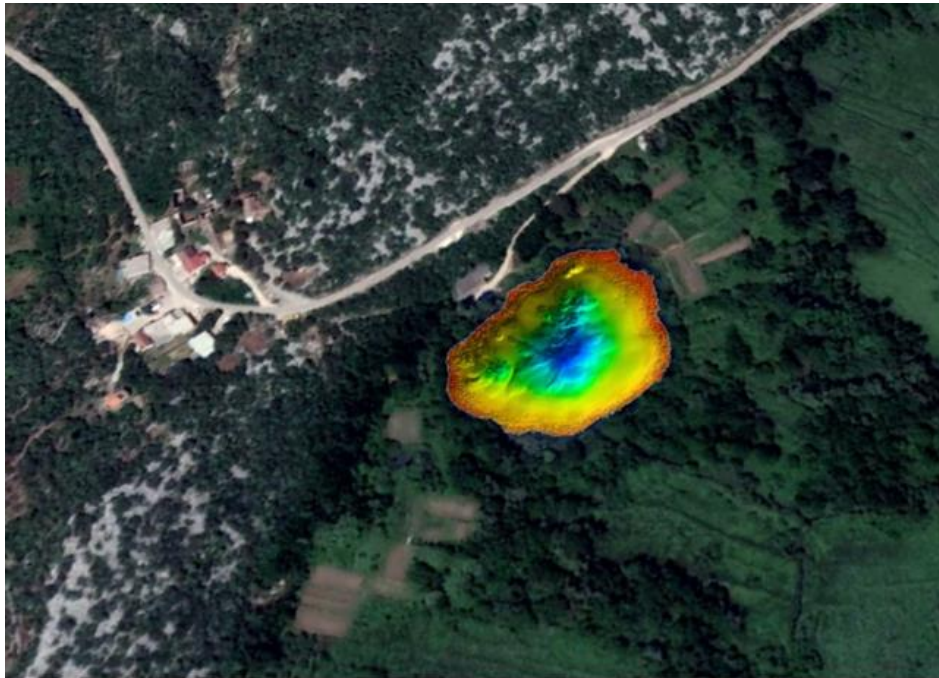
Modro oko je kriptodepresija, na čijem dnu istječu podzemne vode. Da bi se utvrdila geometrija toga izvora, u sklopu predmetnog projekta, dne 9.10.2019., proveden je njegov batimetrijski premjer od strane tvrtke TRIPODIJ d.o.o. (cjeloviti izvještaj o provedenom premjeru dan u prilogu ovog dokumenta – točka 8). Premjer je proveden u uvjetima kolebanja razine vode u ukupnoj amplitudi od 4 cm, pri srednjem vodostaju od -4 cm u odnosu na vodokaznu letvu prikazanu na Slici 1.6, odnosno pri koti od 0,21 m n.m. u HVRS71 visinskom sustavu koja je kontrolirana pri provedenom batimetrijskom premjeru. Samo područje obuhvata dano je na Slici 2.4 s naznačenim položajem vodozahvata gdje je postavljena mjerna sonda.



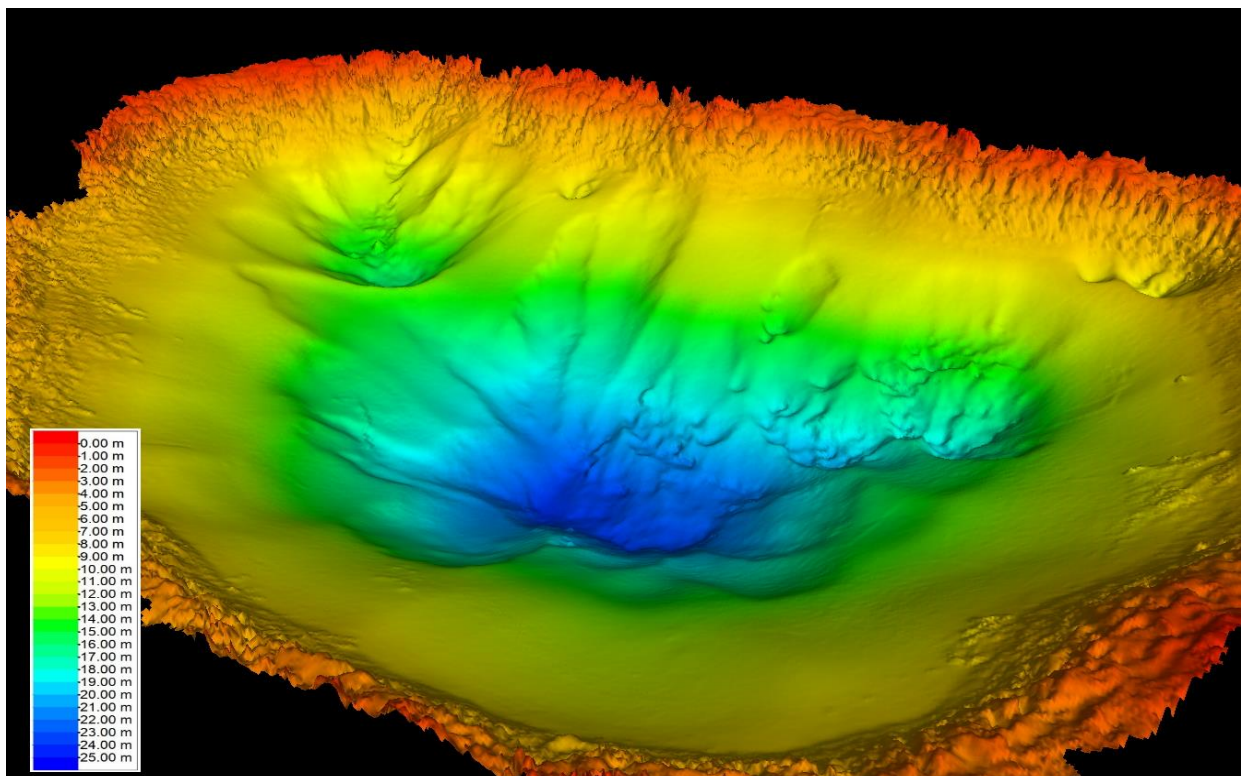
Slika 2.4. Situacijski položaja Modrog oka s prikazom vodozahvata (markirano žutim krugom) i mjestima najnižih smjerova prelijevanja vode iz jezera (plave strelice)

Prema rezultatima batimetrijskih snimanja, najveća relativna dubina jezerskog oka je 23,57 ispod kote 0 m n.m. i locirana je u središnjem dijelu kriptodepresije. U danim uvjetima razine vode u vrijeme snimanja, površina jezera/izvorskog oka iznosila je 1,06 ha, a opseg oko 400 m.

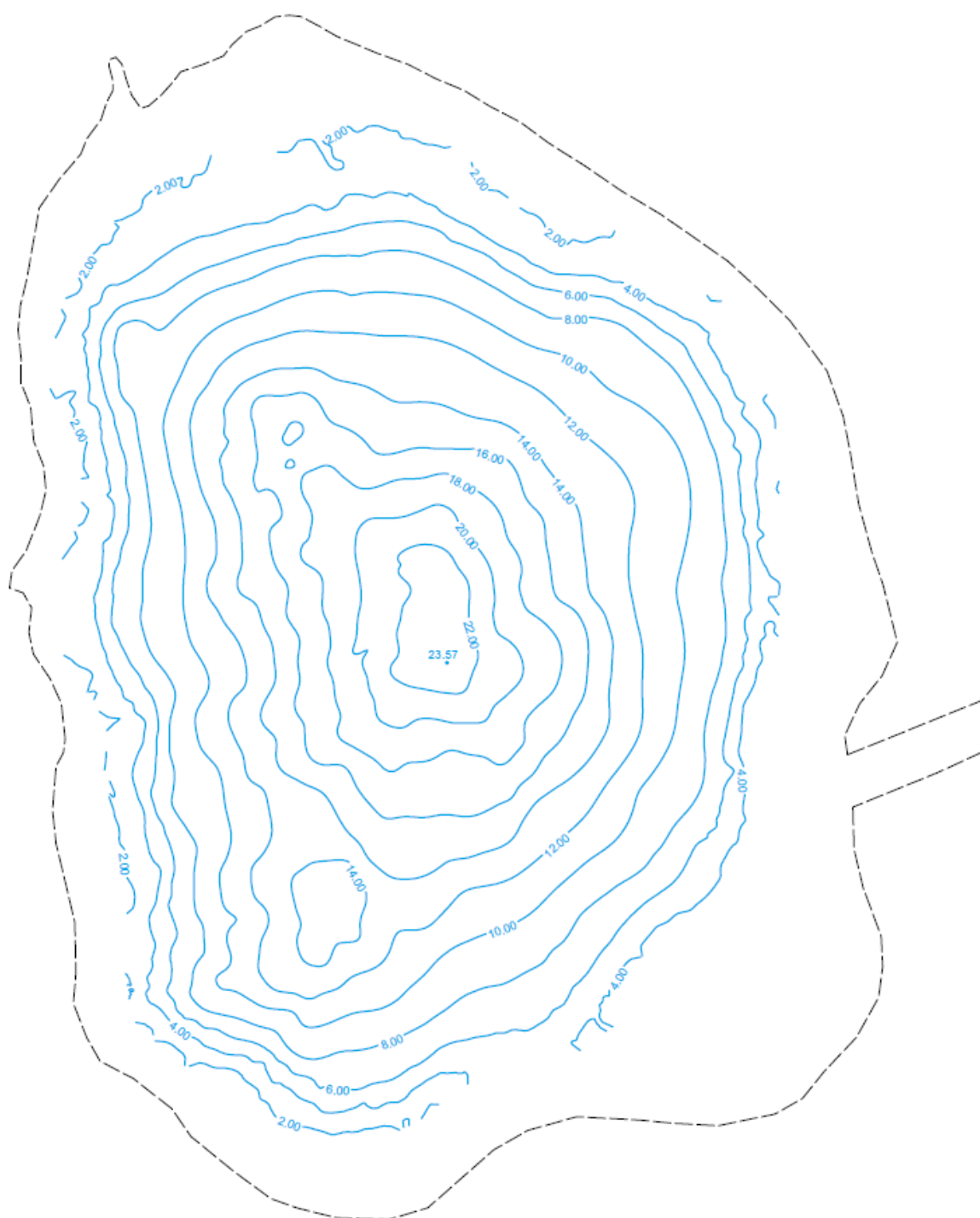
Prikaz položaja Modrog oka sa snimljenim digitalnim modelom dna jezera dan je na Slici 2.5, trodimenzionalni prikaz dna jezera dan je na Slici 2.6, a izobata na Slici 2.7.



Slika 2.5. Prikaz položaja Modrog oka i digitalnog modela njegova dna



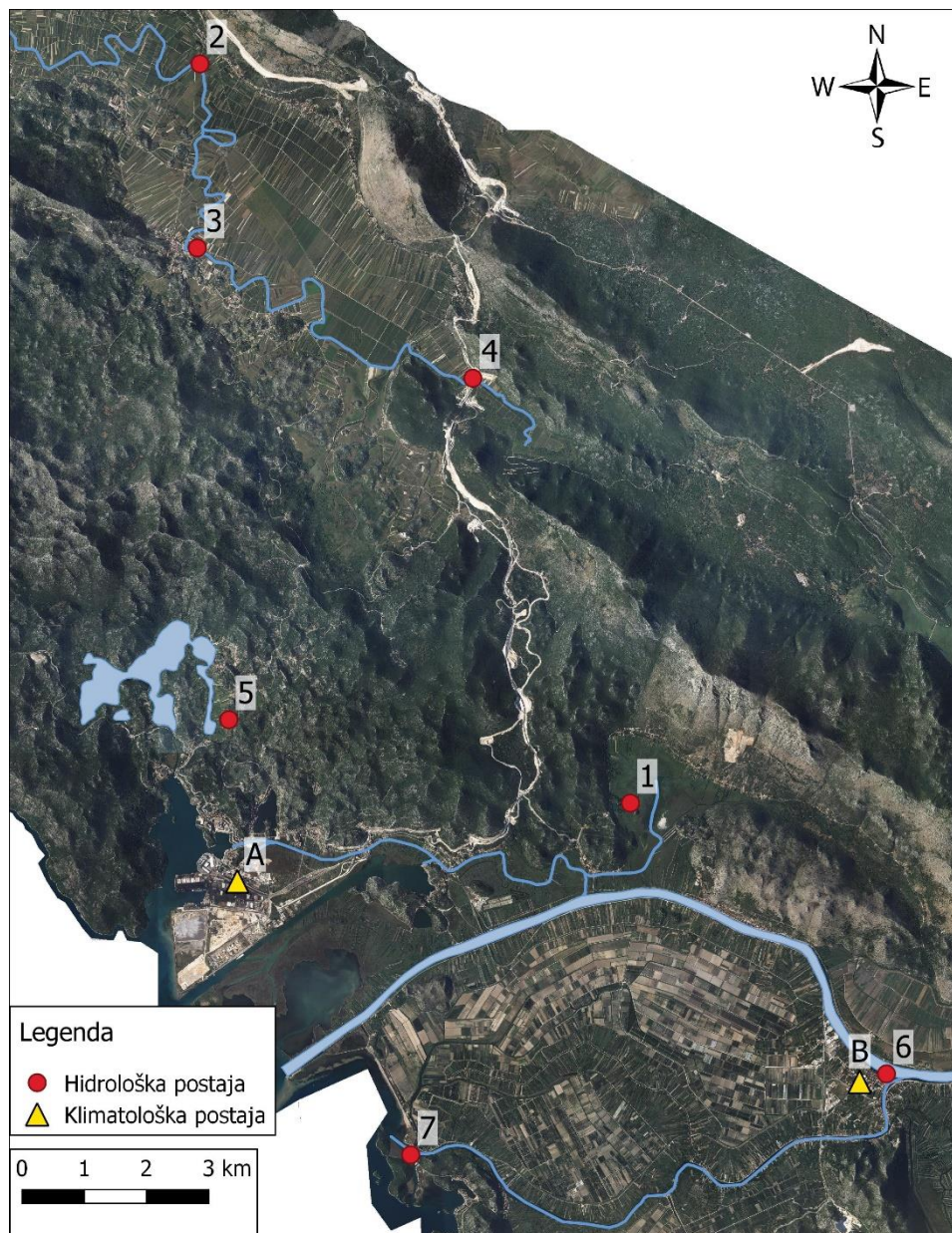
Slika 2.6. Trodimenzionalni prikaz dna Modrog oka



Slika 2.7. Prikaz izobata Modrog oka (dubine dane u odnosu na razinu 0 m n.m., a kontura ruba jezera odnosi se na razinu od jezera pri koti od 0,21 m n.m. u HVR571 visinskom sustavu

3. Osnovna analiza hidroloških podataka

Mreža hidrološkog monitoringa na istraživanom području prikazana je na Slici 3.1, na kojoj su označene hidrološke postaje čiji su višegodišnji nizovi podataka korišteni u danom dokumentu. Radi se o hidrološkim postajama Modro oko, Dusina – Matica Vrgorska, Staševica – Matica Vrgorska, Otok brana nizv. – Matica Vrgorska, Baćina – Klokun, Opuzen – Neretva, Ustava ušće nizv. – Mala Neretva, te klimatološkim postajama Ploče (43°2'51" N, 17°26'34" E) i Opuzen (43°01' N, 17°34' E). Postaja Modro oko ukinuta je 2012. godine. Pregled raspoloživih podataka na svim spomenutim postajama dan je u Tablici 3.1.

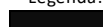
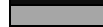



Slika 3.1. Lokacije hidroloških i klimatoloških postaja na istraživanom području Modrog oka čiji su podaci korišteni u danoj studiji - hidrološke postaje: 1 – Modro oko, 2 – Dusina – Matica Vrgorska, 3 – Staševica – Matica Vrgorska, 4 - Otok brana nizv. – Matica Vrgorska, 5 – Baćina – Klokun, 6 – Opuzen – Neretva, 7 – Ustava ušće nizv. – Mala Neretva; klimatološke postaje: A – Ploče, B – Opuzen

Tablica 3.1. Pregled raspoloživih podataka o vodostajima (H) i protocima (Q) na postajama unutar istraživnog područja

Stanica	Hidrološke postaje							Klimatološke postaje	
	Modro oko	Dusina	Staševica	Otok brana nizv.	Baćina	Opuzen	Ustava ušće nizv.	Ploče	Opuzen
Vodotok	Modro oko	Matica Vrgorska	Matica Vrgorska	Matica Vrgorska	Klokun	Neretva	Mala Neretva/more		
Šifra	7056	7012	7151	7210	7126	7062	7499		
1945						H			
1946						H			
1947						H			
1948						H			
1949						H			
1950						H			
1951						H			
1952						H			
1953						H			
1954		H				H			
1955		H				H			
1956		H				H			
1957		H				H			
1958		H				H			
1959		H				H			
1960		H				H			
1961		H				H			
1962		H				H			
1963		H	H			H			
1964		H	H			H			
1965		H	H			H			
1966		H	H			H			
1967		H	H			H			
1968		H	H			H			
1969	H	H	H			H			
1970	H	H	H			H			
1971	H	H	H			H			
1972	H	H	H			H			
1973	H	H	H		H	H			
1974	H	H	H		H	H			
1975	H	H	H		H	H			
1976	H	H	H		H	H			
1977	H	H	H		H	H	H		
1978	H	H	H		H	H	H		
1979	H	H	H		H, Q	H	H		
1980	H, Q	H	H		H, Q	H	H		
1981	H, Q	H	H		H, Q	H	H		
1982	H, Q	H	H		H, Q	H	H		
1983	H, Q	H	H	H	H, Q	H	H		
1984	H, Q	H	H		H, Q	H	H		
1985	H, Q	H	H	H	H, Q	H	H		
1986	H, Q	H	H	H	H, Q	H	H		
1987	H, Q	H	H	H	H, Q	H	H		
1988	H, Q	H	H	H	H, Q	H	H		
1989	H, Q	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
1990	H, Q	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
1991	H, Q	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
1992	H	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
1993	H	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
1994	H	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
1995	H, Q	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
1996	H, Q	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
1997	H, Q	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
1998	H, Q	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
1999	H, Q	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
2000	H, Q	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
2001	H, Q	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
2002	H, Q	H, Q	H	H	H	H	H		
2003	H, Q	H, Q	H	H	H	H	H		
2004	H, Q	H, Q	H	H	H	H	H		
2005	H, Q	H, Q	H	H	H	H	H		
2006	H, Q	H, Q	H	H	H	H	H		
2007	H, Q	H, Q	H	H	H	H	H		
2008	H, Q	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
2009	H, Q	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
2010	H	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
2011	H	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
2012	H	H, Q	H	H	H, Q	H	H		
2013		H, Q	H	H	H, Q	H	H		
2014		H, Q	H	H	H, Q	H	H		
2015		H, Q	H	H	H, Q	H	H		
2016		H, Q	H	H	H, Q	H	H		
2017		H, Q	H	H	H, Q	H	H		
2018		H, Q	H	H	H, Q	H	H		
2019		H	H	H	H	H	H		

Legenda:

	Svi podaci	H	Vodostaj
	Djelomično podaci	Q	Protok
	Nema podataka		

3.1. Osnovne klimatološke značajke

Pri analizama oborinskog režima korišteni su podaci s meteorološke postaje Ploče (1969. – 2019.) i kišomjerne postaje Opuzen (1961. – 2019.) koje se obje nalaze na nadmorskoj visini od 2 metra. Rezultati osnovne statističke obrade podataka (Sr – srednja vrijednost niza, Stdev – standardna devijacija, Cv – koeficijent varijacije, Max i Min – ekstremne registrirane vrijednosti unutar analiziranog niza srednjih mjesečnih ili godišnjih vrijednosti) o oborinama na spomenute dvije postaje dani su u Tablici 3.2. Radi usporedbe, u tablici su dani i podaci o oborinama tijekom 2019. godine, kao i o oborinama na postaji Ploče od siječnja do listopada 2020. godine.

Tablica 3.2. Karakteristične mjesečne i godišnje vrijednosti oborina (mm) na postajama Ploče i Opuzen

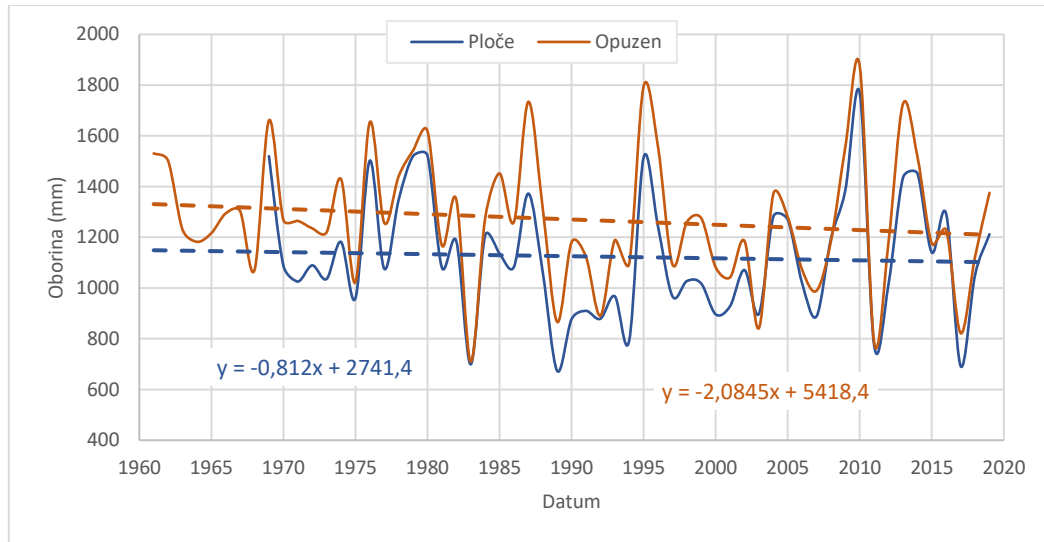
Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God
Ploče (1969. - 2019.)													
Sr	122,6	106,2	102,6	90,5	62,1	51,0	30,2	58,0	93,8	113,7	153,9	137,6	1122,2
Stdev	72,3	75,2	69,4	43,9	43,0	47,0	34,8	61,5	65,2	78,6	75,8	91,0	245,2
Cv	0,59	0,71	0,68	0,49	0,69	0,92	1,15	1,06	0,70	0,69	0,49	0,66	0,22
Max	285,9	365,9	277,4	203,3	226,4	242,7	162,5	234,5	261,6	325,1	332,7	344,0	1768,0
Min	3	4,0	0,2	10,4	7,5	1,9	0,0	0,0	2,5	0,0	42,7	0,0	673,5
2019	182	79,6	34,9	129,9	121,8	5,9	37,2	4,4	102,2	35,8	329,9	148,8	1212,2
2020	38	28,3	43,2	24,3	20,9	46,9	6,1	75,7	128,6	69,1			
Opuzen (1961. - 2019.)													
Sr	137,8	117,5	110,3	101,8	68,4	56,9	36,5	60,8	103,9	137,6	178,9	159,7	1270,3
Stdev	86,2	85,7	75,2	53,0	46,2	49,2	41,0	60,9	72,8	98,6	95,8	110,8	254,3
Cv	0,63	0,73	0,68	0,52	0,68	0,86	1,12	1,00	0,70	0,72	0,54	0,69	0,20
Max	329,8	379,1	363,3	231,2	225,7	243,3	204,6	256,3	338,7	421,6	408,9	472,2	1874,0
Min	0	1,6	0,0	8,3	5,8	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	37,7	0,0	710,3
2019	204	80,2	49,2	155,6	134,6	4,1	89,3	3,7	129,4	24,3	343,3	157,5	1375,3

* Žuta kućica - podaci dobiveni korelacijom preko postaje Ploče

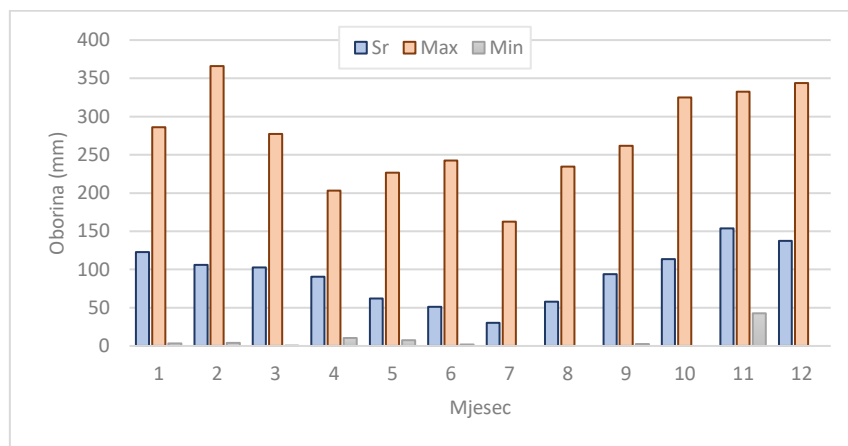
Srednja ukupna godišnja oborina na postaji Ploče (1969.-2019.) iznosi 1122,2 mm, a na postaji Opuzen (1961.-2019.) nešto malo više - 1270,3 mm, ali za dulje vremensko razdoblje s povremenim nekompletnim podacima. Prisutna je vrlo velika varijabilnost, kako po pojedinim mjesecima, tako i na razini godišnjih količina oborina. Godišnje varijacije se kreću u rasponu između 673,5 i 1768,0 mm na postaji Ploče, te između 710,3 i 1874,0 mm na postaji Opuzen. 2019. godina, u kojoj je započet dopunski monitoring u sklopu ovoga projekta, bila je nešto malo vodnija (oko 100 mm) od višegodišnjeg prosjeka. No, vidimo da je studeni 2019. bio čak dvostruko vodniji od višegodišnjeg prosjeka te je skoro dosegao maksimalnu mjesečnu vrijednost oborina (svega 3 mm manje od višegodišnjeg prosjeka na postaji Ploče).

Razmotreni su i trendovi hoda godišnjih količina oborina na analiziranim postajama (Slika 3.2). Iz prikaza je vidljivo da postaje Ploče i Opuzen imaju vrlo sličan trend, koji praktički stagnira na postaji Ploče (8,1 mm/10 god) te blago opada na postaji Opuzen (oko 21 mm/10 god). Za postaju Ploče na kojoj nije bilo prekida u motrenjima prikazana je i njihova unutar godišnja raspodjela (Slika 3.3) iz koje je vidljivo da dominiraju oborine od studenog do siječnja, a da su

u prosjeku najmanje u srpnju. Mjeseci s minornim količinama oborina (ispod 10 mm) ili potpuno bez njih mogu se javiti tijekom cijele godine, s izuzetkom mjeseca studenog, kada su zabilježene minimalne oborine od oko 43 mm, što je prilično puno za minimalne količine. Najvodnija godina bila je 2010. na obje postaje, dok je najsušnija na postaji Ploče bila 1989., a na postaji Opuzen 1983.



Slika 3.2. Hod karakterističnih godišnjih vrijednosti zabilježenih količina oborina na postajama Ploče i Opuzen



Slika 3.3. Unutar godišnja raspodjela srednjih, maksimalnih i minimalnih količina oborina na postaji Ploče (1969. – 2019.)

3.2. Osnovne hidrološke značajke

3.2.1. Vodostaji

Analizirani su višegodišnji nizovi podataka o vodostajima s odabranih hidroloških postaja na istraživanom području (Slika 3.1 i Tablica 3.1). Osnovni statistički pokazatelji (srednja vrijednost Sr , standardna devijacija $Stdev$, koeficijent varijacije Cv , srednji mjesečni ekstremi Max i Min i apsolutni mjesečni ekstremi MAX i MIN) srednjih mjesečnih i godišnjih vodostaja prikazani su u Tablicama 3.3 i 3.4. U Tablici 3.3 dani podaci o vodostajima iskazani su u apsolutnim kotama zbog toga što se radi o postajama koje su visinski locirane u blizini morske razine, pa ista utječe na dinamiku njihova kolebanja, dok su u Tablici 3.4. vodostaji s postaja u slivu Matice Vrgorske dani u relativnim visinama kakve su vezane uz njihova očitavanja na vodokaznoj letvi iz razloga što se radi o kolebanjima razina vode na puno većim hipsometrijskim visinama.

Za napomenuti je da su prilikom provedenih usporedbi u apsolutnim razinama vode i mora korišteni podaci o kotama „0“ vodokaznih letvi koje su dane u bazi podataka DHMZ-a. Taj se podatak kod Modrog oka razlikuje od podatka dobivenog prilikom kontrole provedene u listopadu 2019.g. prilikom provedenog batimetrijskog snimanja dna Modrog oka. Prema podatku DHMZ-a, kota „0“ vodokazne letve na Modrom oku je 0,38 m n.m., a prilikom batimetrijskog premjera iz listopada 2019. utvrđena je kota od 0,25 m n.m. prema visinskom sustavu HVRS71, dok je prema ranijem HVRS1875 („Trst“) ona 0,58 m n.m. Kako su kod sagledavanja dinamike kolebanja razina mora i vode u koritu Neretve i na izvorištu Modro oko važni relativni međuodnosi između tih visina, prilikom provedenih analiza korišteni su službeni podaci DHMZ-a kod svih četvero postaja.

Na dinamiku kolebanja razina, kao i protjecanja voda, utjecaj imaju i hidrotehnički zahvati provedeni na širem analiziranom području. Tako je za odvođenje voda iz Vrgorskog polja u Baćinska jezera 1938.g. prokopan hidrotehnički tunel duljine 2.130 m, a koji je 1973.g. produbljen za prosječno 1,7 m. Time mu je njegova propusna moć dvostruko porasla s $22 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ na $44 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. (IEE, 2007), te je smanjeno trajanje poplavlivanja na južnom, povremeno poplavljenom dijelu Vrgoračkog polja, kao i količine infiltriranih voda u ponorsku zonu.

Na Slici 3.4. dan je prikaz hoda karakterističnih godišnjih vodostaja Modrog oka tijekom razdoblja 1970. – 2011. iz kojih se vidi da je trend stagnirajući. No, uočljivo je da je početkom devedesetih došlo do blago izražene promjene stanja hidroloških prilika, te relativnog povećanja razina kao posljedice prestanka crpljenja za potreba navodnjavanja, a moguće dijelom i porasta obraštenosti kanala s kojima se preljevne protoke Modroga oka odvede nizvodnije. No, sušna 2010. i iznimno sušna 2011., su utjecale da je trend porasta protoka svega oko 0,4 cm/10 god kod maksimalnih i srednjih godišnjih vodostaja, te oko 2 cm/10 god kod minimalnih.

Za napomenuti je da za postaju Otok brana nizv. na Matici Vrgorskoj, na kojoj se bilježe povremene razine vode u ponorskoj zoni Vrgoračkog polja koje imaju potencijalni utjecaj na prihranjivanje sliva Modroga oka, nisu mogli biti dani srednji godišnji vodostaji zbog periodičnog presušivanja protoka, pa su radi ilustracije stanja hidroloških prilika po pojedinim godinama dani podaci o maksimalnim zabilježenim razinama vode.

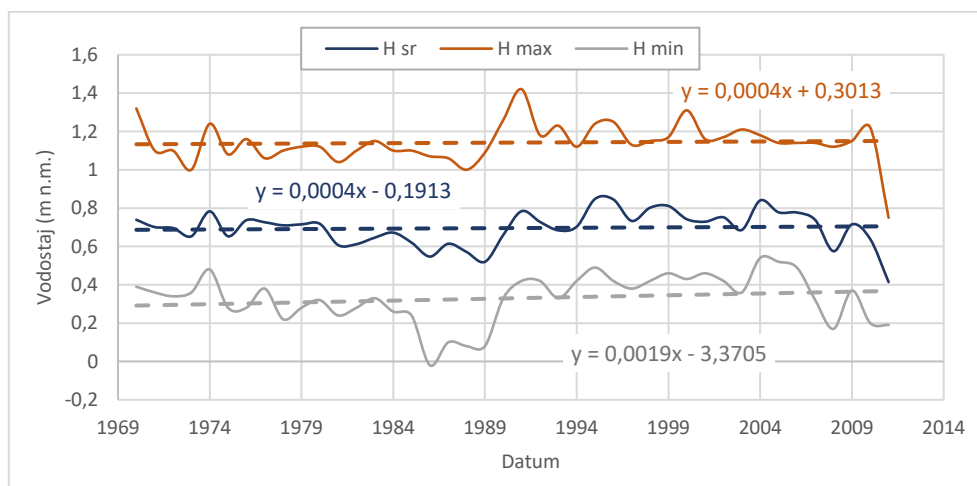
Također i postaje u slivu Matice Vrgorske imaju generalni trend stagnacije srednjih godišnjih vodostaja (Slika 3.5), dok vodostaj mora i Neretve na njenom ušću (Slika 3.6) imaju trend blagog porasta uvjetovan globalnim podizanjem razine mora. Kod izvora Klokun izražen je trend opadanja vodostaja zbog utjecaja crpljenja.

Tablica 3.3. Karakteristični mjesečni i godišnji podaci o prosječnim mjesečnim i godišnjim vodostajima (m n.m.) s hidroloških postaja na istraživanom području

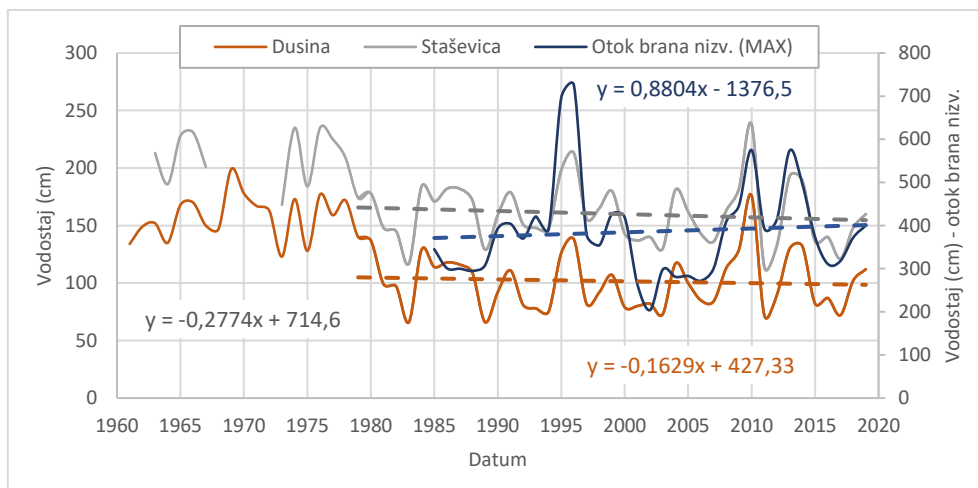
Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God
Modro oko (1970. - 2011.) - kota "0" = 0,380 m n.m.													
Sr	0,82	0,79	0,78	0,79	0,71	0,60	0,53	0,50	0,53	0,66	0,79	0,86	0,70
Stdev	0,19	0,19	0,14	0,13	0,13	0,11	0,10	0,11	0,17	0,19	0,19	0,16	0,09
Cv	0,23	0,24	0,19	0,16	0,18	0,18	0,19	0,22	0,31	0,29	0,25	0,19	0,13
Max	1,11	1,02	1,05	0,99	0,97	0,84	0,71	0,75	0,94	1,02	1,07	1,14	0,85
Min	0,21	0,14	0,44	0,42	0,46	0,37	0,30	0,23	0,22	0,28	0,32	0,50	0,41
MAX	1,32	1,18	1,17	1,18	1,14	1,04	1,17	0,94	1,12	1,28	1,42	1,31	1,42
MIN	0,13	0,08	0,32	0,35	0,33	0,32	0,23	0,17	0,11	0,08	-0,02	0,35	-0,02
Bačina - Klokun (1972. - 2019.)- kota "0" = 0,143 m n.m.													
Sr	2,86	2,86	2,80	2,78	2,51	2,15	1,92	1,87	2,00	2,35	2,73	3,00	2,49
Stdev	0,54	0,47	0,40	0,34	0,38	0,38	0,21	0,20	0,32	0,49	0,48	0,48	0,20
Cv	0,19	0,16	0,14	0,12	0,15	0,18	0,11	0,11	0,16	0,21	0,18	0,16	0,08
Max	3,91	3,64	3,62	3,41	3,36	2,98	2,66	2,70	3,04	3,48	3,76	3,94	2,88
Min	1,75	1,79	1,91	1,96	1,76	1,60	1,57	1,55	1,65	1,65	1,59	1,95	2,09
MAX	4,20	3,94	3,92	3,76	4,12	3,48	3,70	3,50	3,98	4,06	4,10	4,18	4,20
MIN	1,68	1,58	1,58	1,70	1,36	1,50	1,48	1,50	1,50	1,56	1,36	1,64	1,36
Opuzen - Neretva (1945. - 2019.) - kota "0" = -0,180 m n.m.													
Sr	0,65	0,60	0,56	0,58	0,51	0,41	0,37	0,37	0,40	0,50	0,66	0,73	0,53
Stdev	0,27	0,25	0,25	0,19	0,15	0,10	0,08	0,07	0,09	0,15	0,23	0,31	0,09
Cv	0,42	0,41	0,44	0,33	0,30	0,25	0,20	0,19	0,23	0,31	0,34	0,43	0,18
Max	1,39	1,17	1,35	1,27	1,08	0,63	0,56	0,53	0,65	1,04	1,19	1,75	0,87
Min	0,24	0,05	0,10	0,11	0,23	0,15	0,19	0,22	0,23	0,25	0,24	0,18	0,34
MAX	2,62	2,02	2,02	2,40	1,77	1,11	1,00	0,92	1,21	2,48	2,25	2,64	2,64
MIN	-0,06	-0,08	-0,10	-0,16	-0,08	-0,10	-0,10	-0,06	-0,06	-0,04	-0,08	-0,16	-0,16
Ustava ušće nizv. - Mala Neretva (1990. - 2019.) - kota "0" = -0,200 m n.m.													
Sr	0,39	0,37	0,37	0,40	0,40	0,40	0,40	0,41	0,43	0,46	0,49	0,45	0,41
Stdev	0,12	0,12	0,12	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,06	0,08	0,10	0,06
Cv	0,31	0,33	0,33	0,16	0,16	0,15	0,13	0,13	0,14	0,13	0,17	0,23	0,14
Max	0,61	0,63	0,66	0,50	0,54	0,52	0,53	0,49	0,54	0,57	0,72	0,65	0,53
Min	0,12	0,06	0,10	0,26	0,25	0,28	0,31	0,29	0,28	0,33	0,35	0,16	0,30
MAX	1,17	1,13	1,01	0,93	0,97	0,85	0,90	0,88	0,86	1,07	1,20	1,20	1,20
MIN	-0,20	-0,25	-0,10	-0,06	-0,04	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	-0,03	-0,09	-0,25

Tablica 3.4. Karakteristični mjesečni i godišnji podaci o prosječnim mjesečnim i godišnjim vodostajima (cm) s hidroloških postaja u slivu Matice Vrgorske

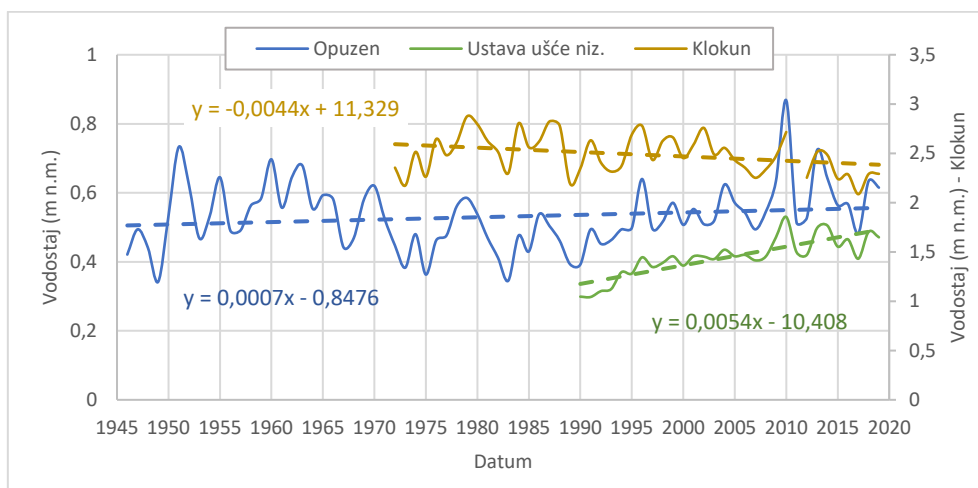
Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God
Dusina - Matica Vrgorska (1955. - 2019.)													
Sr	182	167	157	138	94	66	60	64	71	102	164	198	120
Stdev	112	92	84	55	51	36	25	24	47	73	84	92	35
Cv	0,61	0,55	0,54	0,40	0,54	0,55	0,42	0,38	0,67	0,72	0,51	0,47	0,29
Max	514	429	414	246	263	148	133	129	184	333	345	400	199
Min	-5	-23	-21	22	16	5	13	20	2	8	-12	17	66
MAX	584	541	488	385	380	313	409	241	407	440	475	508	584
MIN	-24	-31	-29	-28	0	1	-3	0	-16	-25	-29	-28	-31
Staševica - Matica Vrgorska (1963. - 2019. bez 1969.-1972.)													
Sr	232	215	199	185	145	115	110	111	118	155	210	256	171
Stdev	113	87	72	55	52	34	23	25	46	72	84	103	33
Cv	0,49	0,40	0,36	0,30	0,36	0,30	0,21	0,22	0,39	0,46	0,40	0,40	0,19
Max	628	397	356	283	315	197	177	194	242	400	415	536	238
Min	62	36	55	67	59	57	70	56	52	51	52	66	114
MAX	693	555	502	451	415	348	431	310	477	510	514	640	693
MIN	33	29	36	46	54	42	12	38	28	34,0	25	31	12
Otok brana nizv. - Matica Vrgorska (1983. - 2019.)													
Sr	225	206	208	187	165	139	120	116	121	143	193	241	176
Stdev	100	75	74	36	25	22	20	20	22	29	50	87	34
Cv	0,45	0,36	0,35	0,19	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,20	0,26	0,36	0,19
Max	603	436	460	270	220	183	173	180	158	210	295	561	255
Min	117	107	99	92	SUHO	SUHO	SUHO	SUHO	SUHO	104	110	143	145
MAX	725	574	561	442	280	224	198	196	376	373	520	696	725
MIN	SUHO	SUHO	SUHO	SUHO	SUHO	SUHO	SUHO	SUHO	SUHO	SUHO	SUHO	SUHO	SUHO



Slika 3.4. Hod karakterističnih godišnjih vrijednosti srednjih, maksimalnih i minimalnih vodostaja (m n.m.) zabilježenih na postaji Modro oko (1970.-2011.) i njihov trend

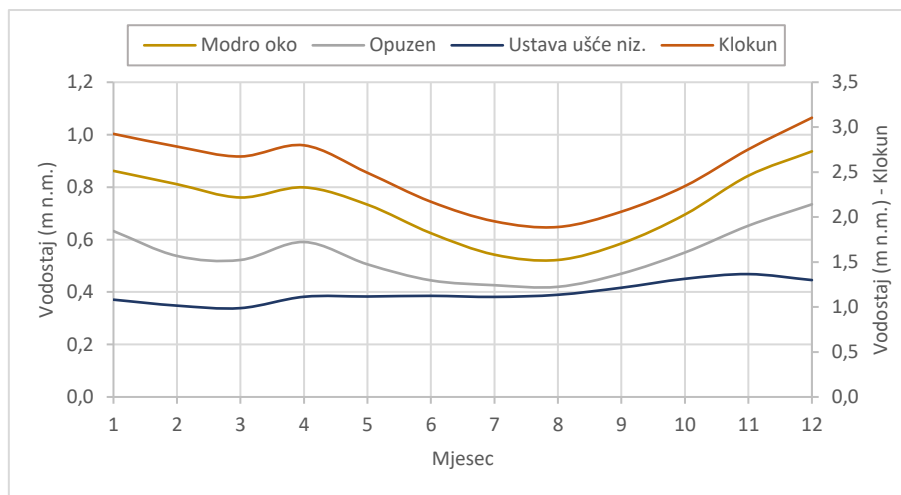


Slika 3.5. Hod srednjih godišnjih vodostaja (cm) na postajama u slivu Matice Vrgorske: Dusina (1961.-2019.), Staševica (1963.-2019.) te maksimalnih godišnjih vodostaja na postaji Otok brana nizv. (1985.-2019.)



Slika 3.6. Hod karakterističnih godišnjih vrijednosti srednjih vodostaja (m n.m.) na postajama Opuzen - Neretva (1946.-2019.), Ustava ušće nizv. – more (1990.-2019.) te Klokun (1972.-79.)

Unutar godišnja raspodjela srednjih mjesečnih vodostaja za postaje Modro oko, Klokun, Opuzen - Neretva i Ustava ušće nizv. – more za zajedničko razdoblje 1990. – 2011. (Slika 3.7) ukazuje na sezonski karakter hoda kolebanja razina vode i mora s minimumima tijekom kolovoza, maksimumima tijekom prosinca i siječnja, te blagim sekundarnim maksimumom tijekom travnja uzrokovanim topljenjima snijega u slivu. Obzirom na okolnost da je taj sekundarni maksimum vidljiv ne samo na kolebanjima vodostaja na Neretvi koja drenira sliv duboko u kontinentalno zaleđe, nego i na samom Modrom oku, može se zaključiti da se on dijelom prihranjuje i vodama iz šireg planinskog zaleđa.



Slika 3.7. Unutar godišnja raspodjela srednjih mjesečnih vodostaja za postaje Modro oko, Klokun, Opuzen - Neretva i Ustava ušće nizv. – more (1990. – 2011.)

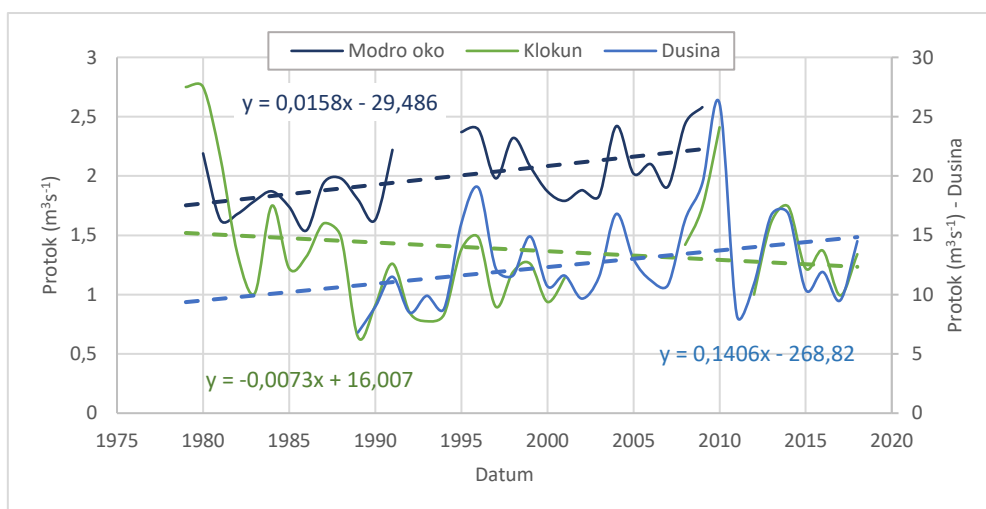
3.2.2. Protoci

Osnovni statistički pokazatelji (srednja vrijednost S_r , standardna devijacija St_{dev} , koeficijent varijacije C_v , srednji mjesečni ekstremi Max i Min i apsolutni mjesečni ekstremi MAX i MIN) srednjih mjesečnih i godišnjih protoka prikazani su u Tablici 3.5.

Na Slici 3.8 dan je prikaz srednjih godišnjih protoka na postajama Modro oko, Klokun i Dusina. Vidimo da je na postajama Modro oko i Dusina prisutan vrlo sličan trend povećanja protoka od $0,16 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/10 \text{ god}$ na postaji Modro oko te $1,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/10 \text{ god}$ na postaji Dusina. Nasuprot tome, na postaji Klokun prisutan je blagi trend opadanja protoka od $0,07 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/10 \text{ god}$ koji bi mogao biti dijelom uvjetovan porastom crpljenih količina voda.

Tablica 3.5. Karakteristični mjesečni i godišnji podaci o prosječnim mjesečnim i godišnjim protocima (m^3s^{-1}) s hidroloških postaja na istraživanom području

Mjesec	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God
Modro oko (1980. - 2009. bez 1992.-94.)													
Sr	2,71	2,43	2,41	2,30	1,98	1,48	1,13	1,06	1,21	1,79	2,46	3,05	2,00
Stdev	0,929	0,859	0,736	0,498	0,617	0,512	0,260	0,275	0,610	0,768	0,752	0,777	0,282
Cv	0,34	0,35	0,31	0,22	0,31	0,35	0,23	0,26	0,50	0,43	0,31	0,26	0,14
Max	4,77	4,21	3,86	2,88	3,26	2,46	1,62	1,86	2,82	3,02	4,16	5,01	2,58
Min	0,741	0,601	0,761	1,21	0,987	0,621	0,519	0,583	0,344	0,464	1,18	1,54	1,54
MAX	6,45	6,27	5,64	4,47	4,22	3,36	2,18	3,01	4,08	5,09	5,92	6,63	6,63
MIN	0,429	0,522	0,468	0,688	0,532	0,51	0,341	0,374	0,216	0,325	0,293	0,578	0,216
Dusina - Matica Vrgorska (1989. - 2018.)													
Sr	21,7	19,1	18,2	14,9	7,97	4,29	2,79	2,98	5,35	9,86	19,8	26,8	12,8
Stdev	15,4	12,7	12,6	7,67	5,86	3,17	1,44	1,54	6,36	7,69	10,5	17,3	4,15
Cv	0,71	0,66	0,69	0,51	0,74	0,74	0,52	0,52	1,19	0,78	0,53	0,65	0,33
Max	60,4	50,9	45,4	30,9	25,9	13,6	7,76	9,24	22,9	25,3	45,9	63,1	26,1
Min	1,13	1,44	2,05	3,14	2,87	1,27	1,36	1,13	0,877	0,749	4,70	1,95	6,81
MAX	97,5	74,3	74,7	66,7	69,3	37,3	21,1	29,1	69,6	72,6	77	123	123
MIN	0,515	0,703	1,13	1,46	1,04	0,828	0,786	0,795	0,601	0,001	0,354	0,216	0,001
Baćina - Klokun (1979. - 2018. bez 2002.-2007.)													
Sr	2,21	2,06	1,98	1,91	1,37	0,70	0,31	0,18	0,39	1,02	1,92	2,45	1,39
Stdev	1,19	1,07	1,00	0,64	0,87	0,75	0,42	0,23	0,58	0,87	0,99	1,19	0,52
Cv	0,54	0,52	0,51	0,33	0,63	1,06	1,39	1,29	1,48	0,86	0,52	0,49	0,38
Max	4,82	4,26	4,2	2,94	4,1	2,73	2,15	1,07	2,21	2,72	4,63	4,54	2,75
Min	0,084	0,037	0,128	0,458	0,156	0,037	0,03	0,013	0,009	0,017	0,214	0,382	0,641
MAX	5,64	5,56	5,51	4,83	7,08	3,67	5,32	2,41	4,21	6,55	6,3	6,64	7,08
MIN	0,041	0,028	0,028	0,07	0,004	0,026	0,014	0,009	0,004	0,002	0	0,032	0



Slika 3.8. Hod srednjih godišnjih protoka na postajama Modro oko (1980.-2009.), Klokun (1979.-2018.) i Dusina (1989.-2018.)

3.3. Elementi vodne bilance

Kako bi se sagledali pojedini elementi vodne bilance Modroga oko, provedena je procjena dotoka koji neposredno prihranjuje taj izvor iz obližnjeg krškog zaleđa (Slika 2.2 i 2.3). Pri tome su za procjenu vodnog potencijala tog dijela sliva Modrog oka korištena dva modelska pristupa: prvi zasnovan na metodologiji predloženoj od strane Turca (1954), te drugi po Langbein-ovoj metodologiji (1962). Turc-ova formula (1954) sadrži deficit otjecanja (D) kao funkciju palih oborina (P) i temperaturnog faktora (L).

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (1)$$

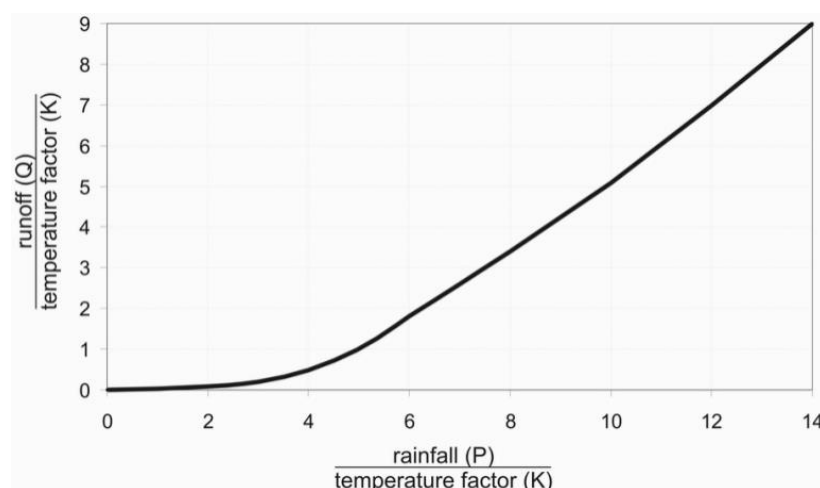
Temperaturni faktor (L) je proračunat pomoću formule:

$$L = 300 + 25 \times T + 0.05 \times T^3 \quad (2)$$

gdje T predstavlja povećanje temperature zraka.

Kao što pokazuje Slika 3.9, Langbein-ova metoda (1962) je zasnovana na međuodnosu između faktora međuodnosa oborina i temperatura (P/K) i faktora odnosa otjecanja i temperatura (Q/K), odnosno ona koristi oborine i temperature zraka kao ključne parametre za procjenu otjecanja. Temperatura zraka (T) je ugrađena u formulu za temperaturni faktor (K) koji se povećava eksponencijalno s porastom temperature:

$$K = 10^{0.0278T + 0.886}$$

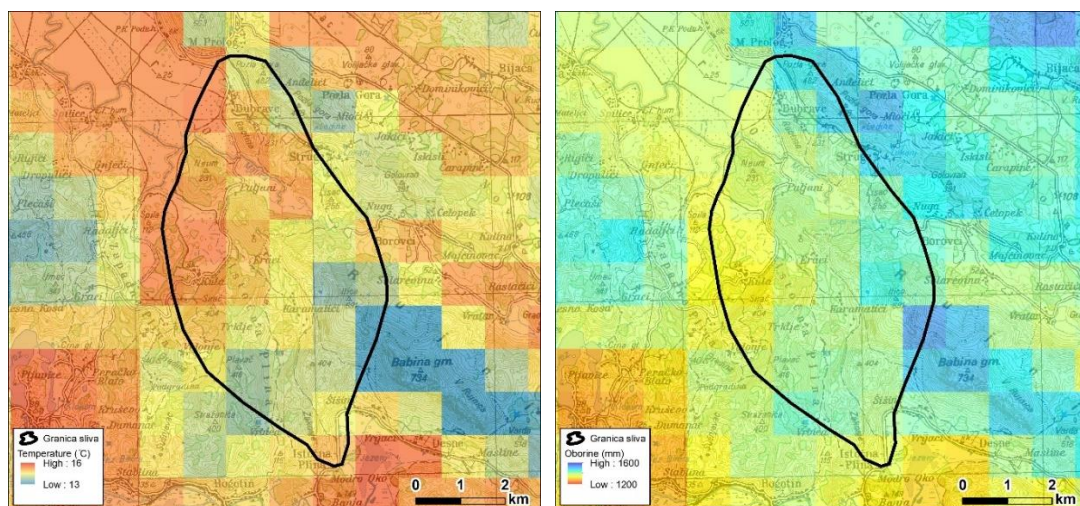


Slika 3.9. Langbein-ova (1962) metoda: odnos između P/K i Q/K

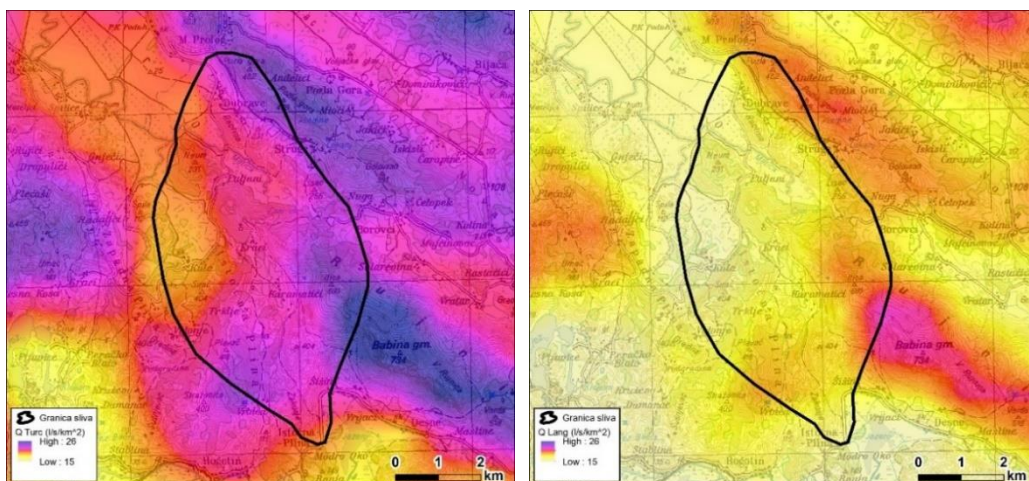
Oba modelska pristupa koriste prosječnu godišnju količina oborina i temperature zraka (često su to i jedini dostupni klimatološki podaci u hidrološkoj analizi otjecanja) kao prostorno promjenjive ulazne parametre. Pri tome geografski informacijski sustavi uvelike olakšava procjenu prostorne raspodjele i prostorne analize ulaznih parametara i rezultata.

Postupak procjene godišnjeg otjecanja počinje s razgraničenjem slivova, na temelju hidrogeoloških procjena, nakon čega slijedi procjena prostorne raspodjele meteoroloških parametara (oborina i temperature). Zatim se provodi procjena prostorne raspodjele prosječnog godišnjeg otjecanja pomoću Turc-ove i Langbein-ove metode. Na temelju tih rezultata provode se usporedbe s mjerenim podacima ako isti postoje ili se provode procjene na temelju značajki nekih drugih vodnih pojava s okolnog regionalnog prostora.

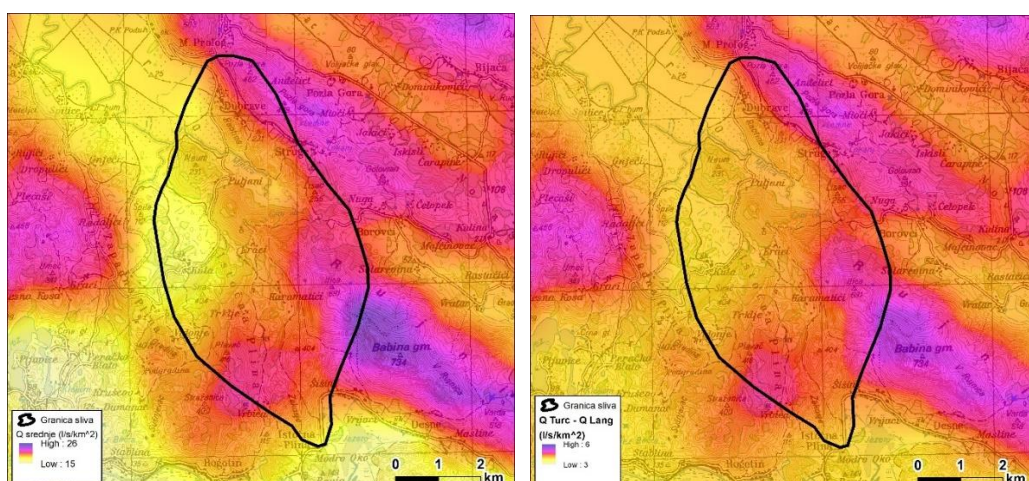
Na Slici 3.10 dan je prikaz prostorne raspodjele srednjih godišnjih temperatura zraka i oborina za referentno 30-godišnje razdoblje 1961.-90. Na temelju njih, korištenjem spomenutih modelskih pristupa, definirane su karte specifičnih otjecanja po Turcu i Langbeinu (Slika 3.11), kao i karte njihove osrednjene raspodjele te njihovih razlika specifičnih protoka (Slika 3.12). Osnovni rezultati provedenih obrada (prosječne temperature, oborine i specifični protoci za izdvojeno analizirano područje površine 29,2 km²) su dani u Tablici 3.6.



Slika 3.10. Prostorna raspodjela srednjih godišnjih temperatura zraka (lijevo) i prosječnih godišnjih količina oborina (desno) za referentno 30-godišnje razdoblje (1961.-90) – prema DHMZ-u (2002)



Slika 3.11. Prostorna raspodjela specifičnih protoka za 30-godišnje razdoblje (1961.-90): lijevo – po Turcu, desno – po Langbeinu



Slika 3.12. Prostorna raspodjela osrednjenih specifičnih protoka po Turcu i Langbeinu za 30-godišnje razdoblje (1961.-90) (lijevo) i razlika specifičnih protoka po Turcu i Langbeinu (desno)

Tablica 3.6. Osnovni klimatološki elementi i proračunate vrijednosti specifičnih i ukupnih srednjih godišnjih protoka

Parametar	Min	Max	Raspon	Srednjak	St. dev.
Srednje god. oborine (mm)	1332	1517	184	1406	35
Srednje god. temperature zraka (°C)	12,4	15,5	3,1	14,6	0,6
Spec. protoci q_{Lang} (l/s/km ²)	14,9	22,3	7,4	17,5	1,3
Spec. protoci q_{Turc} (l/s/km ²)	18,8	27,6	8,8	21,8	1,5
Spec. protoci q_{sr} (Turc + Lang) (l/s/km ²)	16,9	25,0	8,1	19,7	1,4
Razlike spec. protoka q (Turc - Lang) (l/s/km ²)	3,9	5,3	1,4	4,3	0,3
Srednji god. protok Q (m ³ s ⁻¹)	$Q_{Turc} = 0,64$		$Q_{Lang.} = 0,51$	$Q_{sr} = 0,58$	

Kao mjerodavni usvojeni su rezultati provedenih obrada po metodi Turca, koji su odabrani na temelju sagledavanja provedenih na susjednom slivu izvora Prud (Građevinski fakultet u Rijeci, 2015), prema kojima je srednji godišnji bilančni doprinos analiziranog slivnog područja $0,637 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. S obzirom da je analizirani referentni klimatološki 30-godišnji niz vezan za razdoblje 1961.-90., unutar kojeg su hidrološki podaci za izvor Modro oko (kako mjereni, tako i dopunjeni na osnovu regresijske analize u okviru točke 5) raspoloživi samo za 11-godišnje razdoblje 1980.-1990., provedena je njihova redukcija na 30-godišnje razdoblje koristeći hidrološke međuodnose 11-godišnjeg i 30-godišnjeg razdoblja za izvorište Prud (Građevinski fakultet u Rijeci, 2015). Prema tim obradama za navedena razdoblja obrade 30-god prosječni protok za izvor Prud iznosi $6,156 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a 11-godišnji $5,797 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Ukoliko se ti odnosi apliciraju na Modro oko, vrijednost 30-godišnjeg srednjeg godišnjeg protoka za Modro oko iznosi $1,92 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a što je praktički identično prosjeku za cijelo razdoblje provedenih obrada i nadopune podataka s Modrog oka (Tablica 5.1 u točki 5.3) od $1,97 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Dakle, od ukupnog srednjeg godišnjeg protoka za referentno 30-godišnje razdoblje koji iznosi $1,92 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, oko 1/3 čini protok koji se drenira iz analiziranog neposrednog slivnog područja, a 2/3 čini komponenta dotoka iz udaljenijih područja koja su zajednička područja prihranjivanja i drugih izvora na širem regionalnom prostoru. Prije svega se to misli na dotjecanja Vrgorskom Maticom u ponorsku zonu koja se nalazi na rubu analiziranog slivnog područja, ali i dotoci iz udaljenijih regionalnih prostora.

4. Rezultati monitoringa tijekom 2019./2020. godine

4.1. Obnova monitoringa

U okviru predmetnog projekta, provedena su neposredna opažanja dinamike kolebanja razina voda, kao i temperature vode te njezine električne vodljivosti na izvoru Modro oko. Dne 28.8.2019. godine, montirana je inox cijev koja je pričvršćena na konstrukciju na kojoj se nalaze cijevi crpne stanice. Dno inox cijevi nalazi se ispod usisa crpne stanice. Inox cijev je perforirana kako bi postojala komunikacija vode i automatskog mjerača. U nju je postavljen automatski mjerač (CTD Diver) za kontinuirano praćenje razine, temperature i električne vodljivosti vode, te automatski mjerač tlaka zraka (baro Diver). Automatski mjerač (CTD diver) bio je postavljen na razini od -1,67 m n.m., odnosno oko 2 m ispod srednje razine Modrog oka tijekom razdoblja ovog dopunskog monitoringa koji se provodio do dne 28.8.2019. Baro diver je bio postavljen u gornjem dijelu iste te cijevi, izvan zone kolebanja razine vode na izvorištu. Automatski mjerači su podešeni na način da očitavaju podatke svakih trideset minuta. Lokacije oba postavljena automatska mjerača dana je na Slici 4.1. Točnost očitavanja vodostaja je $\pm 2,5$ cm (<https://www.vanessen.com/products/data-loggers/ctd-diver/>).



Slika 4.1. Lokacija postavljenih automatskih mjerača na izvoru Modro oko

4.2. Praćenje kolebanja razina, električne vodljivosti i temperature vode

Karakteristični podaci o vodostajima, temperaturama i električnoj vodljivosti vode na mjernom instrumentu Modro oko za razdoblje od 1.9.2019. do 9.10.2020. dani su u Tablici 4.1. Također, u Tablici 4.2 za iste parametre, dani su mjesečni podaci o srednjim, maksimalnim i minimalnim vrijednostima. Podaci o razinama vode preračunati su na razinu letve.

Tablica 4.1. Karakteristični podaci o razini, temperaturi i električnoj vodljivosti vode na mjernom instrumentu za razdoblje od 1.9.2019. do 9.10.2020.

	Vodostaj (cm)	Temperatura (°C)	Električna vodljivost (mS/cm)
Sr	1,59	14,9	0,765
Stdev	19,2	2,2	0,233
Cv	12,1	0,145	0,305
Max	66,0	17,9	1,43
Min	-30,3	10,8	0,380

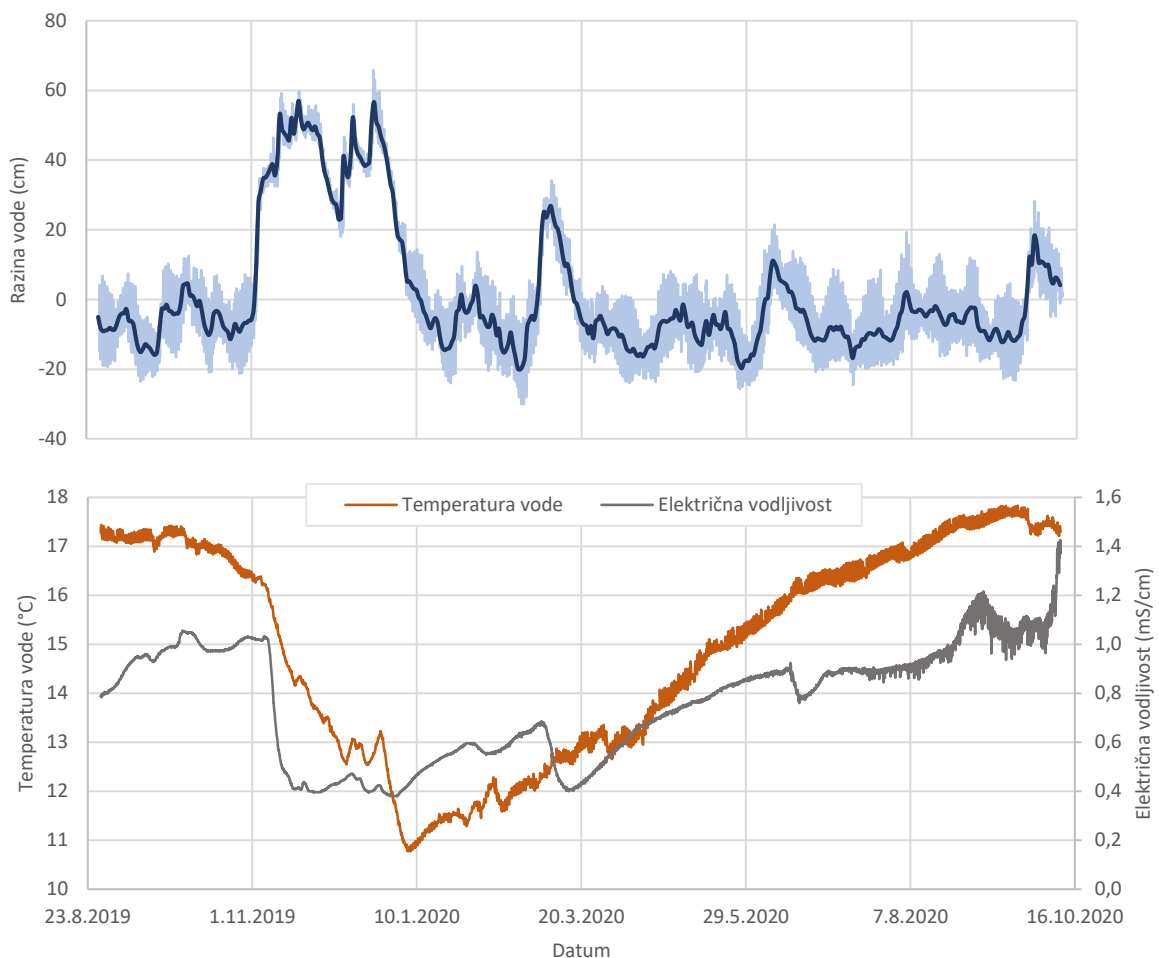
Tablica 4.2. Karakteristični mjesečni podaci o razini, temperaturi i električnoj vodljivosti vode na mjernom instrumentu za razdoblje od 1.9.2019. do 9.10.2020.

Godina	Mjesec	Vodostaj (cm)			Temperatura (°C)			Električna vodljivost (mS/cm)		
		SR	MAX	MIN	SR	MAX	MIN	SR	MAX	MIN
2019	9	-8,2	10,8	-23,8	17,2	17,4	16,9	0,930	1,02	0,804
	10	-4,7	12,8	-21,5	16,9	17,4	16,4	1,01	1,06	0,972
	11	40,4	60,3	-13,5	14,9	16,4	13,4	0,617	1,03	0,396
	12	38,9	66,0	17,9	12,8	13,5	11,7	0,422	0,472	0,380
2020	1	-1,2	28,6	-24,1	11,3	11,7	10,8	0,502	0,596	0,380
	2	-8,8	13,8	-30,3	11,9	12,4	11,4	0,597	0,672	0,544
	3	4,9	34,4	-18,6	12,8	13,4	12,1	0,500	0,684	0,400
	4	-10,7	9,0	-24,5	13,4	14,4	12,6	0,659	0,744	0,540
	5	-10,2	7,8	-26,3	14,8	15,5	14,1	0,803	0,868	0,740
	6	-2,7	22,1	-23,5	15,9	16,5	15,2	0,851	0,956	0,760
	7	-10,6	8,9	-24,7	16,6	17,0	16,2	0,891	0,916	0,828
	8	-4,0	19,4	-17,3	17,2	17,7	16,7	0,963	1,14	0,820
	9	-4,8	28,8	-23,9	17,6	17,9	17,2	1,09	1,22	0,924
	10*	7,5	21,2	-6,0	17,4	17,6	17,2	1,16	1,43	0,936

Prikaz rezultata opažanja satnih vrijednosti razine vode, temperature i električne vodljivosti možemo vidjeti na Slici 4.2. Razina vode kretala se u rasponu od -30 cm (24.2.2020.) do 66 cm (22.12.2019.), a srednja razina vode za cijelo razdoblje iznosi 1,6 cm (0,40 m n.m.).

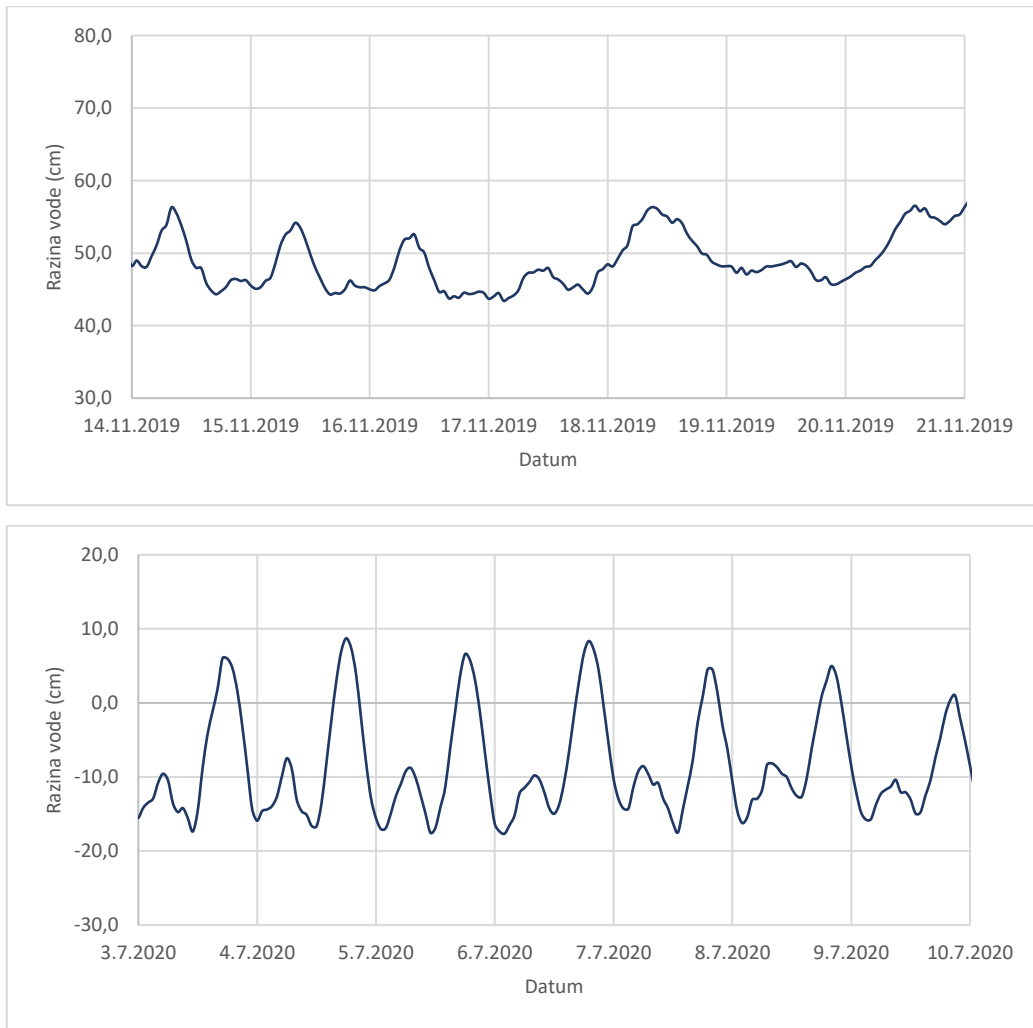
Tijekom cijelog razdoblja opažanja, srednja vrijednost električne vodljivosti iznosi 0,765 mS/cm. Sa slike vidimo da nakon velikih oborina i naglog porasta razine vode električna

vodljivost naglo pada do minimalne vrijednosti od 0,380 mS/cm. Pri jako niskim vrijednostima zadržava se sve dok je razina vode visoka. No sa padom razine kreće postepeno rasti te krajem ljeta doseže svoju maksimalnu vrijednost od 1,43 mS/cm (9.10.2020.). To je ujedno i zadnji dan monitoringa, pa je za pretpostaviti da je i dalje rasla sve do pojave novih oborina i dinamiziranja prihranjivanja Modroga oka te značajnijeg podizanja razine jezera. Temperatura vode slično oscilira kao i električna vodljivost – podizanjem razine vode temperatura postepeno pada do minimalne temperature od 10,8 °C, te nakon toga postepeno raste do maksimalne vrijednosti od 17,9 °C. Srednja temperatura vode za cijelo razdoblje iznosi 14,9 °C.



Slika 4.2. Prikaz rezultata opažanja satnih vrijednosti razine, temperature i električne vodljivosti vode na izvoru Modro oko u razdoblju 28.8.2019. – 9.10.2020.

Na Slici 4.3 izdvojena su dva razdoblja od po 7 dana tijekom visokih (14.11.2019. – 21.11.2019.) i niskih voda (3.7.2020. – 10.7.2020.). Vidljiv je značajan utjecaj plime i oseke na kolebanje razine vode na Modrom oku tijekom oba perioda, no pri niskim vodama je to puno izraženije. Pri visokim vodama unutar dnevne oscilacije su unutar 10 cm, dok pri niskim vodama su čak oko 25 cm. Detaljniji prikaz utjecaja mora na vodostaje Modrog oka dan je u točki 4.4.



Slika 4.3. Prikaz satnih razina vode tijekom perioda visokih voda (14.11.2019. – 21.11.2019.) (gore) i niskih voda (3.7.2020. – 10.7.2020.) (dolje)

4.3. Vodomjerenja

Tvrtka Higra d.o.o. provela je na preljevima iz jezerskog okna Modrog oka šest serija vodomjerenja, uglavnom tijekom sušnog razdoblja kako bi se što pouzdanije procijenile značajke malih voda koje su i najinteresantnije sa stanovišta korištenja voda toga izvora za potrebe vodoopskrbe.

Prvi korak koji su napravili djelatnici Higre d.o.o., dana 13.08.2019., bila je kontrola visinske razlike između postojeće stalne točke i "0" vodokaza kako bi se mjerenja tijekom obnovljenog ciklusa monitoringa u 2019. i 2020.g. mogla projicirati na očitane razine u prošlosti. Nakon provedene visinske kontrole, vodokazna letva podignuta je za 4 mm. Nakon toga provedena je priprema vodomjernih profila. Obilaskom svih kanala oko jezera ustanovljeno je da voda pri malim vodama istječe kroz dva kanala koja su u daljnjem tekstu nazvana „lijevi kanal“ i „desni kanal“ (Slika 4.4 i 4.5). Lijevi kanal je veći i nalazi se nasuprot napuštene crpne stanice za zahvat vode za navodnjavanje, dok je desni znatno manji i nalazi se oko 40 m od spomenutog glavnog (lijevog) kanala. Tijekom trajanja velikovodnih razdoblja, voda iz jezerskog oka se prelijeva putem većeg broja kanala.



Slika 4.4. Lokacije mjerenja protoka: 1 – „lijevi kanal“, 2 – „desni kanal“



Slika 4.5. Vodomjerni profil na lijevom kanalu (gore) i desnom kanalu (dolje)

Pri košnji, odnosno pripremi vodomjernih profila na kanalima (Slika 4.6) vodilo se računa da se ne kosi travu na izlazu iz jezera kako se ne bi snizila niveleta jezera. Vodomjerenju se pristupilo tek dva sata nakon košnje kako bi se vodostaj stabilizirao ako je bilo utjecaja na razinu jezera. Mjerenje su izvedena hidrometrijskim krilom.



Slika 4.6. Priprema vodomjernog profila na lijevom kanalu dne 13.8.2019.

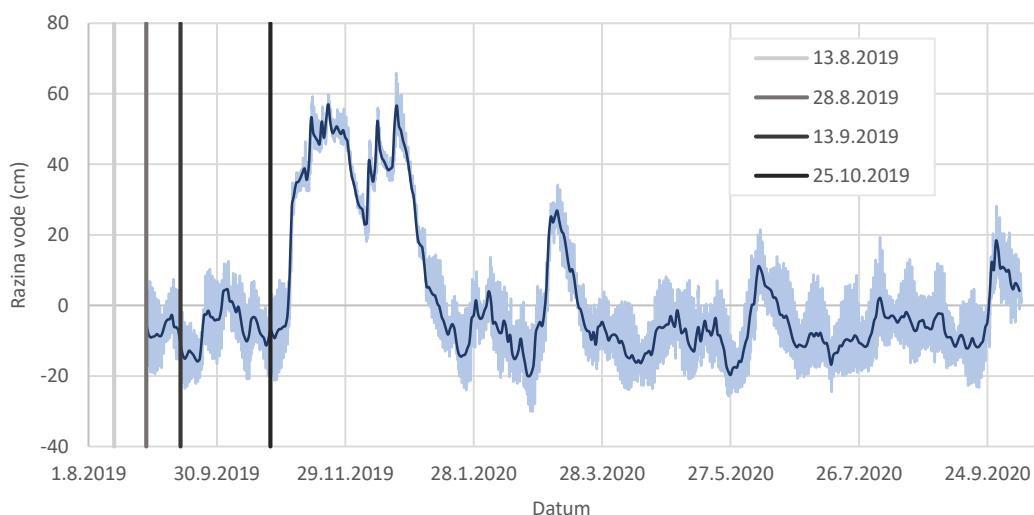
Budući da su rezultat tijekom druge serije vodomjerenja (dana 28.8.2019.) poprilično odskakali od rezultata mjerenja obavljenih 13.08.2019., uočeno je da na količinu istjecanja vode iz jezera Modro oko utječu u velikoj mjeri plima i oseka. Prva serija mjerenja obavljena je kada je na mareografu Ustava ušće nizvodni zabilježena plima, dok je druga serija mjerenja obavljena u vrijeme oseke. Iz tog razloga, 13.9.2019. i 25.10.2019. napravljene su dvije serije vodomjerenja tijekom istoga dana - jedna serija mjerenja u vrijeme oseke te jedna u vrijeme plime.

Rezultati svih šest serija vodomjerenja na lijevom i desnom kanalu izvora Modro oko dani su u Tablici 4.3. Tijekom vodomjerenja, vodostaji na letvi bilježili su se nekoliko puta, te je ustanovljeno da je razina jezera pod utjecajem plime i oseke, što možemo vidjeti iz Tablici 4.3.

Tablica 4.3. Rezultati 6 serija vodomjerenja na lijevom i desnom kanalu izvora Modro oko

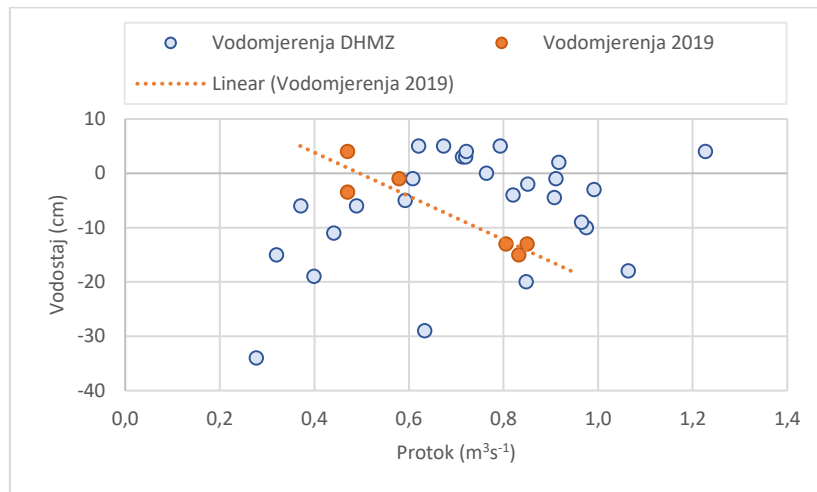
Datum	Kanal	Vrijeme	Vodostaj (cm)	Plima/oseka	Protok (m ³ /s)	Ukupna protoka (m ³ /s)
13.8.2019	Lijevi kanal	13:15	-5	plima	0,365	0,470
	Desni kanal	12:30	-2	plima	0,105	
28.8.2019	Lijevi kanal	9:40	-15	oseka	0,730	0,832
	Desni kanal	10:45	-15	oseka	0,102	
13.9.2019	Lijevi kanal	9:45	-13	oseka	0,738	0,850
	Desni kanal	10:45	-13	oseka	0,112	
	Lijevi kanal	18:00	-1	plima	0,492	0,579
	Desni kanal	17:00	-1	plima	0,087	
25.10.2019	Lijevi kanal	10:30	-13	oseka	0,721	0,805
	Desni kanal	11:20	-13	oseka	0,084	
	Lijevi kanal	15:40	4	plima	0,391	0,470
	Desni kanal	16:30	4	plima	0,079	

Na Slici 4.7 dan je prikaz rezultata opažanja satnih vrijednosti razine vode na izvoru Modro oko u razdoblju od 28.8.2019. do 9.10.2020., te dani kada su vršena sva vodomjerenja. Iz prikaza vidimo da su vodomjerenja vršena tijekom razdoblja trajanja malih voda te je zadnje vodomjerenje bilo svega par dana prije značajnog podizanja razine vode.



Slika 4.7. Prikaz rezultata opažanja satnih vrijednosti razine vode na izvoru Modro oko u razdoblju od 28.8.2019. do 9.10.2020., te dani kada su vršena vodomjerenja

Dana je i usporedba rezultata vodomjerenja iz 2019. godine i vodomjerenja DHMZ-a pri vodostajima nižim od 6 cm provedenih tijekom ranijih razdoblja od 1969. do 2011. (Slika 4.8). Vidimo da su rezultati vrlo slični te da su vrlo velika odstupanja zbog značajnog utjecaja plime i oseke. Ukoliko se gleda samo razina vode na izvoru u trenutku mjerenja i izmjereni protok, mjerenja iz 2019. pokazuju i jednu nelogičnost – pri većim razinama vode u jezerskom oknu, manji su protoci. No, razlog tome je utjecaj uspora kanala koji odvodi prelivne vode, a koji je pod utjecajem kolebanja plime i oseke. Tijekom takvih izraženih sušnih razdoblja, unutar dnevna povećanja razine vode na izvoru nisu posljedica većih protoka nego utjecaja uspora kada vode iz jezera slobodne ne istječu, već se povratnim djelovanjem uspora dijelom vraćaju i podižu razinu vode na izvoru i s njim neposredno vezanom krškom vodonosniku. Nasuprot tome, u uvjetima oseke iz izvora Modro oko istječu ne samo dotekle vode iz podzemlja, nego i dio akumuliranih voda u samom jezerskom oku i s njim neposredno vezanom vodonosniku, te tako povećavaju vrijednost protoka.

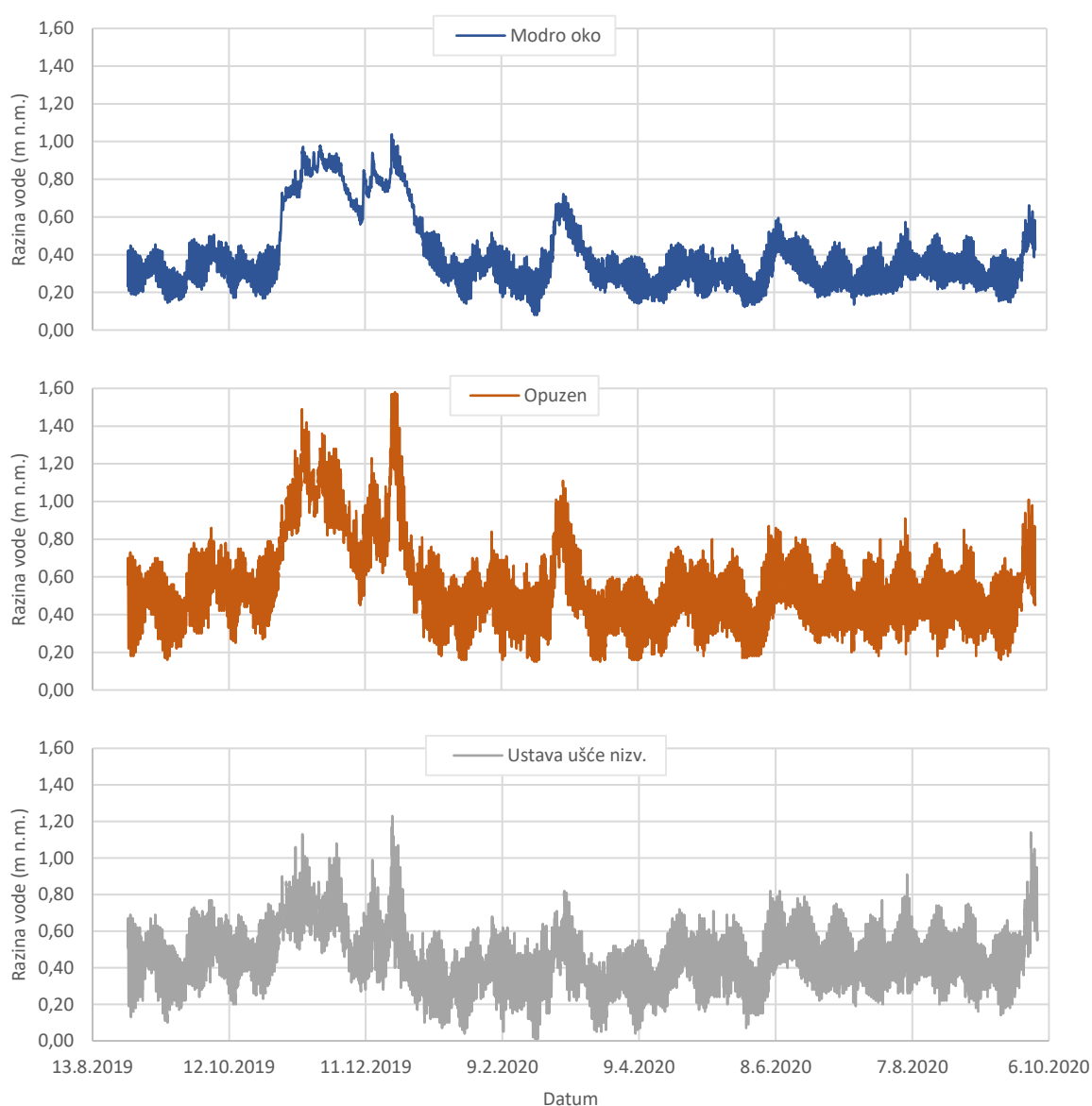


Slika 4.8. Usporedba rezultata vodomjerenja DHMZ-a pri vodostajima nižim od 6 cm provedenih tijekom ranijih razdoblja (1969. – 2011.) i vodomjerenja iz 2019. godine

4.4. Kolebanja razine mora, Neretve i prikupljenih podataka sa Modrog oka

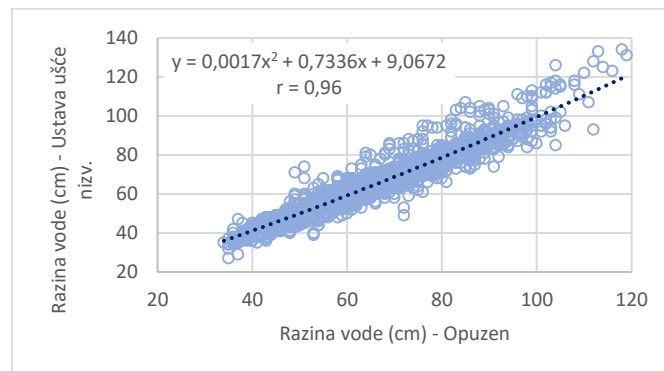
Hidrološka postaja Modro oko (prema podacima u bazi DHMZ-a kota „0“ = 0,38 m n.m.) i Opuzen (kota „0“ = -0,18 m n.m.) visinski su locirane u blizini morske razine koja u značajnoj mjeri utječe na dinamiku njihova kolebanja. Za usporedbu kolebanja razina vode na te dvije postaje i mora uzeta je hidrološka postaja Ustava ušće nizv. – Mala Neretva (kota „0“ = -0,20 m n.m.) kojom se prati kolebanje razine mora.

Na Slici 4.9 dan je prikaz rezultata opažanja satnih vrijednosti razine vode na izvoru Modro oko u usporedbi sa razinama na hidrološkim postajama Opuzen – Neretva i Ustava ušće nizv. – Mala Neretva u razdoblju trajanja monitoringa (28.8.2019. – 30.9.2020.).

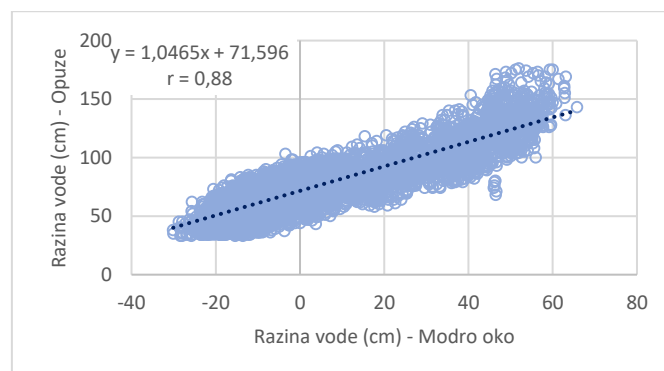


Slika 4.9. Prikaz rezultata opažanja satnih vrijednosti razine vode na izvoru Modro oko u usporedbi sa razinama na hidrološkim postajama Opuzen – Neretva i Ustava ušće nizv. – Mala Neretva u razdoblju 28.8.2019. – 30.9.2020.

Iz prikaza vidimo da Opuzen pri višim vodama ima veće razine od mora, no tijekom malih voda one su skoro identične s razinama na postaji Ustava ušće nizv., a što se može vidjeti i iz prikaza međudnosa satnih razina na te dvije postaje za razdoblje od 1.5.2020. do 30.9.2020. (Slika 4.10) gdje je veza vrlo čvrsta (koeficijent korelacije iznosi 0,96). Dan je i prikaz međudnosa satnih vrijednosti na postajama Opuzen i Modro oko tijekom cijelog razdoblja monitoringa (Slika 4.11), prema kojem je vidljivo da je na te dvije postaje veza također relativno čvrsta (koeficijent korelacije 0,88), ali ipak nešto slabija nego li u prethodnom slučaju jer vodostaji na postaji Opuzen ovise i o radu uzvodne hidroelektrane Mostar.

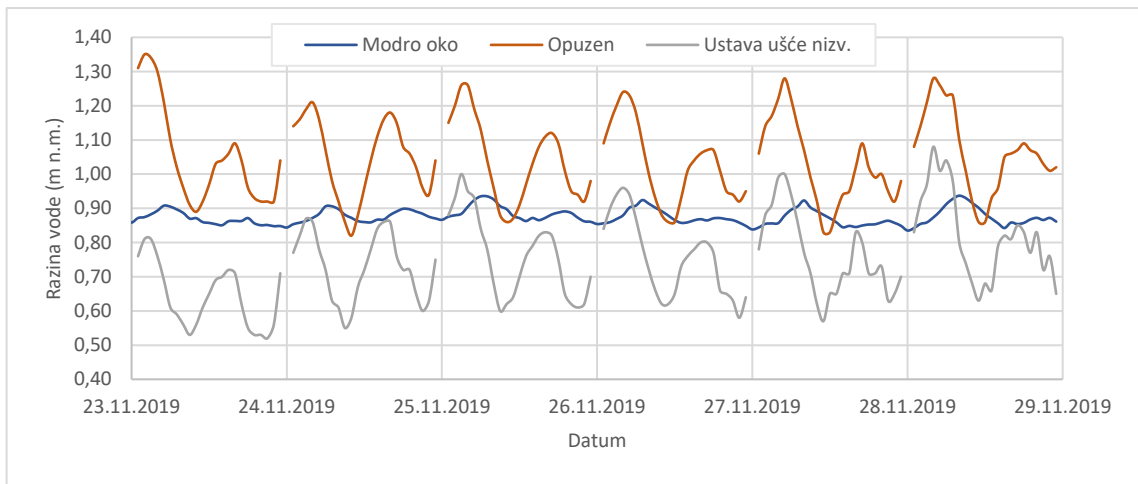


Slika 4.10. Usporedni prikaz rezultata opažanja satnih vrijednosti razine vode na hidrološkim postajama Opuzen i Ustava ušće niz. u razdoblju 1.5.2020. – 30.9.2020.

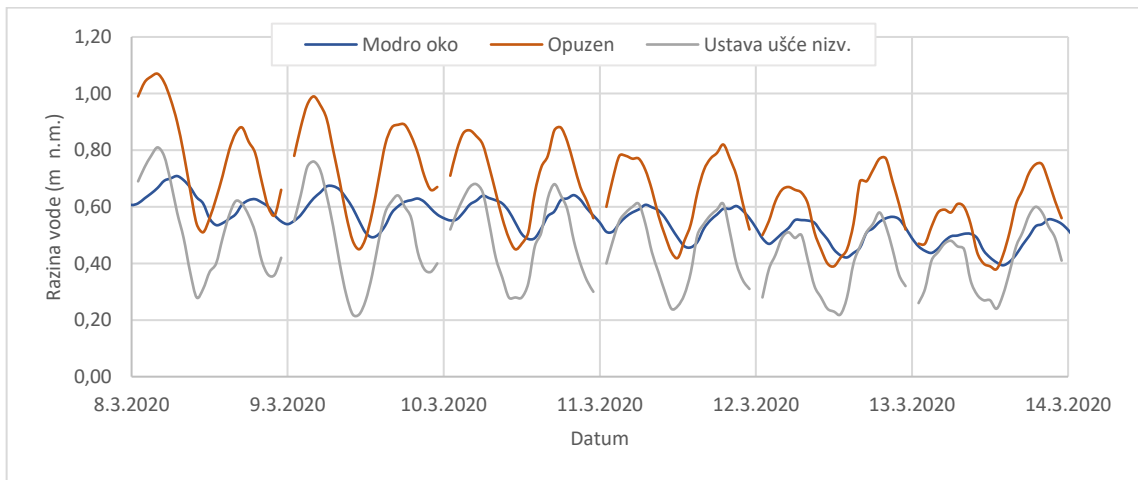


Slika 4.11. Usporedni prikaz rezultata opažanja satnih vrijednosti razine vode na izvoru Modro oko i sa hidrološke postaje Opuzen - Neretva u razdoblju 29.8.2019. – 30.9.2020.

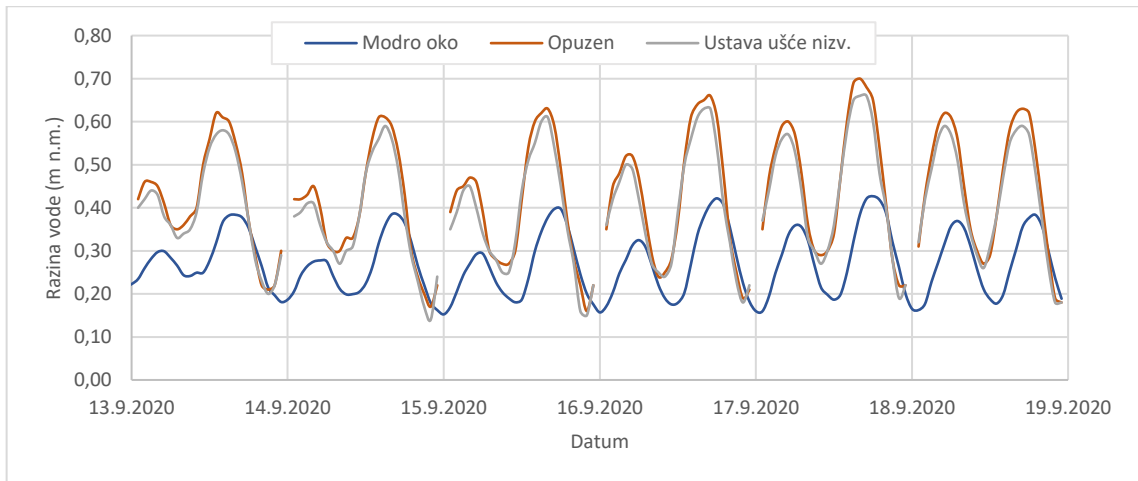
Na Slici 4.12 dane su usporedbe satnih vodostaja na postajama Modro oko, Opuzen i Ustava ušće nizv. tijekom tri perioda - u vrijeme visokih (23.-28.11.2019.), srednjih (8.-13.3.2020.) i niskih voda (13.-18.9.2020.). Razine tijekom ta tri perioda otprilike odgovaraju srednjim, maksimalnim i minimalnim godišnjim razinama tijekom višegodišnjeg razdoblja. Iz prikaza se vidi da sve tri postaje slično osciliraju, pogotovo u razdobljima niskih voda kada su skoro kao jedan sustav. Oscilacije na Modrom oku kasne za oscilacijama mora otprilike 3 sata. Rezultati usporedbe u situaciji prikazanoj na Slici 4.12 c, prema kojoj su pri malim vodama razine vode na Modrom oku praktički stalno niže od razine mora i vode u koritu Neretve ukazuju na potrebu preispitivanja visinskih podataka o kotama „0“ analiziranih postaja.



a)



b)



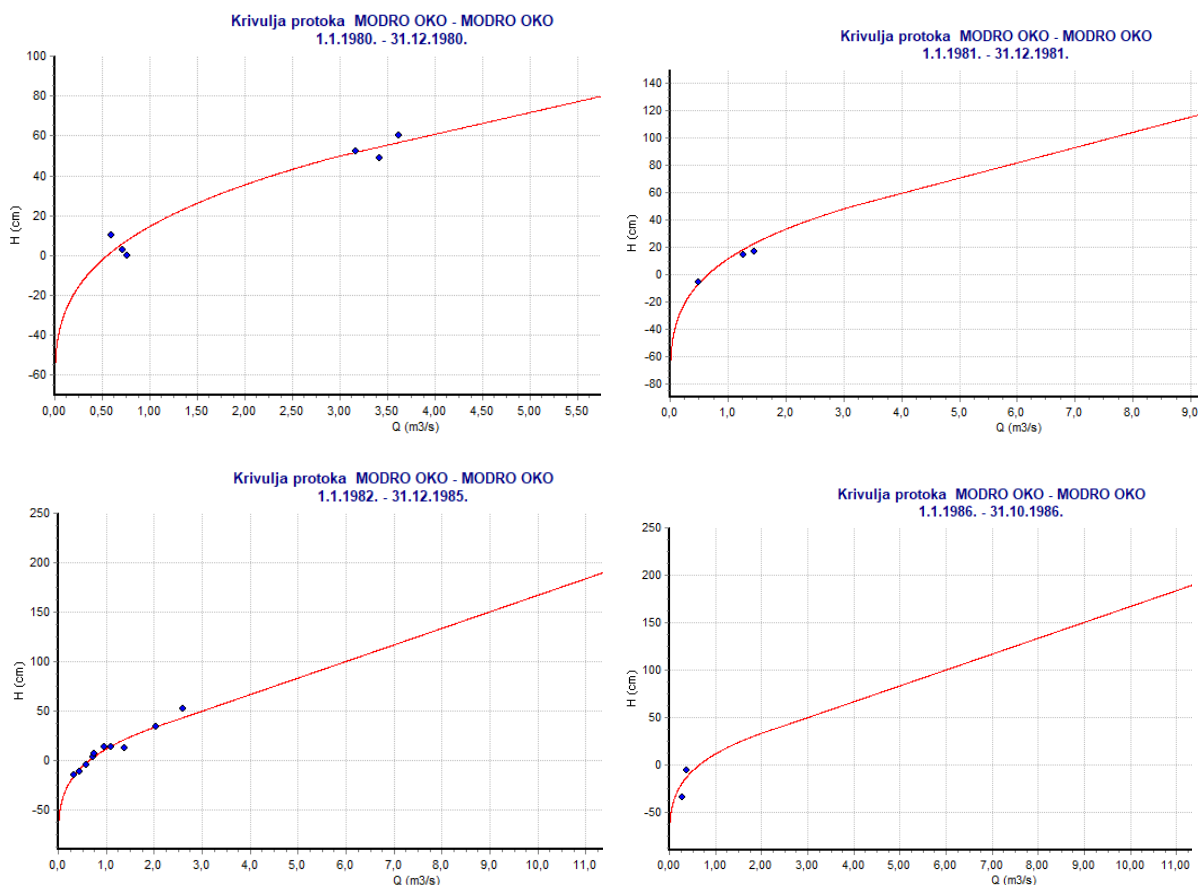
c)

Slika 4.12. Prikaz satnih razina vode na postajama Modro oko, Opuzen i Ustava ušće nizv. tijekom tri razdoblja: a) visokih (23.-28.11.2019.), b) srednjih (8.-13.3.2020.) i c) niskih voda (13.-18.9.2020.)

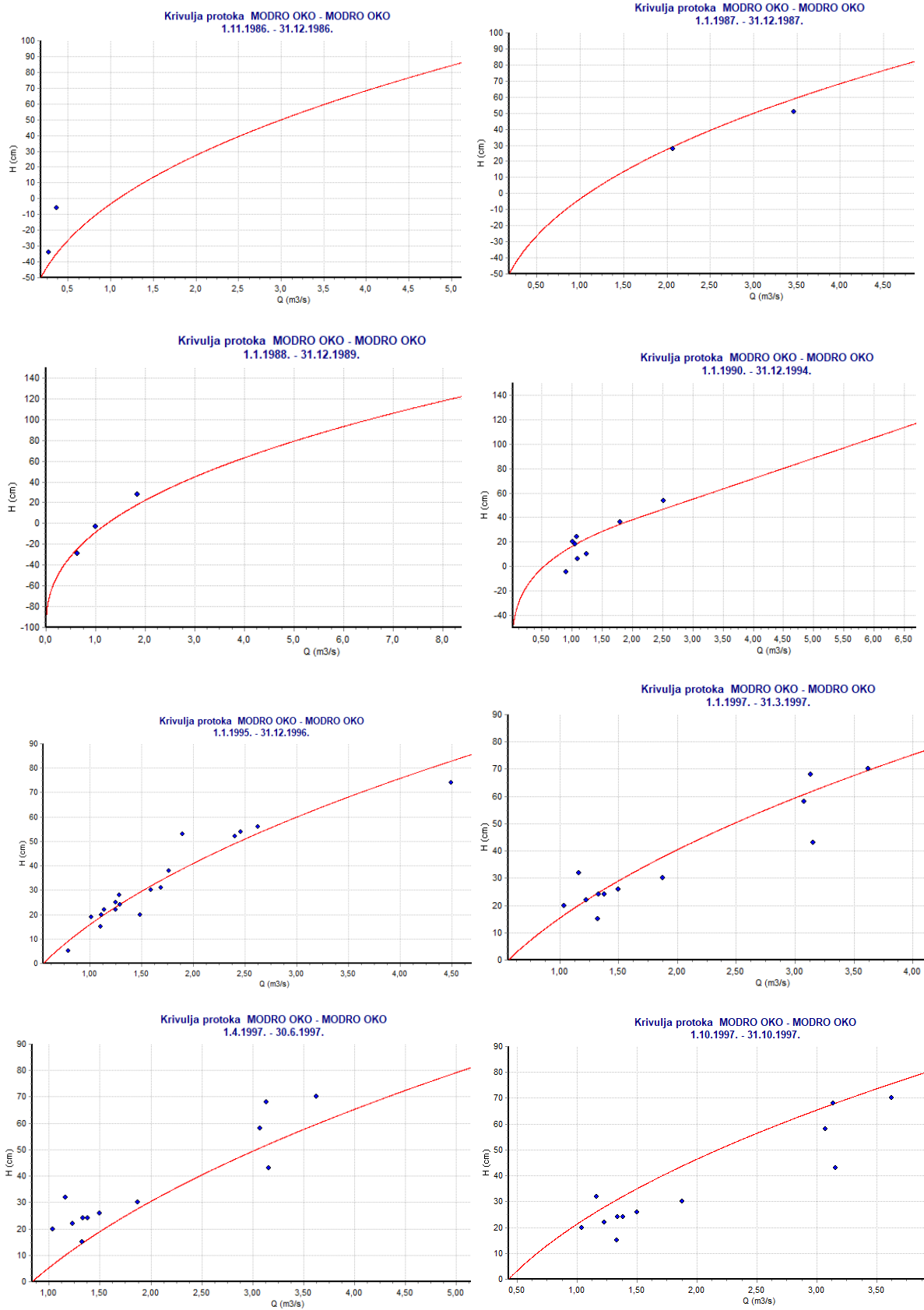
5. Hidrološke analize

5.1. Rezultati vodomjerenja DHMZ-a i procjena pouzdanosti konsumpcijskih krivulja Modrog oka

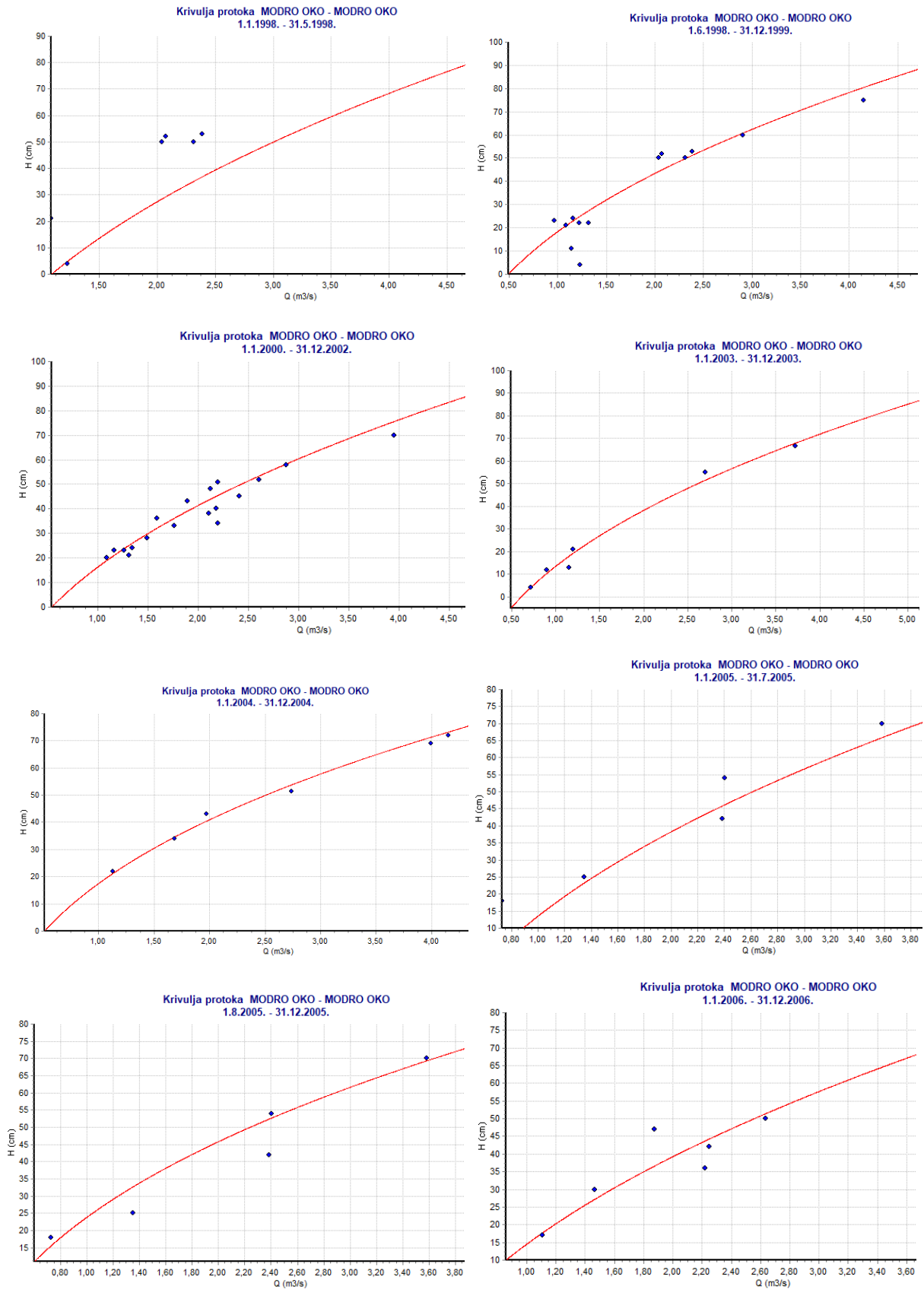
Modro oko je bilo uključeno u sustav monitoringa DHMZ-a tijekom razdoblja 15.10.1969. – 31.8.2012. godine kada su praćeni vodostaji i provedena vodomjerenja (ukupno 162). Obračunate protoke raspoložive su za razdoblje 1980.-1991. i 1995.-2009., i to s upitnom točnošću zbog problema s pouzdanim definiranjem protočne krivulje uslijed vrlo promjenjivih uvjeta obraslosti odvodnih kanala i time izazvanih uspora u niskom dolinskom području zaobalja Neretve. Također u malovodnom razdoblju, veliki utjecaj na tečenje kroz kanal ima i plima i oseka. Zbog problema s prevelikom zaraštenosti korita u razdoblju 1992.-1994. nisu vršena vodomjerenja, te ne postoji izračun protoka. Krivulja protoka nije definirana ni za razdoblje 2010.-2011., zbog velikog rasapa rezultata vodomjerenja, te je i vrlo brzo nakon toga postaja Modro oko ukinuta. Na Slici 5.1 dan je prikaz svih DHMZ-ovih krivulja i vodomjerenja u razdoblju od 1980. – 2009., preuzetih iz njihove baze podataka HIS 2000.



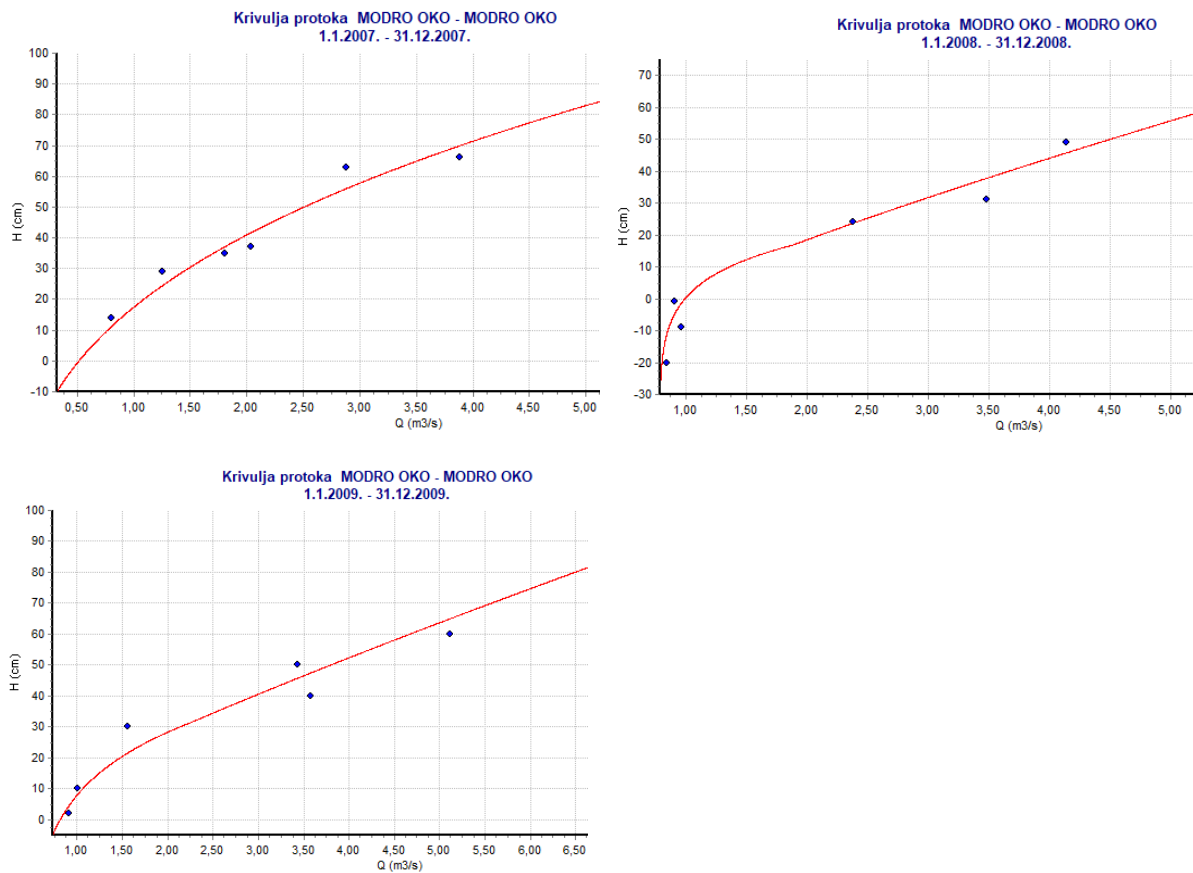
Slika 5.1. DHMZ-ove krivulje i vodomjerenja u razdoblju od 1980. – 2009.



Slika 5.1. DHMZ-ove krivulje i vodomjerenja u razdoblju od 1980. – 2009. (nastavak)

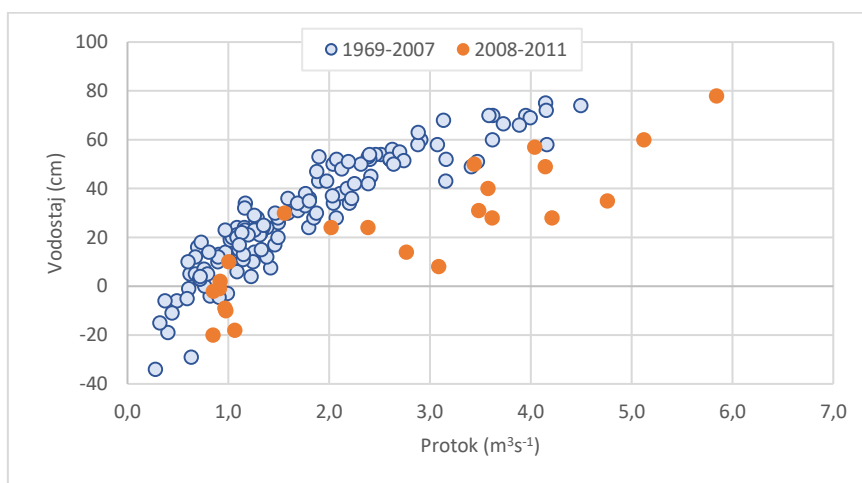


Slika 5.1. DHMZ-ove krivulje i vodomjerenja u razdoblju od 1980. – 2009. (nastavak)



Slika 5.1. DHMZ-ove krivulje i vodomjerenja u razdoblju od 1980. – 2009. (nastavak)

Na Slici 5.2 dan prikaz svih DHMZ-ovih vodomjerenja za dva karakteristična razdoblja 1969.-2007. i 2008.-2011., iz kojih je vidljivo da se oni naglašeno razlikuju. Na temelju provedenih ocjena, zbog upitne točnosti krivulje za razdoblje 1990.-1994., 1997. i 1998.-1999. nisu uzimate u obzir te su na osnovu njih definirani protoci za ta razdoblja, proračunati u bazi podataka DHMZ-a, izostavljeni iz daljnjih obrada.

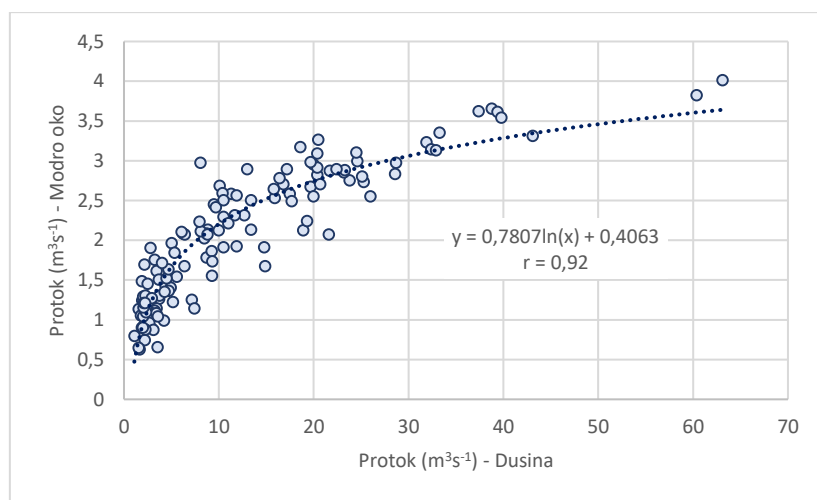


Slika 5.2. Vodomjerenja DHMZ-a i krivulje za dva razdoblja (1969.-2007. i 2008.-2011.)

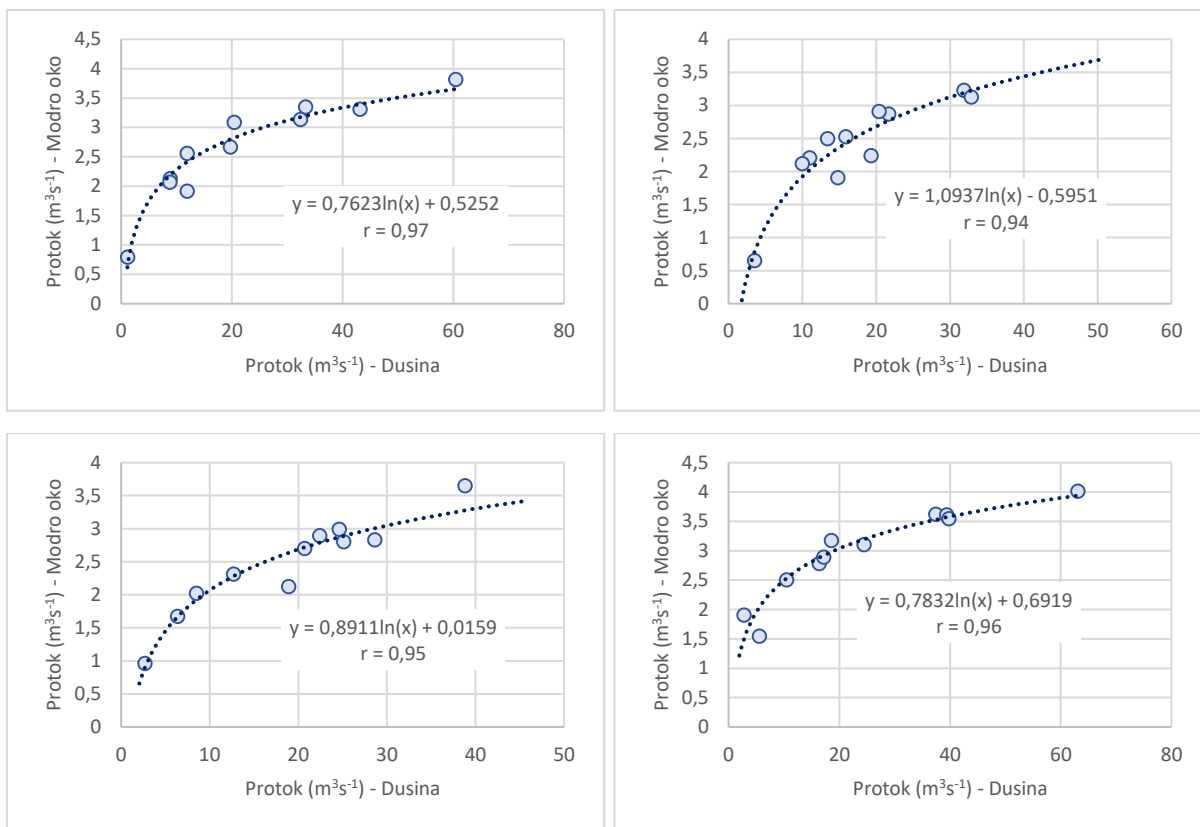
5.2. Analize hidroloških podataka sa lokaliteta šireg utjecajnog područja

Kao što je napomenuto u prethodnom poglavlju, zbog upitne točnosti krivulja, podaci o protocima u razdoblju 1990.-1991., 1997.-1999. i 2008.-2009. su izostavljeni. No, kako bi se nadomjestili i oni, kao i dobile vrijednosti za sve mjesečne i godišnje protoke za cijelo razdoblje do 1980. do 2011., kao i za kasnije razdoblje od 2012. do 2018., zbog dobrih regresijskih veza podaci su nadopunjeni preko hidrološke postaje Dusina – Matica Vrgorska.

Napravljene su usporedbe protoka za sve kalendarske mjesece zajedno (Slika 5.3), ali i za svaki mjesec posebno (Slika 5.4) tijekom cijelog razdoblja (1980.-2007. sa izostavljenim podacima DHMZ-a dobivenim po nepouzdanim krivuljama). Koeficijent korelacije (r) za sve mjesece zajedno između postaja Modro oko i Dusina iznosi 0,92. Za mjesec siječanj ($r = 0,97$), veljača ($r = 0,94$), ožujak ($r = 0,95$) i prosinac ($r = 0,96$) koeficijent korelacije je veći nego za sve mjesece zajedno, dok kod ostalih mjeseci taj koeficijent opada, pogotovo za situacije pri trajanjima malih voda tijekom ljetnog sušnog razdoblja. Stoga su podaci o srednjim mjesečnim protocima za zimske mjesece, s dobrim koeficijentima korelacije, nadopunjeni posebno za svaki mjesec, dok su za ostale mjesece (travanj – studeni) nadopunjeni preko zajedničke krivulje koja ne garantira veliku pouzdanost u domeni malih voda, ali barem odražava njihovu generalnu međuzavisnost.

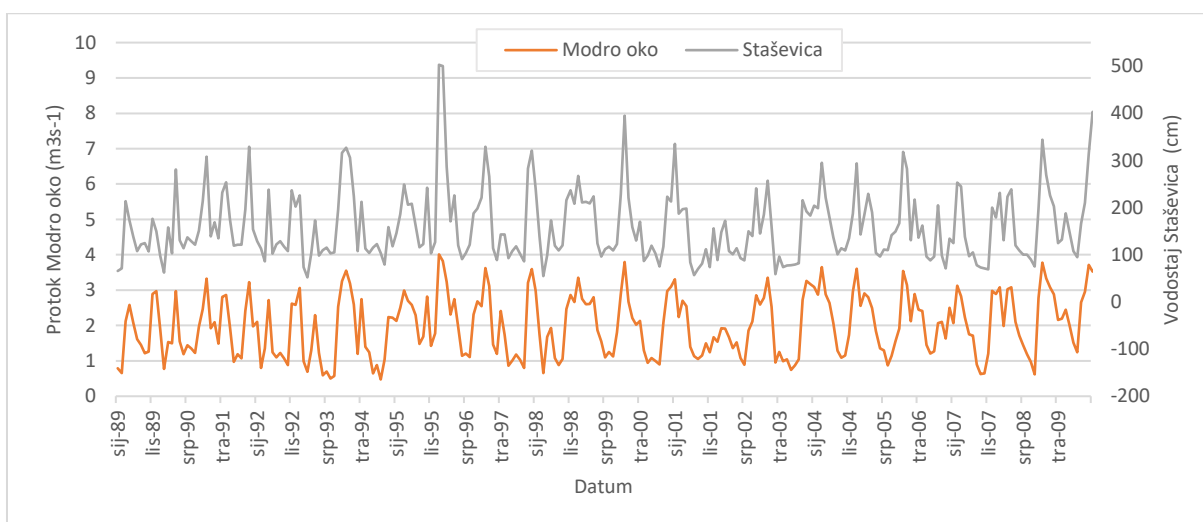


Slika 5.3. Usporedni prikaz protoka na hidrološkim postajama Modro oko i Dusina – Matica Vrgorska za cijelo razdoblje opažanja (1980.-2007. sa prekidima)



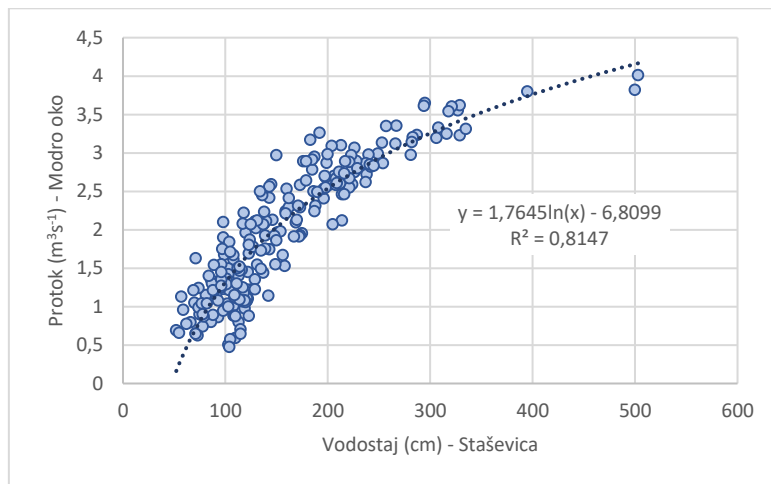
Slika 5.4. Usporedni prikaz protoka na hidrološkim postajama Modro oko i Dusina – Matica Vrgorska za cijelo razdoblje opažanja (1980.-2007. sa prekidima) po mjesecima: a) siječanj, b) veljača, c) ožujak i d) prosinac

Na Slici 5.5 dan je prikaz vremenskog hoda mjesečnih protoka na postaji Modro oko i vodostaja na postaji Staševica – Matica Vrgorska u razdoblju 1989.-2009. (nedostajući podaci na Modrom oku nadopunjeni preko postaje Dusina), iz koje je vidljivo da postoji dobra sukladnost prikazanih hodova, kao i koincidencija sušnih i vodnih hidroloških prilika.



Slika 5.5. Prikaz mjesečnih protoka na postaji Modro oko i vodostaja na postaji Staševica – Matica Vrgorska u razdoblju 1989.-2009.

Relativna dobra veza između podataka sa spomenutih postaja Modro oko i Staševica – Matica Vrgorska vidljiva je i na Slici 5.6, ali gdje je vidljivo i da su najveća odstupanja u domeni malih voda, te su stoga podaci o protocima na Modrom oku nadopunjeni s podacima Dusina na istom vodotoku Matici Vrgorskoj.



Slika 5.6. Usporedni prikaz protoka na postaji Modro oko i vodostaja na postaji Staševica u razdoblju 1989.-2009.

5.3. Analize kompletiranih protoka izvorišta Modro oko

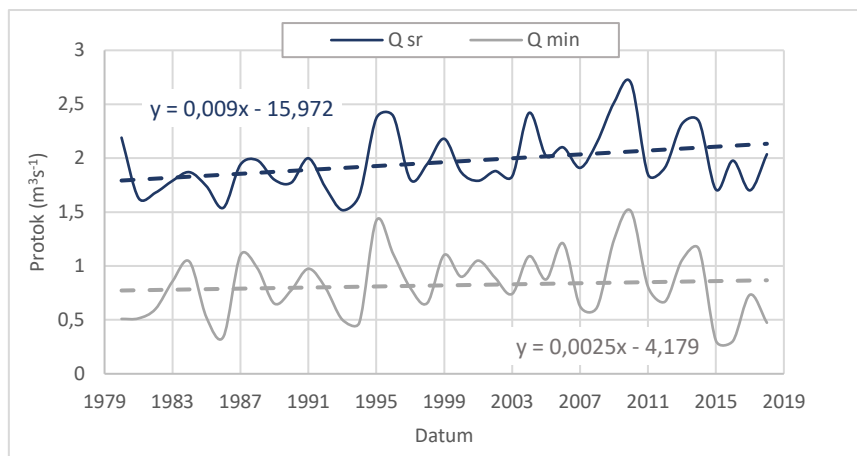
U poglavlju 3.2 dan je prikaz karakterističnih srednjih mjesečnih i godišnjih protoka i vodostaja, te **osnovnih statističkih pokazatelja** za hidrološku postaju Modro oko iz baze DHMZ-a. No zbog nepouzdanosti krivulja, regresijskim analizama preko hidrološke postaje Dusina – Matica Vrgorska nadopunjeni su nedostajući i nepouzdanosti mjesečni i godišnji podaci o protocima za razdoblje od 1980. do 2018. godine. U Tablici 5.1 dan je prikaz mjesečnih i godišnjih protoka, kao i statistička obrada podataka za razdoblje od 1980. do 2018. Žutom bojom označene su mjesečne i godišnje vrijednosti koje su postojale, ali su zamijenjene zbog nepouzdanosti krivulja, dok su sivom bojom označeni nedostajući podaci.

Na Slici 5.7 dan je prikaz hoda karakterističnih srednjih i minimalnih godišnjih vodostaja Modrog oka tijekom razdoblja 1980. – 2018. Vidimo da je prisutan blagi trend povećanja srednjih ($0,09 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/10 \text{ god}$) i minimalnih ($0,03 \text{ m}^3\text{s}^{-1}/10 \text{ god}$) godišnjih protoka. Dana je i unutar godišnja raspodjela za isto razdoblje (Slika 5.8) iz koje vidimo da su najveće protoke u prosincu, te da je minimalna srednja mjesečna vrijednost zabilježena u mjesecu rujnu.

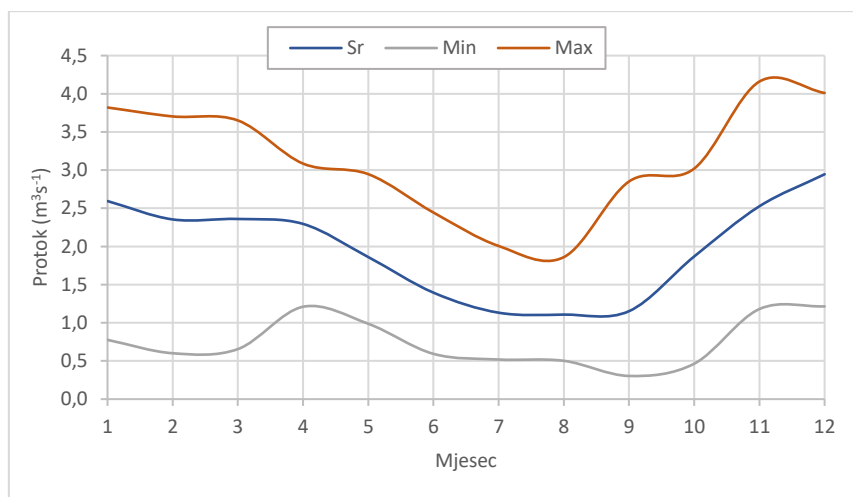
Tablica 5.1. Mjesečni i godišnji podaci o protocima (m^3s^{-1}) s hidrološke postaje Modro oko u razdoblju od 1980. do 2018.

Godina	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God
1980	3,52	1,5	2,4	1,79	2,9	1,9	1,18	0,921	0,509	2,35	4,16	3,15	2,19
1981	2,75	1,75	2,45	1,21	1,4	1,35	1,07	1,05	0,514	1,3	1,37	3,38	1,63
1982	2,44	0,601	2,08	2,01	1,09	0,787	0,888	0,835	0,681	3,02	2,21	3,53	1,68
1983	2,81	3,47	2,3	2,78	1,69	0,857	0,969	1,06	0,938	0,999	1,18	2,37	1,79
1984	2,41	2,26	2,14	1,74	1,85	1,64	1,08	1,04	1,54	2,37	2,52	1,82	1,87
1985	1,77	2,01	3,07	2,34	1,56	1,05	0,913	0,583	0,523	0,545	3,27	3,24	1,74
1986	3,3	3,26	2,95	1,97	1,22	0,621	0,519	0,763	0,344	0,464	1,23	1,86	1,54
1987	2,61	2,73	2,18	1,94	2,22	1,99	1,62	1,31	1,1	1,22	1,73	2,59	1,94
1988	1,85	2,72	2,95	2,7	2,12	2,09	1,21	1,12	0,979	1,71	1,9	2,38	1,98
1989	0,795	0,651	2,12	2,58	2,08	1,61	1,45	1,22	1,26	2,89	2,97	1,9	1,8
1990	0,776	1,53	1,49	2,97	1,55	1,19	1,44	1,35	1,22	1,97	2,46	3,33	1,77
1991	1,92	2,09	1,49	2,81	2,86	1,95	0,97	1,19	1,07	2,41	3,23	1,98	2,00
1992	2,11	0,800	1,35	2,72	1,24	1,10	1,22	1,07	0,88	2,62	2,59	3,07	1,73
1993	0,99	0,69	1,30	2,29	1,23	0,59	0,70	0,50	0,57	2,53	3,25	3,55	1,52
1994	3,19	2,59	1,20	2,75	1,40	1,24	0,65	0,88	0,47	1,04	2,24	2,22	1,66
1995	2,13	2,5	2,99	2,7	2,58	2,29	1,48	1,69	2,82	1,42	1,78	4,01	2,37
1996	3,82	3,23	2,31	2,75	1,96	1,14	1,21	1,11	2,31	2,68	2,55	3,62	2,39
1997	3,12	1,46	1,20	2,41	1,74	0,86	1,01	1,18	1,04	0,80	3,20	3,60	1,80
1998	2,98	1,75	0,66	1,67	1,93	1,08	0,88	1,06	2,46	2,86	2,67	3,35	1,95
1999	2,75	2,60	2,61	2,80	1,87	1,55	1,10	1,25	1,12	1,80	2,89	3,80	2,18
2000	2,67	2,21	2,02	2,13	1,3	0,943	1,08	0,998	0,9	2,08	2,97	3,1	1,87
2001	3,31	2,24	2,7	2,55	1,4	1,13	1,05	1,15	1,5	1,24	1,67	1,54	1,79
2002	1,92	1,91	1,67	1,36	1,52	1,08	0,89	1,86	2,11	2,85	2,59	2,78	1,88
2003	3,35	2,53	0,958	1,25	0,987	1,04	0,741	0,87	1,04	2,73	3,26	3,17	1,83
2004	3,09	2,87	3,65	2,88	2,64	2,07	1,29	1,09	1,15	1,73	2,95	3,61	2,42
2005	2,56	2,91	2,8	2,49	1,84	1,35	1,3	0,875	1,14	1,55	1,91	3,54	2,02
2006	3,14	2,12	2,89	2,45	2,41	1,45	1,21	1,27	2,07	2,1	1,63	2,5	2,1
2007	2,07	3,13	2,83	2,23	1,75	1,71	0,898	0,626	0,645	1,21	2,98	2,89	1,91
2008	3,08	1,99	3,03	3,08	2,10	1,72	1,44	1,19	0,97	0,62	2,78	3,78	2,15
2009	3,34	3,08	2,88	2,15	2,20	2,44	2,01	1,51	1,24	2,65	2,95	3,71	2,51
2010	3,52	3,66	3,36	2,77	2,37	1,76	1,51	1,54	1,98	2,73	3,39	3,77	2,70
2011	2,35	1,87	2,68	1,99	2,40	1,30	1,47	1,37	1,07	0,81	1,99	2,89	1,85
2012	1,60	2,18	2,18	2,93	1,94	1,19	1,20	1,01	0,67	2,06	2,42	3,58	1,91
2013	3,26	3,26	3,26	2,83	1,80	2,23	1,28	1,22	1,05	2,13	2,95	2,54	2,32
2014	3,22	3,70	2,27	1,82	1,94	1,16	1,85	1,74	2,85	1,42	2,81	3,31	2,34
2015	3,01	3,19	2,49	2,09	1,25	0,63	0,66	0,83	0,31	2,92	1,91	1,21	1,71
2016	2,68	3,06	2,86	1,81	2,95	2,26	1,08	0,77	0,30	1,63	2,65	1,69	1,98
2017	2,25	2,51	2,87	1,30	1,73	0,84	0,73	1,18	1,10	0,18*	2,26	3,46	1,84
2018	2,70	3,17	3,42	2,45	1,55	1,21	0,91	0,91	0,47	1,56	3,05	3,05	2,04
Sr	2,59	2,35	2,36	2,29	1,86	1,39	1,13	1,11	1,15	1,87	2,53	2,95	1,97
Stdev	0,75	0,83	0,73	0,52	0,51	0,51	0,33	0,30	0,67	0,76	0,67	0,73	0,28
Cv	0,29	0,35	0,31	0,23	0,28	0,36	0,29	0,27	0,58	0,41	0,26	0,25	0,14
Max	3,82	3,70	3,65	3,08	2,95	2,44	2,01	1,86	2,85	3,02	4,16	4,01	2,70
Min	0,78	0,60	0,66	1,21	0,99	0,59	0,52	0,50	0,30	0,46	1,18	1,21	1,52

* vjerojatno podcijenjena vrijednost dobivena regresijskom analizom, pa je izostavljena pri detaljnim sagledavanjima



Slika 5.7. Hod karakterističnih godišnjih vrijednosti srednjih i minimalnih srednjih mjesečnih protoka zabilježenih na postaji Modro oko (1980.-2018.) i njihov trend



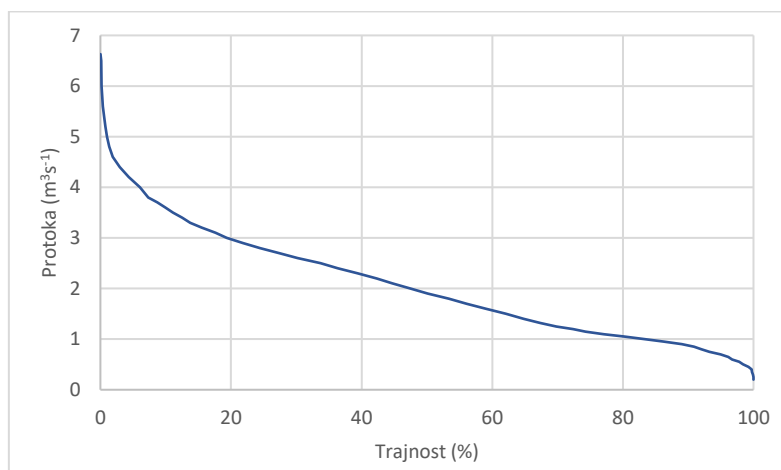
Slika 5.8. Unutar godišnja raspodjela prosječnih srednjih, maksimalnih i minimalnih srednjih mjesečnih protoka na postaji Modro oko (1980.-2018.)

Provedeno je **ispitivanje homogenosti** dvaju serija podataka - za razdoblje 1980.-2007., te za razdoblje 2008.-2018. za srednje godišnje protoke i najmanje srednje mjesečne protoke (Tablica 5.2). Odabrana su ova dva razdoblja iz razloga što DHMZ-ova vodomjerenja a i krivulje se naglašeno razlikuju za razdoblje do 2007. godine i nakon toga. Testiranje homogenosti provedeno je Wilcoxonovim neparametarskim testom (Žugaj, 2015). Dobiveni rezultati za srednje godišnje protoke i minimalne srednje mjesečne protoke pokazuju da su nizovi homogeni, iako zapravo podaci iz razdoblja prije napuštanja korištenja vode za navodnjavanje ne uključuju i te količine voda, nego samo prelivne količine. No za postojeći režim korištenja voda za potrebe vodoopskrbe koji se kreće reda veličine unutar 1-2 L/s, takvo korištenje nema značenje na ukupnu izdašnost/prelivne količine voda.

Tablica 5.2. Ispitivanje homogenosti podataka o srednjim godišnjim protocima i minimalnim srednjim mjesečnim protocima za razdoblje od 1980.-2018.

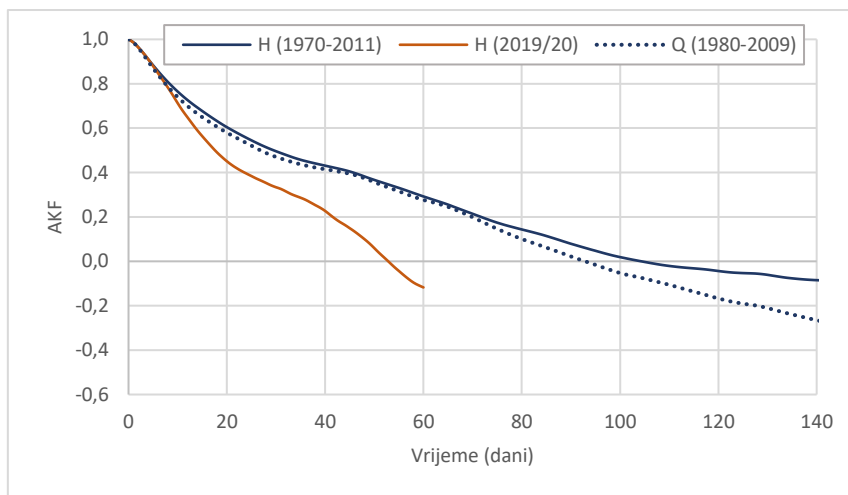
1980.-2007. / 2008.-2018.	Srednji godišnji protoci	Minimalni srednji mjesečni protoci
Standardna jedinična devijacija U0	-1,75	0,28
Ocjena homogenosti	HOMOGEN	HOMOGEN

Provedene su i **analize učestalosti i trajnosti** srednjih dnevnih protoka u razdoblju od 1980. do 2009. tijekom godina za koje je ocijenjeno da su konsumpcijske krivulje prihvatljive (Slika 5.9). U tom razdoblju, srednji dnevni protoci kretali su se u rasponu između 6,63 i 0,216 m^3s^{-1} , s prosjekom od 1,99 m^3s^{-1} . Za analizirano razdoblje, odgovarajuće karakteristične vrijednosti trajanja protoka tijekom malovodnih razdoblja iznose $Q_{50\%}=1,90 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, $Q_{80\%}=1,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ i $Q_{95\%}=0,70 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.



Slika 5.9 Krivulja trajnosti protoka za hidrološku postaju Modro oko (1980. – 2009.)

Provedene su **analize autokorelacijskih funkcija (AKF)** raspoloživih nizova srednjih dnevnih protoka (1980.-2009.) i vodostaja za dugotrajno razdoblje monitoringa DHMZ-a (1970.-2011.), kao i za hidrološku godinu (2019./20.) tijekom obnovljenog monitoringa na hidrološkoj postaji Modro oko (Slika 5.10). Ukoliko se kao razinu značajnosti postojanja autokorelacijske zavisnosti uzme vrijednost 0,2 (Mangin, 1984), vidljivo je da razdoblje u kojem je vrijednost AKF veća od 0,2 traje 71 dan za vodostaje te vrlo bliskih 69 dana za protoke kod dugotrajnog raspoloživog razdoblja obrade, te 41 dan za vodostaje tijekom hidrološke godine 2019/20, a uzrok čega bi mogla biti detaljnija diskretizacija očitavanja vodostaja tijekom recentnog razdoblja monitoringa. Vidljivo je da Modro oko ima dosta dugu međuovisnost o prethodnom stanju hidroloških prilika, a što potvrđuje pretpostavku da se prihranjuje podzemnim vodama koje potječu iz udaljenijih dijelova sliva i njegova krškog vodonosnika.



Slika 5.10. Autokorelacijska funkcija protoka (1980.-2009.) i vodostaja (1970.-2011. i za hidrološku godinu 2019/20) na hidrološkoj postaji Modro oko

Analize vjerojatnosti pojava srednjih godišnjih protoka provedene su u smjeru ocjene njihovih najvećih i najmanjih vrijednosti, pri čemu su korišteni raspoloživi osmotreni kao i na osnovu njih nadopunjeni podaci s hidrološke postaje Modro oko u razdoblju od 1980. do 2018. godine (Tablica 5.3). U istoj tablici i za isto razdoblje prikazane su i analize vjerojatnosti pojave najmanjih srednjih mjesečnih protoka u smjeru ocjene njihovih najmanjih vrijednosti. One su dane u dvije varijante - u jednoj su uzete sve vrijednosti, dok je u drugoj isključena vrijednost ekstrema iz 2017. godine (nije uzeta najmanja nego prva sljedeća u nizu). U Tablici 5.4 prikazane su analize vjerojatnosti srednjih mjesečnih protoka za mjesec srpanj, kolovoz i rujan radi ocjene njihovih najmanjih vrijednosti.

Tablica 5.3. Vjerojatnost pojava/povratni period srednjih godišnjih protoka i najmanjih srednjih mjesečnih protoka na hidrološkoj postaji Modro oko za razdoblje od 1980. do 2018.

Raspodjela		Srednje godišnje protoke (m ³ s ⁻¹)		Najmanje srednje mjesečne protoke (m ³ s ⁻¹)	
		GEV	GEV	Log Pearson III	Log Pearson III
Povratni period (God)	Vjerojatnost pojave (%)	Vjerojatnost pojava najmanjih protoka	Vjerojatnost pojava najvećih protoka	Vjerojatnost pojava malih voda*	Vjerojatnost pojava malih voda
2	50	1,91	1,91	0,792	0,793
5	20	1,73	2,17	0,517	0,553
10	10	1,65	2,34	0,396	0,447
20	5	1,59	2,51	0,309	0,371
50	2	1,53	2,72	0,228	0,296
100	1	1,50	2,89	0,183	0,253

* uključena proračunata nelogična minimalna vrijednost od 0,18 iz 2017. godine

Tablica 5.4. Vjerojatnost pojava/povratni period srednjih mjesečnih protoka za mjesec srpanj, kolovoz i rujan na hidrološkoj postaji Modro oko za razdoblje od 1980. do 2018.

Srednje mjesečne protoke (m^3s^{-1}) - Vjerojatnost pojava malih voda				
Raspodjela		Pearson III	Pearson III	GEV
Povratni period (God)	Vjerojatnost pojave (%)	Srpanj	Kolovoz	Rujan
2	50	1,104	1,086	1,00
5	20	0,852	0,849	0,611
10	10	0,736	0,737	0,455
20	5	0,647	0,651	0,344
50	2	0,555	0,559	0,235
100	1	0,498	0,502	0,169

Iz proračunatih vrijednosti srednjih godišnjih protoka vidljivo je da oni variraju u relativno uskom rasponu, odnosno da i pri rjeđim vjerojatnostima njihovih pojava, srednji godišnji protoci ne poprimaju niti iznimno velike, a niti iznimno male vrijednosti, što ukazuje na stabilnost prihranjivanja ovog priobalnog krškog izvora.

Najmanji godišnji srednji mjesečni protoci pokazuju da se pri rjeđim povratnim periodima (50-100 godišnji) mogu javiti i relativno male izdašnosti reda veličine $0,250 - 0,300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, pri čemu u provedenim analizama nije uključena i nerealno niska proračunata vrijednost protoka iz listopada 2017.g. Ukoliko se pak analiziraju vjerojatnosti pojave najmanjih srednjih mjesečnih protoka u ljetnim mjesecima, kada su i sezonske potrebe najveće, situacija je nešto povoljnija jer i pri spomenutim rjeđim povratnim periodima, srednji mjesečni protoci u srpnju i kolovozu se kreću između $0,500$ i $0,550 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, za 50 do 100-godišnji povratni period, a između $0,169$ i $0,235 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ tijekom rujna, kada su u pravilu i potrebe za vodoopskrbom najmanje zbog prestanka trajanja glavne turističke sezone.

Bitno je napomenuti da se ne radi o najmanjim mjesečnim protocima, nego najmanjim srednjim mjesečnim protocima, izvedenim iz osrednjenih vrijednosti protoka tijekom čitavog mjeseca, unutar kojeg su prisutne varijacije ne samo dnevnih nego i satnih protoka, a koje mogu poprimiti i značajnije manje vrijednosti. Prema provedenim vodomjerenjima, tijekom 2019. godine, u dva je navrata (tijekom kolovoza i listopada) zabilježen je protok od $0,470 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a prema podacima o provedenim vodomjerenjima DHMZ-a, dne 18.11.1986. izmjeren je još manji minimalni protok od $0,277 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Proračunati apsolutni minimum protoka iznosi $0,216 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (u rujnu 1986.), pri čemu valja napomenuti da je isti sigurno bio uvjetovan istovremenim značajnijim korištenjem voda za potrebe navodnjavanja.

Na osnovu danih informacija i međuodnosa, kao i iskustva sa istjecanjima pojedinih krških izvora na širem regionalnom prostoru, može se procijeniti da se minimalne izdašnosti Modrog oka kod jako učestalih povratnih perioda (do 5-godišnjeg) kreću oko $0,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, kod relativno učestalijih (od 10 do 20-godišnjeg povratnog perioda) se kreću između $0,3 - 0,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a da kod još rjeđih, između 50 i 100 godišnjeg, mogu pasti i do $0,2 - 0,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Naravno, uslijed utjecaja klimatskih promjena mogu se očekivati još ekstremnija stanja do kraja ovoga stoljeća. Isto tako, na raspoloživost voda za potrebe vodoopskrbe utječu i količine voda koje su

potrebne za osiguranje dobrog ekološkog stanja, za što su polazne hidrološke procjene dane u točki 5.4 ovog dokumenta.

Pri analizi hidroloških značajki posebnu važnost imaju analize sušnih razdoblja, odnosno **recesijskih krivulja** pražnjenja vodnih zaliha. Analiza recesijskog razdoblja podrazumijeva analizu opadajućeg dijela hidrograma otjecanja koji odgovara bezoborinskom razdoblju, kada nema vanjskih utjecaja, kao ni prisilnog pražnjenja rezervi voda njihovim precrpljivanjima. U danom dokumentu, pri analizi protoka Modrog oka, korišten je model/jednadžba pražnjenja prema Maillet-u (1905), koji unatoč dugo vremena od njegova nastanka, u većini slučajeva dobro aproksimira režim istjecanja rezervi podzemnih voda (Urumović i sur., 2009). Maillettova jednadžba ima oblik:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

Ona daje ovisnost protoka u vremenu t (Q_t) od protoka na početku razdoblja recesije (Q_0).

Koeficijent α [T^{-1}] predstavlja koeficijent pražnjenja ili koeficijent recesije, koji ovisi o geometriji sliva i krškog vodonosnika, odnosno značajkama transmisivnosti i uskladištenja. Smatra da vrijednostima α reda veličine 10^{-2} odgovara brzo pražnjenje krupnih krških kanala i pukotina, dok blaži nagibi krivulja pražnjenja, α reda veličine 10^{-3} , ukazuju na pražnjenje sitnih pukotina i klastične ispune krških provodnika (Krešić, 1991).

Na Modrom oku, za razdoblje od 1980. do 2009. godine, analizirano je više izraženih recesijskih razdoblja, no koja ipak nisu bila u potpunosti bez oborina iz razloga što su takva bezoborinska razdoblja prirodnog istjecanja podzemnih voda uglavnom ipak relativno kraćih trajanja. Stoga su u analizu uzete i situacije kada je bilo manjih utjecaja izoliranih oborinskih epizoda, čiji je utjecaj na dinamiku istjecanja podzemnih voda bio kratkotrajan i utjecao na pražnjenje samo brze komponente podzemnog istjecanja.

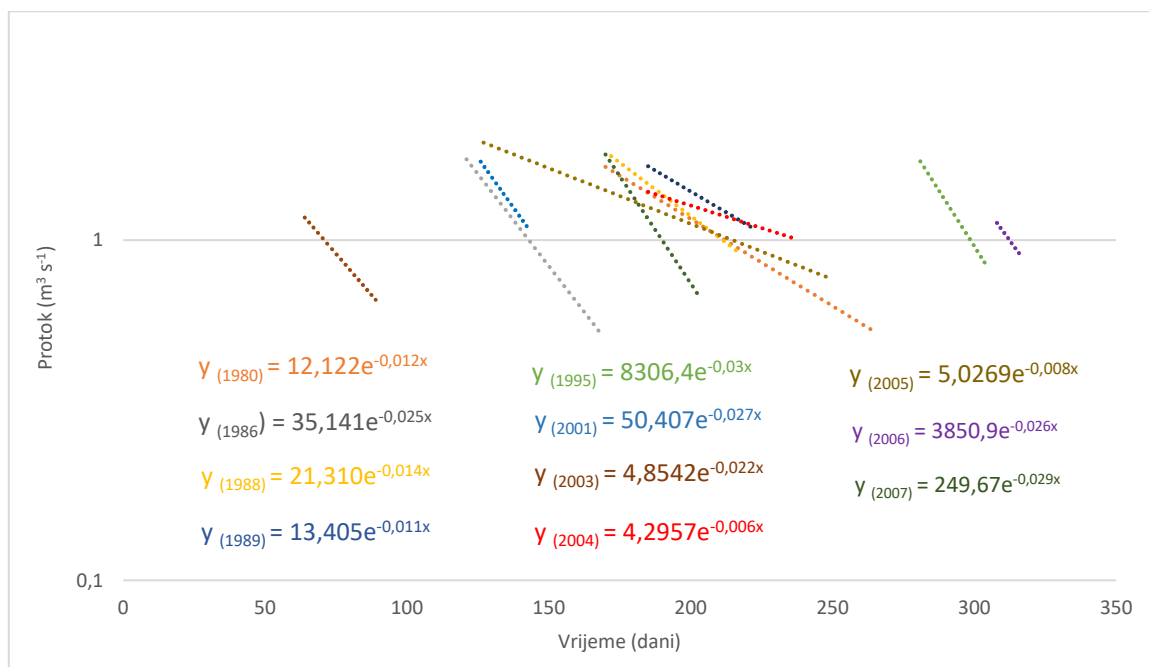
U Tablici 5.5 dan je pregled 11 izdvojenih različitih razdoblja recesije i za njih određenih koeficijenta recesije. Duljine izdvojenih razdoblja recesije su se kretala od minimalno 10 dana do maksimalno 122 dana, s prosjekom trajanja od 47 dana. U spomenutoj tablici, za međusobnu usporedbu dobivenih koeficijenata recesije, dane su i vrijednosti srednjeg dnevnog protoka prvog (Q početno), kao i zadnjeg dana (Q završno) pojedinih razdoblja recesije. Dobivene vrijednosti koeficijenata recesije reda su veličine 10^{-2} , pri čemu srednji koeficijent recesije iznosi -0,019, maksimalni -0,006, a minimalni -0,030. Dakle u analiziranom slučaju Modrog oka radi se o relativno brzom pražnjenju njihovih podzemnih rezervi, a time i većoj osjetljivosti na pojave dugotrajnih sušnih razdoblja.

Na Slici 5.10 dan je grafički prikaz dobivenih krivulja recesije Modrog oka u polulogaritamskom mjerilu, s pripadajućim jednadžbama, na način da prvi dan pojedinog recesijskog razdoblja odgovara stvarnom datumu. Sa slike vidimo da uglavnom većina krivulje recesije obuhvaćaju ljetno razdoblje, kada se ujedno pojavljuju i pražnjenja pri najnižim vrijednostima srednjih protoka. Jedino su izuzetak tri krivulje - recesijska krivulja iz 2003. godine (redni broj 7 u Tablici 5.5), koja se pojavljuje zimskom-proljetnom razdoblju, te recesijske krivulje iz 1995. i 2006. godine (redni broj 5 i 10 u Tablici 5.5) koje se pojavljuju u kasno jesenskom periodu. Također

se sa predmetne slike može uočiti da izdvojena recesijska razdoblja nemaju ujednačeni režim, odnosno nagib krivulje pražnjenja.

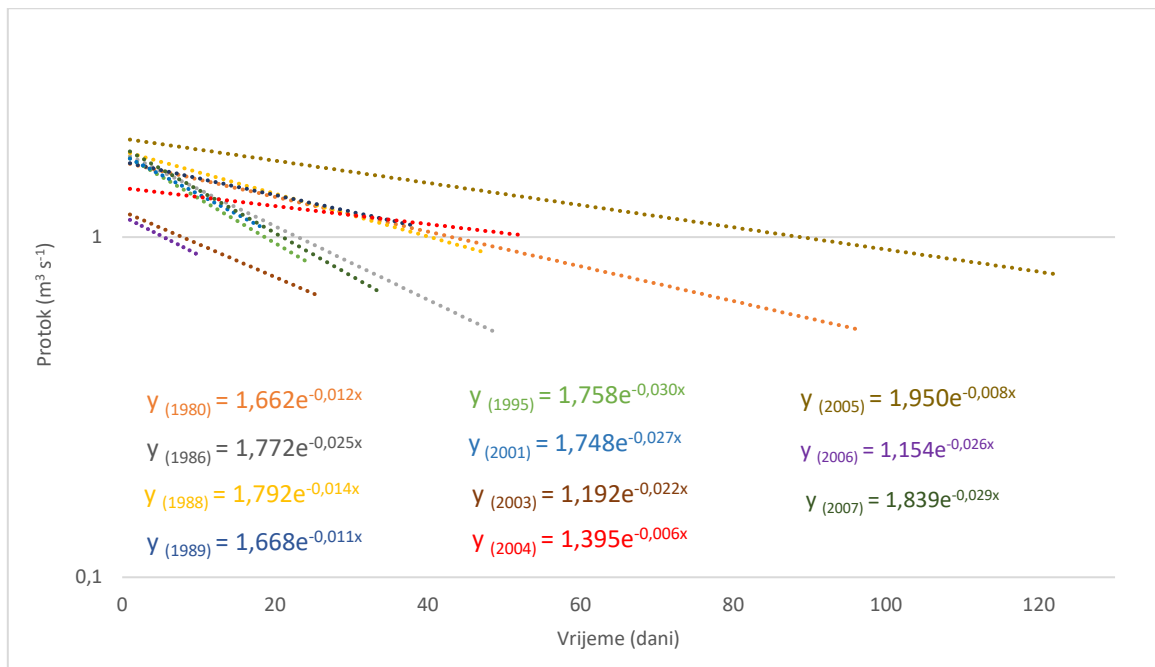
Tablica 5.5. Koeficijenti recesije dnevnih protoka Modrog oka u razdoblju od 1980. do 2009.

Redni br.	Godina	Trajanje (dani)	Q početno (m ³ s ⁻¹)	Q završno (m ³ s ⁻¹)	α (dan ⁻¹)
1	1980	96	1,59	0,415	-0,012
2	1986	49	1,71	0,51	-0,025
3	1988	47	1,91	0,905	-0,014
4	1989	38	1,68	1,09	-0,011
5	1995	24	1,73	0,848	-0,030
6	2001	18	1,75	1,12	-0,027
7	2003	26	1,26	0,661	-0,022
8	2004	49	1,57	0,984	-0,006
9	2005	122	2,04	0,685	-0,008
10	2006	10	1,12	0,888	-0,026
11	2007	34	1,61	0,560	-0,029
Sr		47	1,63	0,788	-0,019
Stdev		34	0,261	0,237	0,009
Cv		0,73	0,160	0,301	-0,477
Max		122	2,04	1,12	-0,006
Min		10	1,12	0,415	-0,030



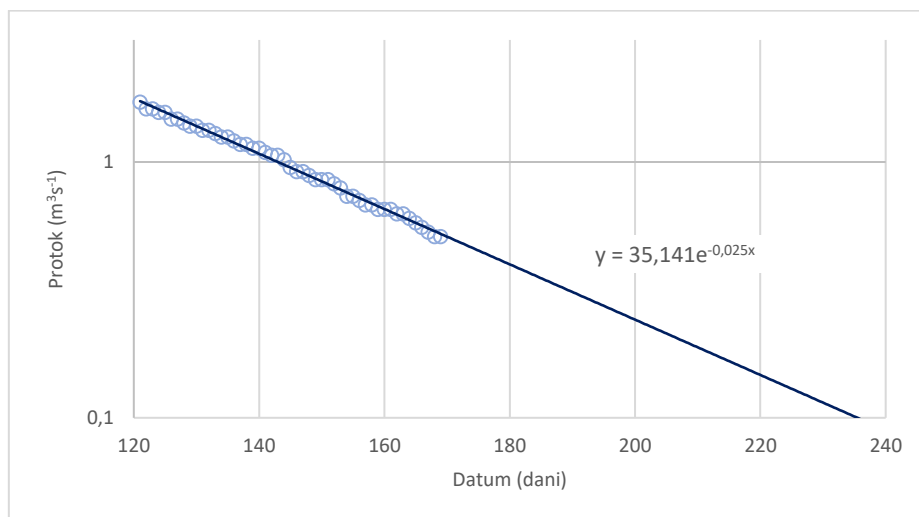
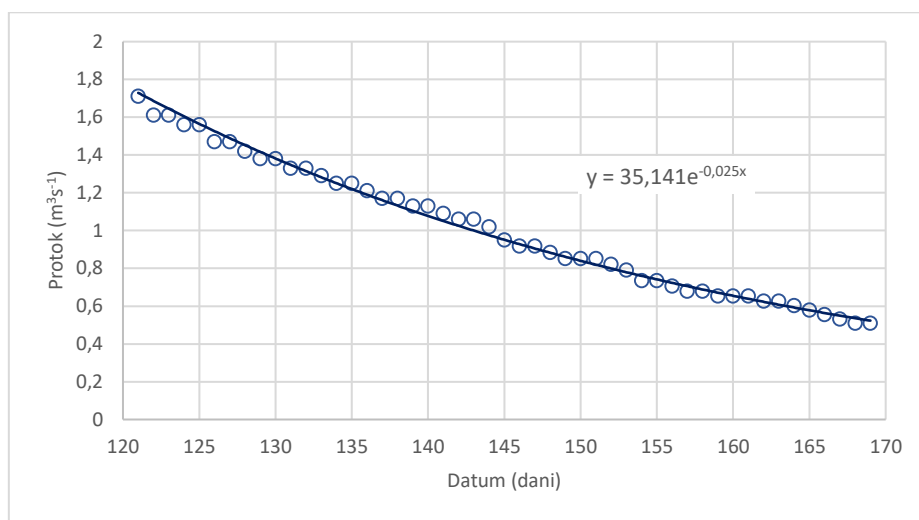
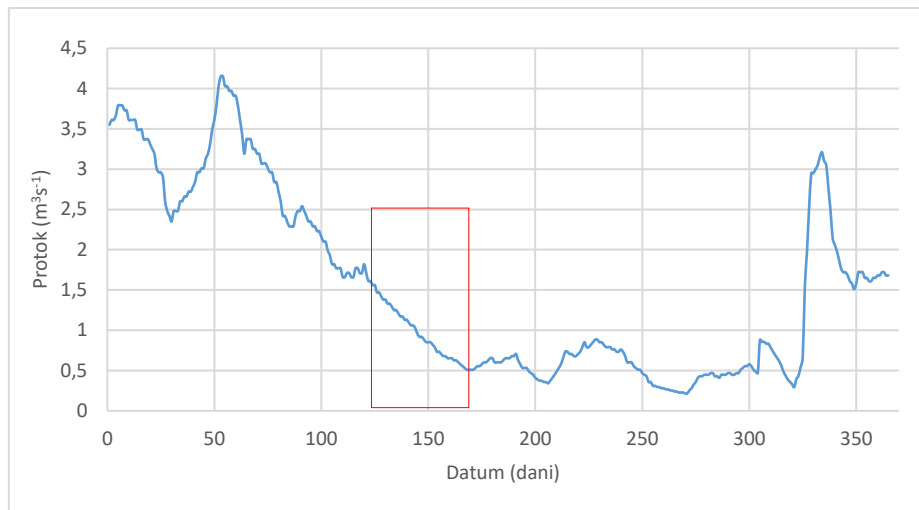
Slika 5.10. Krivulje recesije Modrog oka u razdoblju od 1980. do 2009. godine raspoređene prema datumu pojavljivanja

Na Slici 5.11, prikazane su sve analizirane krivulje recesije Modrog oka u polulogaritamskom mjerilu, ali sa istim vremenskim zajedničkim ishodištem. Na taj način mogu se međusobno usporediti nagibi dobivenih krivulja, trajanje recesijskog razdoblja, kao i srednji protoci pri kojima započinje pojedino recesijsko razdoblje. Vidljivo je da je najdulje razdoblje recesije karakteriziralo krivulju iz 2005. g., koja je imala koef. recesije (-0,008) vrlo sličan vrijednosti koeficijenta tijekom recesijskog razdoblja iz 2004. (-0,006). Vidimo da te dvije krivulje imaju najblaži nagib, odnosno α reda veličine 10^{-3} , što odgovara sporijem pražnjenju. No, vjerojatnije je da je to sporije pražnjenje ipak bilo rezultat djelomičnog prihranjivanja podzemlja novim oborinama tijekom tako dugotrajnih recesijskih razdoblja, tako da se te krivulje ne mogu smatrati mjerodavnim reprezentima dinamike pražnjenja ovoga izvora u dugotrajnim sušnim razdobljima. Sve ostale krivulje imaju strmiji nagib krivulja, a najstrmija je 1995. godine sa koef. recesije od -0,030.



Slika 5.11. Krivulje recesije Modrog oka u razdoblju od 1980. do 2009. godine

Kao mjerodavnu za procjenu dinamike pražnjenja zaliha podzemnih voda tijekom sušnijih razdoblja, može se prihvatiti recesijsku krivulju iz 1986. godine, kojoj vrijednost koeficijenta recesije iznosi -0,025 (Slika 5.12.). To je nešto veće od prosječne vrijednosti od 0,019, pa i od prosječne vrijednosti za analizirana razdoblja bez 2004. i 2005., čime se je na strani sigurnosti ukoliko se ekstrapolira dinamika otjecanja podzemnih voda na tom izvor.



Slika 5.12. Odabrana mjerodavna recesijska krivulja iz 1986. godine: gore – cjelokupni godišnji hidrogram otjecanja s prikazom izdvojenog recesijskog razdoblja, sredina – izdvojeno razdoblje na osnovu kojeg je definirana recesijska krivulja, dolje – ekstrapolirana odabrana recesijska krivulja u polulogaritamskom mjerilu

U Tablici 5.6 dan je prikaz ekstrapoliranih vrijednosti srednjih dnevnih protoka izvora Modro oko za slučajeve nastavka trajanja sušnog razdoblja u rasponu od 15-60 dan, s pretpostavljenim početkom dne 30. lipnja koji obično predstavlja početak glavne špice turističke sezone. Pri tome su uzete različite varijante srednjeg dnevnog protoka na kraju lipnja – počev od $1,28 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ koliko je prosječna vrijednost protoka na dne 30. lipnja za 20-odabranih godina unutar razdoblja 1980.-2007. za koje je konsumpcijska krivulja ocijenjena zadovoljavajuće pouzdanom, kao i za protok od $0,653 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, koliki je najmanji zabilježeni protok (1982.) tijekom tog mjeseca. Uz njih, uzete su i pretpostavljene nešto niže kritičnije vrijednosti - $1,0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ te $0,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Radi usporedbe, apsolutni minimum preljevnih protoka od $0,216 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ zabilježen je u rujnu 1986., u uvjetima vjerojatno značajnijih crpljenja voda za potrebe navodnjavanja, no koje se nisu registrirale.

Tablica 5.6. Procijenjene vrijednosti srednjih dnevnih protoka izvora Modro oko na temelju recesijske krivulje s odabranim koeficijentom recesije -0,025

Broj dana od početka promatranog dijela nastavka recesije	Početni protok (m^3s^{-1})			
	1,28	0,653	1,0	0,5
15 dana	0,880	0,449	0,687	0,344
30 dana	0,605	0,309	0,472	0,236
45 dana	0,416	0,212	0,327	0,163
60 dana	0,286	0,146	0,221	0,111

Iz navedenih procjena danih u Tablici 5.6, za očekivati je da u slučaju da je protok na izvoru Modro oko krajem lipnja prosječan za to doba, i da čak tijekom cijela dva naredna mjeseca nema značajnijih oborina koje bi povećale njegovu izdašnost, krajem kolovoza njegova izdašnost može pasti na oko $0,286 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. U slučaju da se na kraju lipnja pojavi ekstremno niska zabilježena vrijednost protoka od $0,653 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, u takvim pretpostavljenim iznimnim sušnim hidrološkim prilikama protok na kraju kolovoza hipotetski može pasti na oko $0,146 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. No, u pravilu ipak i ljetni mjeseci nose izvjesna povećanja protoka, pa je tako upravo te 1982.g. spomenuti protok s kraja lipnja zabilježen i krajem kolovoza, pri čemu je to bio ujedno i najmanji protok tijekom te ljetne sušne sezone. Za spomenuti je da su i analize recesijskih razdoblja provedene na podacima o dnevnim preljevnim protocima s izvora Modro oko, tj. nisu mogla biti uzeta u obzir i crpljenja za potrebe navodnjavanja, tako da su ukupne izdašnosti izvora Modro oko ipak bile veće – moguće reda veličine i za stotinjak l/s.

Uzimajući sve to u obzir, rezultate provedenih analiza kao i vjerojatnosti najmanjih srednjih mjesečnih protoka (Tablice 5.1, 5.3, 5.4), može se ocijeniti da su minimalne ljetne izdašnosti izvora Modro oko (srpanj i kolovoz) od oko $0,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ u prosječnim hidrološkim prilikama, a tijekom sušnih moguće i dvostruko manje. Još niže vrijednosti minimalnih srednjih dnevnih protoka ($0,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) se tijekom iznimno sušnih godina mogu očekivati u rujnu pa i listopadu, no s vodoopskrbnog stanovišta to je manji problem jer su tada i sezonske potrebe za vodom značajnije manje nego li u špici sezone. Rezultati nekoliko serija vodomjerenja provedenih

tijekom 2019.g. potvrđuju da se mogu javiti relativno niske vrijednosti protoka jer je u dva navrata izmjerena protoka Modrog oka bila $0,470 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. No ipak, radilo se o vrijednosti protoka u plimnim uvjetima, i unutar istoga dana u promijenjenim uvjetima – pri oseci, zabilježeno je značajnije povećanje protoka Modroga oka, što upućuje na potrebu da se pri eventualnom budućem korištenju toga izvora za potrebe vodoopskrbe, režim crpljenja mora prilagoditi unutar dnevnim kolebanjima njegove izdašnosti.

Dane procjene minimalnih izdašnosti izvora Modro oko bliske su planiranim količinama proširenja korištenja voda toga izvora u vodoopskrbi do oko 250 L/s (s IGH i Hidroing, 2009; prema Akvaproyekt i Hidroekspert, 2002). No pri tome valja računati i potrebu osiguranja dobrog ekološkog stanja voda ovoga izvora i s njime hidrografski povezanog nizvodnog područja jezera Desne i njegove hidrografske mreže. Isto tako, valja računati i na mogućnost pogoršanja kakvoće vode uslijed dugotrajnijih crpljenja tijekom sušnih razdoblja te povećanja električne vodljivosti zbor postupnog prodora mora u krški vodonosnik. Naime, tijekom provedenog razdoblja monitoringa 2019.-2020., registrirane koncentracije električne vodljivosti ($1,43 \text{ mS/cm}$), koje su zapažene na kraju monitoringa, kao i njihov trend dnevnog povećanja čak i u uvjetima kad su crpljenja zanemariva, daju naslutiti da se na izvoru Modro oko mogu učestalije javiti i koncentracije koje prelaze MDK od $2,5 \text{ mS/cm}$. Stoga je nužno u budućim istraživanjima voditi računa i o mogućnosti da Modro oko prekoračuje u pojedinim situacijama MDK električne vodljivosti i sadržaja klorida, a što bi se u uvjetima povećanih crpljenja i posljedično tome snižavanja razine vode na samome jezerskom oku, moglo intenzivirati, pa i onemogućiti ili ograničiti korištenje voda iz tog resursa.

5.4. Ocjena hidroloških elemenata ekološki prihvatljivog protoka (EPP) za zahvat voda iz izvora Modro oko

5.4.1. Metodologija procjene EPP

Prema Bonacciju (2003), vodu iz otvorenih vodotoka čovjek koristi najduže vremena i u najvećem iznosu vodeći prvenstveno brigu o zadovoljenju svojih potreba. No, u objektivnoj situaciji nemogućnosti njihova cjelokupnog vraćanja u prirodno stanje, nužno je osigurati kompromisna rješenja koja neće voditi k daljnjoj degradaciji prirodnih vodnih sustava. Takvim bi se rješenjima i pripadajućim vodnogospodarskim upravljačkim aktivnostima trebalo osigurati zadovoljavanje određenih iskazanih potreba za vodom na način i uz ograničenja kojima bi se istovremeno omogućio i opstanak, ili pak u situacijama prisutnih degradirajućih rješenja i povratak prirodnih funkcija nizvodnijeg vodnog sustava. Takva situacija dovela je do stvaranja posebnih metoda i modela koji na razne načine, koristeći različite kriterije i mjerila, pokušavaju za potrebe ekologije i zaštite okoliša tretirati problematiku upravljanja vodama otvorenih vodotoka. Različiti razlozi i različite vrste, ali i primjena različitih metoda, zahtijevaju i različite protoke potrebne okolišu. Najčešće se radi o protocima vezanim uz stanja malih voda, odnosno o potrebi nametanja nekih karakterističnih pokazatelja malih voda kao ograničavajućeg faktora pretjeranoj eksploataciji vodnih resursa. Prve studije o protocima otvorenih vodotoka potrebnim okolišu započele su se raditi ranih osamdesetih godina

dvadesetog stoljeća. Cilj im je bio odrediti protoke dovoljne za održanje određene vrste. Spomenuta hidrološka svojstva potrebno je povezati sa životnim ciklusom analizirane vrste (Gordon i drugi, 1992 - prema Bonacciju, 2003). Za istaknuti je da je prethodno referencirana Bonaccijeva (2003) knjiga Ekohidrologija vodnih resursa i otvorenih vodotoka bila najvažniji izvor provedenih razmatranja hidroloških elemenata ocjene EPP u ovom dokumentu. No, vrijedi istaknuti i da se u slučaju preljeva iz izvora Modro oka radi o specifičnom vodotoku, koji se nalazi pod utjecajem uspora mora, tako da mu razina vode ne predstavlja kritični element, jer je ista zagarantirana dinamikom kolebanja razine mora. Isto tako, u danom slučaju ne radi se samo o količinskom problemu, jer pri kritičnim sušnim prilikama dolazi i do povećanog zaslanjivanja kako samoga izvora i njegovog krškog vodonosnika, tako i samog odvodnog kanala njegovih voda koji se spaja s jezerom Desne i kanalom Desanka, te dalje prema Crnoj rijeci i odvojkju prema glavnom koritu Neretve (Slika 1.5).

Nova Uredba o standardu kakvoće voda (NN 96/19) u svom članku 22. navodi da Ekološki prihvatljiv protok osigurava hidrološki režim koji je usklađen s postizanjem okolišnih ciljeva iz članka 46. Zakona o vodama u tijelima površinskih voda osim umjetnih i znatno promijenjenih vodnih tijela, te da će se metodologija za određivanje ekološki prihvatljivog protoka temeljiti na kriterijima za postizanje dobrog stanja voda propisanim spomenutom Uredbom. No, unatoč najavi da će Hrvatske vode objaviti tekst te metodologije na mrežnim stranicama Ministarstva i Hrvatskih voda u roku od 12 mjeseci od dana stupanja na snagu spomenute uredbe, to još nije provedeno, te se za sada u ovom poglavlju ne mogu respektirati neki recentni elementi hidroloških elemenata određivanja ekološki prihvatljivog protoka kad isti još nisu niti predloženi. Prilog 2 spomenute Odluke spominje elemente ocjene ekološkog stanja jezera, među kojima je i hidrološki režim (količina i dinamika vodnoga toka, vrijeme zadržavanja, veza s podzemnim vodama), ali bez detaljnijeg tumačenja načina provedbe takvih ocjena i kriterija njihova vrednovanja.

U europskom zakonodavstvu Europska je komisija razmatrala problematiku ekološki (prihvatljivih) protoka, te je u tom smislu donesen vodič br. 31 Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive (EU Comission, 2015). U njemu navodi da postoje brojne metode za njegovo određivanje, ali se ne daju neke konkretne sugestije za postupke primjene hidroloških procjena, već je težište dano na preporukama za identifikaciju pritisaka i monitoring stanja kako hidroloških prilika, tako i drugih značajki voda, na područjima gdje se očekuje porast pritisaka uslijed zahvaćanja vode za njihovo korištenje.

No, EPP je važećim Planom upravljanja vodnim područjima 2016.-2021. (NN 55/2016) eksplicitno naveden kao jedna od važnih mjera smanjenja hidromorfoloških utjecaja za nove zahvate/opterećenja. U danom slučaju za spomenutu mjeru „Osigurati povoljni režim protoka (ekološki prihvatljiv protok) u vodotocima“, navodi se da je područje njezine primjene vodna tijela površinskih voda na područjima namijenjenim zaštiti staništa ili vrsta gdje je održavanje ili poboljšanje stanja voda bitan element njihove zaštite. Navodi se i da je za njezinu provedbu nadležan korisnik. Stoga neovisno o tome što na području Hrvatske ne postoje neki propisani metodološki pristup za procjenu EPP-a, očito je da se o potrebi osiguranja EPP mora voditi

računa, i stoga su u nastavku dani neki elementi mogućih orijentacijskih hidroloških procjena, temeljenih na dosadašnjoj praksi u Hrvatskoj, temeljem kojih je i potreba osiguranja EPP navedena u spomenutom recentnom Planu upravljanja.

U Hrvatskoj se do pred desetak godina uglavnom isključivo koristio termin **biološki minimum** dok se u svijetu koristi nekoliko termina od kojih danas prevladava **ekološki prihvatljiv protok** (u daljnjem tekstu EPP), koji se u terminološkom smislu udomaćio i u Hrvatskoj. U tom smislu dobro terminološko obrazloženje dali su Mišetić i drugi (2003). Oni ističu da je osnovno načelo pri ocjeni EPP nužnost da zadržani dotok nizvodno od vodozahvata, nakon što se zadovolje sve potrebe za vodom, treba biti dostatan za održavanje autohtonih cenoza matičnog vodotoka. Budući da se takav zadržani dotok temelji na uvažavanju hidrauličkih, hidroloških i biološko-ekoloških značajki vodotoka, zatim gospodarstva i prostorno-planske dokumentacije, njegovom definiranju treba pristupiti tako da se uvažavaju prisutni gradijenti fizikalno-kemijskih i bioloških varijabli od izvorišta do ušća, te prirodne i društvene značajke slivnog područja. Zbog toga autori smatraju da je prikladniji naziv za zadržani dotok „ekološki prihvatljiv protok“ nego li „biološki minimum“.

Pri određivanju EPP uz parametar protoke i uz nju vezanih također hidroloških svojstava vode u koritu (razina vode, brzina, svojstva nanosa), pri definiranju EPP ravnopravno figuriraju i fizikalno – kemijska svojstva, kao i odabrana biološka svojstva vodnih sustava. Uz to, nastoji se respektirati i prisutnost sezonskih različitosti analiziranih parametara tijekom godine. Takav pristup, odnosno stav da EPP za određenu dionicu otvorenog vodotoka ne treba nužno biti definiran kao jedna vrijednost minimalnog protoka koja važi tijekom cijele godine iskazan je i u nekim ranije datiranim domaćim radovima (Bonacci i Roje-Bonacci, 1997 a i b). Često se radi o nizu različitih protoka koje treba ispuštati tijekom različitih sezona godine. Oni mogu biti vezani sa svojstvima lokalne klime ili društvenim zahtjevima, a najčešće su povezani sa životnim stadijima izabranih bioindikatorskih vrsta. Kako se za to uobičajeno koriste ribe, različite vrijednosti EPP-a trebaju zadovoljiti njihove potrebe za vodom u otvorenom vodotoku tijekom mriještenja, polaganja jajašaca, migracije itd.

U nastavku razmatranja u okviru predmetnog poglavlja dan je pregled i osvrt na hidrološke aspekte nekih od metoda određivanja EPP-a koje se za vodotoke kakvi su između ostalog i na području Donje Neretve koriste u svijetu. U tom kontekstu treba gledati i koncentrirane dotoke koje takvi vodotoci primaju od izvora u svom slivu. Prikazani su karakteristični hidrološki pokazatelji koji figuriraju u tim metodama, a čija je moguća primjena od strane pojedinih autora razmatrana i preporučivana i za područje Hrvatske (Mišetić, 1995; Bonacci, 2003; Mišetić i drugi, 2003; Mišetić i Pavlin, 2004).

Takozvani **brzi i približni postupci** kako ih definira Bonacci (2003), odnosno **jednostavne metode** kako ih definira Mišetić u studiji Elektroprojekta (2000), a koje uključuju i po Bonacciju posebno specificiranu grupu metoda s metodama detaljnije analize jednog parametra, postupci su koji su zasnovani na iskustvenim načelima. Radi se o postupcima nastalim u pionirskom razdoblju određivanja EPP-a. Prema formulaciji iz spomenute studije Elektroprojekta, radi ograničenog broja podataka na kojima se baziraju vrijednosti protoka,

protoke definirane ovim metodama više odgovaraju načelima ranije korištenog termina „biološki minimum“ nego terminu „ekološki prihvatljiv protok (EPP)“, odnosno protok koji osigurava održavanje biološke ravnoteže u matičnom vodotoku nizvodno od vodozahvata do ušća prve veće pritoke ili prijamnika njihovih voda.

Ishodište tih metoda nalazi se u mjerenim hidrološkim podlogama. Prihvatljivi su i često korišteni zbog toga što ne traže previše podataka i dugotrajan rad. Neophodno je raspolagati s hidrološkim podlogama o malim i srednjim protocima. U grubo je potrebno poznavati geometriju i morfologiju dijela vodotoka za koji se određuje EPP, kao i opće ekološko i ostalo stanje na razmatranom potezu. Ovi postupci često predstavljaju samo preliminarni dio analize na koji se nastavljaju daljnja istraživanja potrebna za donošenje konačnih odluka. U tom su smislu išli i prijedlozi načina određivanja EPP u Hrvatskoj, dani u radu Mišetića i Pavlina (2004). U tom su radu dane metodološke preporuke vezane uz tip vodotoka (vodotoci strmih ili razvedenih obala) kao i raspoloživost primjerenih hidroloških podataka (ili njihov nedostatak).

Prema Mišetiću i Pavlinu (2004) predložen je interesantan i za dane prilike u Hrvatskoj vrlo pogodan pristup za određivanje EPP. Dok se ne steknu uvjeti za primjenu složenih metoda i/ili metoda biološkog odgovora, predložen je i razrađen jedan kompromisan metodološki pristup. Prema tom pristupu, najprije se, koristeći jednostavne metode temeljene na hidrološkoj komponenti pri određivanju veličine EPP, definira vrijednost potrebnog «zadržanog dotoka» (biološkog minimuma). Nakon toga se tako dobiven podatak podvrgava daljnjoj analizi uvođenjem ekoloških parametara, odnosno provjeri da li postoji potrebna prostorna i vremenska dinamika ekoloških uvjeta potrebnih za očuvanje autohtonih zajednica, osiguranja životnih uvjeta karakterističnih vrsta riba kao njihovih bioindikatora. U spomenutom je radu preporučeno i u ovom dokumentu primijenjen pristup pri korištenju jednostavnijih metoda za definiranje granične vrijednosti «biološkog minimuma», odnosno zadržanog dotoka (Q_E) kao osnove za definiranje EPP.

Osim prethodno spomenutog pristupa, kontekstu šireg prikaza najčešće korištenih jednostavnih metoda i postupaka mogu se izdvojiti još i neki drugi pristupi kao npr. **Metoda ograničenog korištenja voda** vodotoka, koja se uz ograničenje da najmanja dubina vode na dijelu vodotoka nakon vodozahvata mora biti 20 cm, temelji na prestanku korištenja voda kad se protok vode smanji na 50 L/s u manjim vodotocima, odnosno na 100 L/s u većim vodotocima.

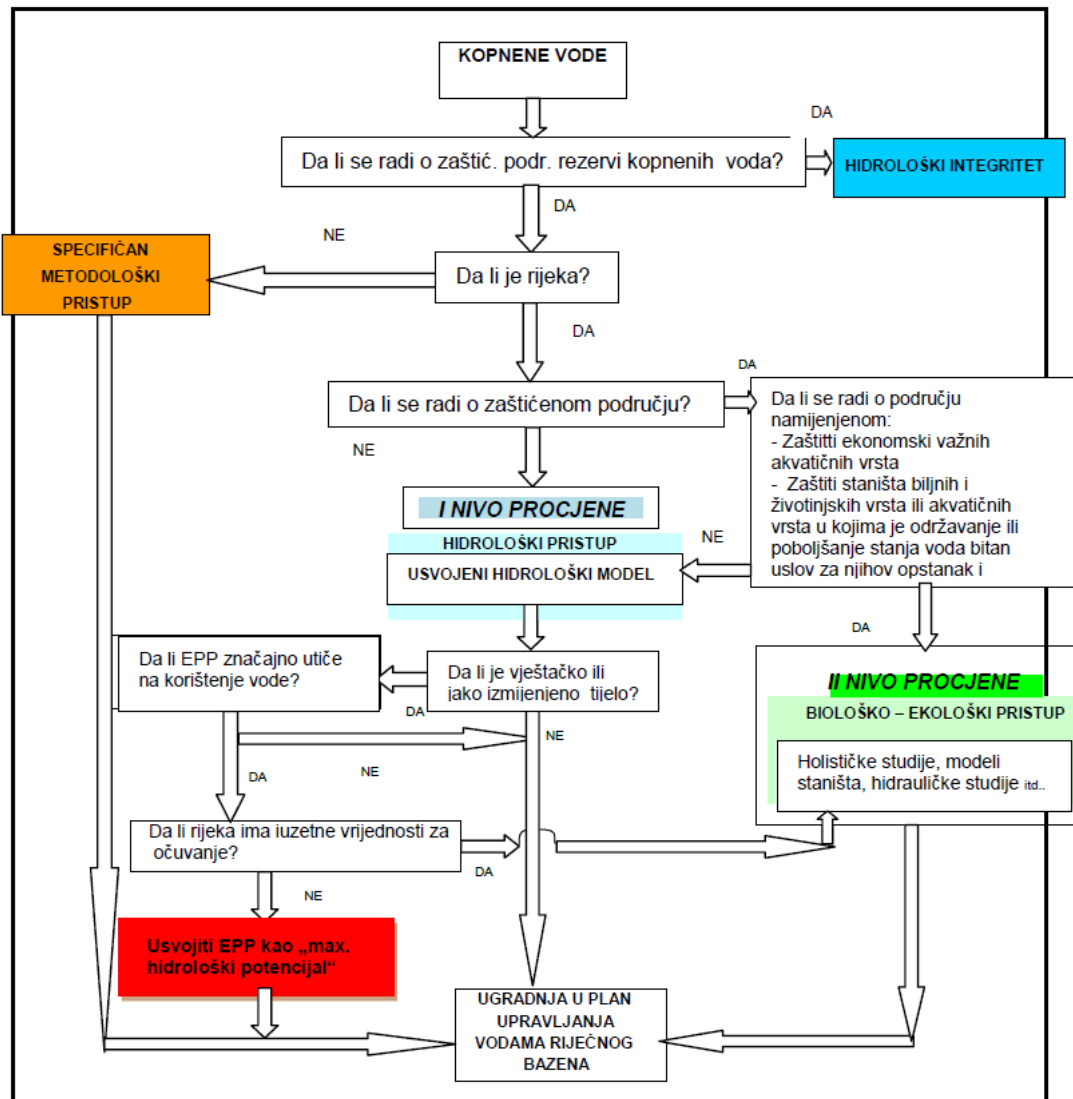
Problematikom određivanja ekološki prihvatljiva protoka bavi se i Žugaj (2015) koji pri tome koristi termin „biološkog minimuma“ odnosno „dotoka koji se mora zadržati u vodotoku“, te koji daje pregled kriterija koji se koriste u 15 europskih država kod ocjena takve kritične vrijednosti dotoka pri projektiranju malih hidroelektrana, u kojim slučajevima se u praksi primjenjuju stroži kriteriji u odnosu na zahvaćanje voda za potrebe vodoopskrbe. Autor stoga nalazi opravdanje da se i u Hrvatskoj pri ocjenama EPP koristi hidrološki pristup, barem kao orijentaciju u donošenju odluke o njegovoj veličini. Među takvim hidrološkim pristupima zbog svoje pogodnosti posebno izdvaja Mattheyevu formulu koja se koristi kad su raspoloživi višegodišnji nizovi podataka hidroloških mjerenja i opažanja.

Spomenuti pristup, prema kojemu se preporučuje Mattheyeva formula (uz napomenu da se koristi za vodotoke ili dijelove vodotoka izrazito strmih obala), dan je i u radu Mišetića i Pavlina (2004). Polazište mu čine karakteristične hidrološke značajke vodotoka, a navodi se i da je za definiranje EPP u matičnom vodotoku nizvodno od vodozahvata do restitucije osim hidroloških podataka i obrada potrebno poznavati i niz drugih morfoloških, bioloških, kao i značajki kakvoće voda. Ističe se i da, budući da je zadržani dotok vode u vodotoku nizvodno od vodozahvata definiran hidrološkim metodama u većini slučajeva nedostatan za održavanje prirodne biološke raznolikosti matičnih vodotoka jer ne uzima u obzir bio-ekološke značajke vodotoka i njegova zaobalja, ovako dobivene vrijednosti treba podvrgnuti daljnjoj analizi uvođenjem ekoloških parametara. Autori predlažu da se hidrološkim metodama definirana početna vrijednost biološkog minimuma provjeri hidrauličkim proračunom. Takvim hidrauličkim proračunom provjerava se dostatnost hidroloških uvjeta za odvijanje potrebne prostorne i vremenske dinamike osnovnih ekoloških parametara nizvodno od vodozahvata nužnih za osiguranje životnih uvjeta karakterističnih vrsta riba. Spomenutim hidrauličkim računom provjerava se dubina i brzina vode, te prekrivenost korita vodom na karakterističnim poprečnim presjecima dijelova vodotoka koje osigurava zadržani dotok definiran hidrološkim metodama.

Vezano uz hidrološke elemente ocjene EPP, za istaknuti je i ograničenja u pogledu ukupnog godišnjeg korištenja vodnih resursa. Bonacci i Roje-Bonacci (1997a, 1997b) ističu da se iz vodotoka tijekom godine **ne bi trebalo oduzimati više od 30% njegove vodne mase**.

Interesantan i pragmatičan je pristup procjeni EPP koji se primjenjuje u susjednoj Bosni i Hercegovini, dijelom zasnovan na realizaciji projekta „Živjeti Neretvu“ koji je financiran od strane norveške vlade i provodjen u suradnji WWF-om iz Norveške i stručnjacima iz EU (Slika 5.13), a koji je ugrađen i u Pravilnik o načinu određivanja ekološki prihvatljivog protoka (SN FBiH 4/2013). Dakle, radi se o istraživanjima vezanim upravo za područje sliva Neretve kome pripada i područje Modroga oka i njegove hidrografske mreže.

Po tom pravilniku procedura određivanja EPP sastoji se iz dvije razine procjene: I – opća procjena EPP za sva vodna tijela primjenom hidrološke metode dane predmetnim pravilnikom, te II – posebna procjena EPP za vodna tijela u zaštićenim područjima, kao i za područja koja nisu proglašena zaštićenim, a koja imaju izuzetne vrijednosti za očuvanje (prisustvo ugroženih staništa ili vrsta, povijesno-kulturološke ili ambijentalne vrijednosti i sl.), u kojim slučajevima se EPP utvrđuje korištenjem bioloških i ekoloških kriterija, kao dodatak hidrološkoj metodi.



Slika 5.13. Okvirna metodološka shema procjene EPP u Federaciji BiH (SN FBiH 4/2013)

Pragmatičnost ovog pravilnika, osim u prilično jednostavnom i dobro razrađenom metodološkom pristupu određivanja EPP posebno u kontekstu hidrološkog pristupa, ogleda se i u tome da se u jednom posebnom članku navodi i izuzetak, odnosno da se odredbe ovog pravilnika **ne primjenjuju u slučaju kada se radi o zahvaćanju vode za javno vodosnabdijevanje stanovništva vodom za piće i kada se ne mogu ispuniti zahtjevi za EPP propisani ovim pravilnikom.** U tom se slučaju primjenjuje odredba Zakona o vodama Federacije BiH prema kojoj se ekološki prihvatljiv protok definira kao „minimalni srednji mjesečni protok 95% vjerojatnosti pojave“.

Spomenutim Pravilnikom je regulirano da se u situacijama kada je prirodni protok na mjestu zahvata manji od proračunatog EPP, za EPP uzima vrijednost prirodnog protoka na mjestu vodozahvata, te u toj situaciji nosilac prava iz vodnog akta ne smije zahvaćati vodu. To je važna odredba jer se vrlo često definirana vrijednost EPP poistovjećuje s konstantnom vrijednošću

koju bi korisnik zahvata trebao konstantno ispuštati u vodotok, čak i u slučajevima kada su prirodni dotoci manji od definirane vrijednosti EPP.

U točki 5.4.2 ovog dokumenta procjena hidroloških elemenata EPP zahvata vode na Modrom oku Mirne provedena je na temelju metodoloških postupaka koji se temelje na raspoloživim dostatnim hidrološkim podacima. Uspoređene su metode za procjenu EPP literaturno preporučene za primjenu u Hrvatskoj (Mišetić, 1995; Bonacci i Roje-Bonacci 1997a i 1997b; Bonacci, 2003; Mišetić i Pavlin, 2004; Žugaj, 2015).

a) **za vodotoke izrazito strmih obala** - primjena Matthey-evih formula (Mišetić i Pavlin, 2004), no kako se ne radi o situaciji na području nizvodnijeg toka voda od zahvata vode na Modrom oku, ista nije detaljnije obrazlagana.

b) **za vodotoke umjereno strmih obala i vodotoke razvedenih obala** od hidroloških metoda preporučeno je da se koristi (Mišetić i Pavlin, 2004):

- metoda po kojoj se biološki minimum (EPP) definira kao prosječni minimalni godišnji protok određen kao aritmetička sredina godišnjih apsolutnih minimalnih zabilježenih protoka u promatranom razdoblju

$$Q_E = Q_{MIN(SR)}$$

c) **alarmantna granična vrijednost EPP-a Q_E**

Radi se o, po Bonacciju (2003), najnižoj trenutačnoj vrijednosti protoka ispod koje se ne smije ići:

$$Q_E = 0.2Q_{80\%}$$

pri čemu je $Q_{80\%}$ protok 80 % trajanja na srednjoj krivulji trajanja.

d) **Kriterij ograničenja u pogledu ukupnog godišnjeg korištenja vodnih resursa** - prema Bonacciju i Roje-Bonacci (1997a, 1997b)

Kako je, prema Tablici 5.1, Q_{sr} god Modrog oka $1,97 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a očekivani vršni protok na zahvatu za vodoopskrbu $0,250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, očigledno je da je očekivano ukupno godišnje zahvaćanje voda manje od 30% njegove vodne mase.

5.4.2. Rezultati preliminarnе procjene EPP za vodozahvat na Modrom oku

Predmetni monitoring i pripadajuće analize provedene su prije svega s aspekta sagledavanja mogućnosti dodatnog korištenja izvorišta Modro oko za potrebe vodoopskrbe, i to u daleko većoj mjeri od dosadašnjeg korištenja vode za lokalne potrebe u količinama do najviše nekoliko L/s. Radi se o očekivanim naglašenim sezonskim vodoopskrbnim potrebama za vodom, te je stoga problematiku EPP korisno razmotriti ne samo u kontekstu nekih godišnjih kritičnih vrijednosti, nego i u kontekstu međudnosa raspoloživih količina voda na izvorištu tijekom kritičnih mjeseci u kojima su sezonske potrebe najveće, a mogućnosti njihovog zadovoljavanja najmanje (razdoblje srpanj – rujan).

Ukoliko se, dok se ne ozvaniče u Hrvatskoj neki drugačiji metodološki pristupi za ocjenu EPP, razmatra kriterij ocjene **EPP za vodotoke razvedenih obala** (Mišetić i Pavlin, 2004), koji je po morfološkim značajkama najbliži hidrološki kriterij danom slučaju Modrog oka, isti se definira kao prosječni protok godišnjih apsolutnih minimalnih zabilježenih protoka u promatranom razdoblju. To je razdoblje kod Modroga oka, obzirom na raspoloživo razdoblje monitoringa i probleme s lošom definiranošću konsumpcijskih krivulja (zbog čega su neke godine i isključene iz analize), razdoblje 1980.-2007. (bez 1990.-1994., 1997.-1999.) za koje procijenjena vrijednost EPP iznosi:

$$Q_E = Q_{MIN(SR)} = 0,562 \text{ (m}^3\text{s}^{-1}\text{)}$$

Kod kriterija **alarmantna granična vrijednost EPP-a** Q_E (Bonacci, 2003), protok Modrog oka koji prelijeva iz vodozahvata se nikako ne bi smjeo spustiti ispod vrijednosti određene na temelju provedene analize krivulje trajanja dnevnih protoka spomenutog analiziranog razdoblja (točka 5.3):

$$Q_E = 0,2Q_{80\%} = 0,2 * 1,05 = 0,210 \text{ (m}^3\text{s}^{-1}\text{)}$$

Radi se o hidrološkim polaznim procjenama vrijednosti EPP, koje se značajno razlikuju što je i razumljivo – dok se kriterij EPP za vodotoke razvedenih obala koristi u uobičajenim hidrološkim prilikama, kriterij alarmantne granične vrijednosti EPP puno je stroži i koristi se samo u vrlo rijetkim situacijama, s malom vjerojatnošću pojave. Takve situacije su kritične ne samo hidrološke prilike u koritu toka nizvodno od zahvata, nego je moguće kritična i situacija s osiguranjem vode za potrebe vodoopskrbe. Prema Smjernicama za izradu Procjene rizika od katastrofa u Republici Hrvatskoj (Državna uprava za zaštitu i spašavanje, 2014), prirodne katastrofe u koje spadaju i suše, s malom vjerojatnošću pojave su one čija je vjerojatnost pojave 1-5%, a iznimno malom vjerojatnošću pojave ukoliko je njihova vjerojatnost manja od 1%. Kako u sklopu ocjene kriterija alarmantne granične vrijednosti protoka nije pridružena i pripadajuća vjerojatnost pojave kod koje se umjesto uobičajene vrijednosti definiranog EPP može koristiti kriterij alarmantne granične vrijednosti EPP-a, za pretpostaviti je da bi se pod situacije s pojavom naglašenih sušnih prilika tijekom kojih je moguća primjena kriterija

alarmantne granične vrijednosti EPP mogle smatrati one čija je vjerojatnost pojave manja od 5%, odnosno čiji je povratni period manji od jednom u 20 godina.

U Tablicama 5.7 – 5.9 uspoređene su proračunate vrijednostima najmanjih srednjih mjesečnih protoka s dobivenim vrijednostima EPP i vršnim potrebama za vodom iz planiranog vodozahvata na Modrom oku u količini od $0,250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (IGH i Hidroing, 2009; prema Akvaproyekt i Hidroekspert, 2002). Vrijednosti najmanjih srednjih mjesečnih protoka karakterizira relativno dug niz osmotrenih i na osnovu njih generiranih vrijednosti. Te vrijednosti, iako ne predstavljaju ekstremne mjesečne minimalne protoke, kod izvora kao što je Modro oko ipak se mogu koristiti pri danim ocjenama. Naime, radi se o izvoru koji ima velike unutar dnevne oscilacije uslijed utjecaja plime i oseke u uvjetima malih voda, relativno duboko zaleđe iz kojeg se prihranjuju, te ustaljeni režim istjecanja podzemnih voda tijekom recesijskih razdoblja. Uz to, prilikom danih generalnih aproksimacija vjerojatnosti pojave malih voda zbog nedostatka podataka o zahvaćenim količinama voda nisu mogle biti obuhvaćene ukupne vrijednosti protoka u razdoblju kad su se vode iz Modrog oka koristile za navodnjavanje, već samo vrijednosti preljevnih protoka.

Iz danih je podataka u Tablicama 5.7 – 5.9 vidljivo da pojave osiguranja EPP ne bi trebale biti problem i uz vršna crpljenja od $0,250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ tijekom srpnja i kolovoza u uvjetima pojave malih voda vjerojatnosti pojave 20-50%, odnosno 2-5 godišnjeg povratnog perioda, kao i za učestalije pojave. No, pri 10%-tnim vjerojatnosti, odnosno 10-godišnjem povratnom periodu, ako se želi osigurati EPP, nužno je crpljenja reducirati na $0,174 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ u srpnju, odnosno $175 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ u kolovozu. Tek pri pojavama malih voda malih vjerojatnosti (5%-tne i rjeđe, odnosno iznad 20-godišnjeg povratnog perioda), javlja se potreba osiguranja alarmantne granične vrijednosti EPP, i to je ostvarivo tijekom tih mjeseci zadržavanjem crpljenja na spomenuto ograničenje od oko $0,175$, odnosno $0,175 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Tablica 5.7. Ocjena kritičnih vrijednosti EPP i mogućnosti korištenja voda za vodoopskrbu sa stanovište danih hidroloških količinskih kriterija za mjesec srpanj

Povratni period (God)	Vjerojatnost pojave (%)	Proračunati najmanji srednji mjesečni protoci (m^3s^{-1})	Kritična vrijednost EPP (m^3s^{-1})	Preostaje za vodoopskrbu u normalnim stanjima (kritičnim stanjima) (m^3s^{-1})	Preostaje za osiguranje EPP-a (m^3s^{-1})
2	50	1,104	0,562	0,250	0,854
5	20	0,852	0,562	0,250	0,602
10	10	0,736	0,562	0,174	0,486
20	5	0,647	0,562 (0,210)	0,085 (0,174)	0,397 (0,472)
50	2	0,555	0,562 (0,210)	0 (0,174)	0 (0,381)
100	1	0,498	0,562 (0,210)	0 (0,174)	0 (0,324)

Tablica 5.8. Ocjena kritičnih vrijednosti EPP i mogućnosti korištenja voda za vodoopskrbu sa stanovište danih hidroloških količinskih kriterija za mjesec kolovoz

Povratni period (God)	Vjerojatnost pojave (%)	Proračunati najmanji srednji mjesečni protoci (m^3s^{-1})	Kritična vrijednost EPP (m^3s^{-1})	Preostaje za vodoopskrbu u normalnim stanjima (kritičnim stanjima) (m^3s^{-1})	Preostaje za osiguranje EPP-a (m^3s^{-1})
2	50	1,086	0,562	0,250	0,836
5	20	0,849	0,562	0,250	0,599
10	10	0,737	0,562	0,175	0,562
20	5	0,651	0,562 (0,210)	0,089 (0,175)	0,397 (0,476)
50	2	0,559	0,562 (0,210)	0 (0,175)	0 (0,384)
100	1	0,502	0,562 (0,210)	0 (0,175)	0 (0,327)

Tablica 5.9. Ocjena kritičnih vrijednosti EPP i mogućnosti korištenja voda za vodoopskrbu sa stanovište danih hidroloških količinskih kriterija za mjesec rujan

Povratni period (God)	Vjerojatnost pojave (%)	Proračunati najmanji srednji mjesečni protoci (m^3s^{-1})	Kritična vrijednost EPP (m^3s^{-1})	Preostaje za vodoopskrbu u normalnim stanjima (kritičnim stanjima) (m^3s^{-1})	Preostaje za osiguranje EPP-a (m^3s^{-1})
2	50	1,000	0,562	0,250	0,750
5	20	0,611	0,562 (0,210)	0,049 (0,175)	0,436
10	10	0,455	0,562 (0,210)	0 (0,175)	0 (0,280)
20	5	0,344	0,562 (0,210)	0 (0,134)	0 (0,210)
50	2	0,235	0,562 (0,210)	0 (0,025)	0 (0,210)
100	1	0,169	0,562 (0,210)	0 (0)	0 (0,169)

U rujnu je situacija s pojavama malih voda pojedinih godina u pravilu kritičnija, tako da je i apsolutni minimum od $0,216 m^3s^{-1}$ preljernih protoka s tog izvorišta zabilježen upravo u rujnu 1986.g. Stoga je "normalni" EPP procijenjen s vrijednošću $0,562 m^3s^{-1}$, uz vršna crpljenja od $0,250 m^3s^{-1}$, moguće osigurati samo za relativno učestale pojave do reda veličine 50%-tne vjerojatnosti, odnosno 2-godišnjeg povratnog perioda. Već kod 5-godišnjeg povratnog perioda potrebno je, ukoliko se želi osigurati crpljenja od prethodno iskazanih $0,175 m^3s^{-1}$, ići ispod praga preporučenog EPP, ali ipak iznad njegove alarmantne granične vrijednosti. Kod još rjeđih pojava, između 10 i 20-godišnjeg povratnog perioda, potrebno je smanjiti crpljenja na $0,134$ odnosno svega $0,025 m^3s^{-1}$. Još je kritičnije kod 100-godišnje povratnog perioda kada se ni bez crpljenja ne može osigurati alarmantna granična vrijednost protoka EPP, jer su prirodni dotoci manji od proračunate vrijednosti. No, zbog sezonskog karaktera vodoopskrbnih potreba koje su puno izrazitije u lipnju i kolovozu, tijekom rujna se očekuje da ipak neće biti iskazane maksimalne potrebe za vodom, te da će se potrebne količine moći u uvjetima prisutnih ograničenja osigurati iz drugih izvorišta na širem regionalnom prostoru, prije svega s izvora Prud koji ima ne samo značajnije veće male vode, nego i nema problema sa zaslanjivanjem njegovih voda, koji se inače mogu očekivati kod Modrog oka. No, problematiku osiguranja EPP će u daljnjim fazama analize mogućnosti korištenja voda Modrog oka za vodoopskrbu trebati promatrati u sklopu operacionalizacije aktivnosti vezanih Uredbom o standardu kakvoće voda (NN 96/19) analiziranog utjecajnog područja.

6. Zaključci s prijedlogom monitoringa Modrog oka

Rezultati provedenog monitoringa na izvorištu Modro oko tijekom 2019.-2020., te njihova interpretacija zajedno s rezultatima obrada podataka iz ranijeg razdoblja monitoringa DHMZ-a, potvrdili su da se radi o značajnom izvorištu vode čiji je vodoopskrbni potencijal daleko veći od postojećeg minornog korištenja za potrebe lokalne vodoopskrbe. No, s druge strane utvrđeno je da se taj potencijal u očekivanim količinama zahvaćenih voda od 250 L/s ipak vjerojatno neće moći u cijelosti (tijekom svih ljetnih mjeseci, odnosno tijekom zadnjeg od njih – rujna) ostvariti zbog smanjenih izdašnosti izvora koje se ponekih godina naglašeno javlja upravo tijekom rujna kao i potrebe osiguranja dobrog ekološkog stanja na nizvodnijem dijelu hidrografske mreže koja otječe iz Modrog oka. Prema provedenim analizama, respektirajući dane polazne hidrološke procjene elemenata ekološki prihvatljivog protoka, tijekom srpnja i rujna bi se s tog izvorišta moglo zahvaćati oko 175 L/s, a tijekom rujna i manje iz razloga što se pojedinih godina dugotrajna sušna razdoblja protežu i na rano jesensko razdoblje.

Rezultati dobiveni iz prethodnog razdoblja monitoringa kojeg je provodio DHMZ su kritički preispitani te zbog loših konsumpcijskih krivulja neke su godine izostavljene iz daljnjih analiza. Utvrđeno je da se pri niskim vodama javljaju unutar dnevne oscilacije uslijed djelovanja plime, koje, uz prisutnu različitu sezonsku obraslost preljevnih kanala iz Modrog oka, ali i njihovog nizvodnog korita dijela toka, onemogućuju precizno definiranje Q/H odnosa. Zbog efekta djelovanja plime i oseke na Modrom oku i njegov hidrološki sustav, čak su u uvjetima malih voda protoci veći pri nižim razinama vode u jezeru nego li pri nešto višim, jer su iste posljedica djelovanja uspora mora.

Rezultati provedenog monitoringa tijekom 2019.-2020. ukazali su na još jedan potencijalno kritični element planiranog korištenja voda za vodoopskrbu – mogućnost zaslanjivanja voda Modrog oka. To se može u još naglašenijoj mjeri dogoditi u uvjetima pojačanoga crpljenja za potrebe, a posebno i u situacijama očekivanog nastavka, pa i intenziviranja klimatskih promjena koje u ovom dokumentu nisu dodatno analizirane. No, rezultati provedenih analiza na izvoru Prud u okviru projekta DRINKADRIA (Građevinski fakultet u Rijeci, 2015) pokazali su da bi se, ovisno o različitim klimatskim scenarijima, prosječni srednji godišnji protoci na Prudu mogli smanjiti između 9 i 19%, a minimalni i do oko 50% za razdoblje do kraja ovoga stoljeća. Stoga je potrebno uspostaviti kontinuirani monitoring voda na Modrom oku i utjecajnom prostoru, a koji bi uz praćenja razina vode na jezerskom oku Modrog oka, trebao sadržavati i praćenja njegovog zaslanjivanja na način da se kontinuirano prati električna vodljivost njegovih voda.

Moguće je da je problem zaslanjivanja voda Modroga oka isto jedan od ograničavajućih elemenata količina zahvaćenih voda, te je stoga nužno i tom aspektu mogućeg korištenja posvetiti dužnu pozornost. Obzirom da se vodozahvat iz Modrog oka koristio za navodnjavanje u vrlo značajnim količinama, reda veličina 250 L/s kolika su i očekivanja u pogledu njegovog planiranog uključenja u vodoopskrbu, vjerojatno je i prilikom toga korištenja dolazilo do precrpljivanja vodozahvata i pojava povećanih zaslanjivanja. Bilo bi iznimno važno u arhivama nekadašnjih korisnika toga sustava i njihovih slijednika ili pak u arhivama laboratorija ZZJZ pronaći rezultate nekadašnjih uzorkovanja kakvoće vode u smislu sadržaja klorida te električne vodljivosti.

Zbog nejednoznačne veze razina vode na Modrom oku i preljevnih protoka, nužno je uspostaviti i praćenje razina vode na nizvodnom kanalu, te tijekom godine provoditi učestalije serije vodomjerenja, u uvjetima različite obraslosti nizvodnih odvodnih kanala. Pri tome treba voditi računa da se vodomjerenja odvijaju i u uvjetima djelovanja plime, kao i oseke, jer su naglašene razlike u rezultatima, a što je posebno izraženo tijekom dugotrajnijih sušnih razdoblja. Potrebno je i preispitati hidrogeološke veze Modrog oka s njegovim zaleđem kao i morem, te uspostaviti praćenja razina i na nekoliko piezometara koji bi se u tu svrhu trebalo izvesti u okruženju Modrog oka, kako bi se stanje istjecanja protoka moglo povezati s stanjem razina podzemnih voda u zaleđu Modrog oka.

Uz to, nužno je proširiti sagledavanje hidroloških prilika na nizvodniji tok preljevnih voda iz Modrog oka – jezeru Desne i toku Desanke i biološko-ekološkom komponentom, kako bi se sagledalo prihranjivanje tog slatkovodnog sustava koji od 2020.g. ima i status ornitološkog rezervata koji obuhvaća oba jezerca. U tu je svrhu, s hidrološkog aspekta, potrebno uspostaviti praćenja dinamike kolebanja jezera Desne, te mjerenje protoka u barem dvije situacije trajanja malih voda (s provedbom vodomjerenja u uvjetima i plime i oseke tijekom istoga dana) i na vodotoku Desanki koja prihvaća vode iz jezera Desne i Modroga oka.

7. Literatura

- Akvaprojekt d.o.o. i Hidroekspert d.o.o. (2002): Uključenje voda s izvorišta Modro oko u vodoopskrbni sustav NPKLM, idejno rješenje, Split.
- Bonacci, O. (2003): Ekohidrologija vodnih resursa i otvorenih korita. Građ.-arh. fakultet Split / IGH Zagreb, 487 str.
- Bonacci, O., Roje-Bonacci, T. (1997a): Hidrološki vid određivanja biološkog minimuma rijeke Žrnovnice. Hrvatske vode 5/19, 161-174.
- Bonacci, O., Roje-Bonacci, T. (1997b): Hidrološki vid određivanja minimuma rijeke Jadro. Hrvatske vode 5/21, 339-349.
- Croatian Geological Survey (2017): PROLINE-CE, Workpackage T2, Activity T2.1, Pilot action PAC2: South Dalmatia – Prud, Klokun and Mandina Spring (nos. zad. Terzić, J.; Lukač Reberski, J.), Zagreb, 28 str.
- DHMZ (2002): Meteorološka podloga za vodnogospodarsku osnovu Hrvatske (Voditelj zadatka: Gajić-Čapka, M.). Zagreb, nepublicirano.
- Državna uprava za zaštitu i spašavanje (2014): Smjernice za izradu procjene rizika od katastrofa u Republici Hrvatskoj. Zagreb.
- Elektroprojekt (2000): Sektorska obrada i podloge za Vodnogospodarsku osnovu Hrvatske, Ekološki prihvatljiv protok – Metodologija (nositelji zadatka: Mišetić, S., Pavlin, Ž.). Zagreb, nepubl.
- EU Comission (2015): Ecological flows in the implementation of the Water Framework Directive. Guidance No 31., Luxemburg.
- Građevinski fakultet u Rijeci (2015): DRINKADRIA, WB 4.2. Report: Test područje Južna Dalmacija, Hrvatska (nos. zadatka Rubinić, J.).
- Građevinski fakultet u Splitu (1996): Vodnogospodarsko rješenje i uređenje sliva sliva Donje Neretve. Fond stručne dokumentacije. Split.
- HGI (2017): Proline – CE. PILOT ACTION PAC2: SOUTH DALMATIA - PRUD, KLOKUN AND MANDINA SPRING. (nos zad. Terzić, J., Lukač Reberski Jasmina). Zagreb.
- IGH i Hidroing (2009): Vodoopskrbni plan Dubrovačko – neretvanske županije (nos. zad. Jakelić, Z.), Split. Fond stručne dokumentacije.
- IGH i Hidroing (2009): Vodoopskrbni plan Dubrovačko – neretvanske županije (nos. zad. Jakelić, Z.), Split. Fond stručne dokumentacije.
- Krešić, N. (1991): Kvantitativna hidrogeologija karsta sa elementima zaštite podzemnih voda. Beograd, Naučna knjiga.
- Langbein, W.B. (1962): The Water Supply of Arid Valleys in Intermountain Regions In Relation to Climate, IAHS Bull., Vol.7/1.
- Maillet, E. (1905): Essais d'Hydraulique Souterraine el Fluviale. Paris: Herman.

Mišetić, S. (1995): Pristup određivanju minimalnih količina vode za potrebe biološkog minimuma. Zbornik radova Okruglog stola Hrvatskog hidrološkog društva «Uloga hidrologije u strukturi gospodarstva Hrvatske», Zagreb, 20.04.1995., 99-103.

Mišetić, S., Pavlin, Ž. (2004): Pristup definiranju ekološki prihvatljivog protoka (EPP) u Republici Hrvatskoj. Zbornik radova seminara Velike i male vode, Društvo građevinskih inženjera Zagreb i Hrvatsko hidrološko društvo, Zagreb, 1. i 2. 04.2004., 205-221.

Mišetić, S., Pavlin, Ž., Mrakovčić, M., Jurić, V. (2003): Defining environmentally acceptable flow downstream intake structures in Croatia. Management of Environmental Quality: An International Journal, Vol. 14 Iss: 4, pp.520 – 532.

Plan upravljanja vodnim područjima 2016.-2021. (NN 66/2016).

Pravilnik o načinu određivanja ekološki prihvatljivog protoka (SN FBiH 4/2013)

Rubinić (2015): Okvirna hidrološka analiza funkcioniranja Baćinskih jezera i izvora Klokun, Modrog oka i mandina mlinica u regionalnom hidrogeološkom sustavu. Nepublicirano.

Štambuk-Giljanović (1998): Vode Neretve i njezina porječja. ZZJZ županije splitsko dalmatinske. Split, Hrvatske vode, Zagreb. 638 str.

Turc, L. (1954): Le bilan d'eau des sols, relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement, Troisièmes journées de l'hydraulique à Alger.

Uredba o proglašavanju posebnih rezervata „Modro oko i jezero Desne“, „Ušće Neretve“ i „Kuti“ (NN 94/2020)

Uredba o standardu kakvoće voda (NN 96/2019)

Urumović K., Duić, Ž., Hlevnjak, B. (2009): Hidrogeološko značenje koeficijenta recesije na primjeru istarskih izvora. Rudarsko-geološko naftni zbornik 21, 25-34.

Žugaj, R. (2015): Hidrologija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb

<https://izvor.ploce.hr/sustav-vodopskrbe/> (pristup listopad 2020,)

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Modro_oko_\(jezero\)#/media/Datoteka:Modro_oko.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Modro_oko_(jezero)#/media/Datoteka:Modro_oko.jpg)
(pristup listopad 2020,)

<http://mapire.eu/en/map/> (pristup listopad 2020,)

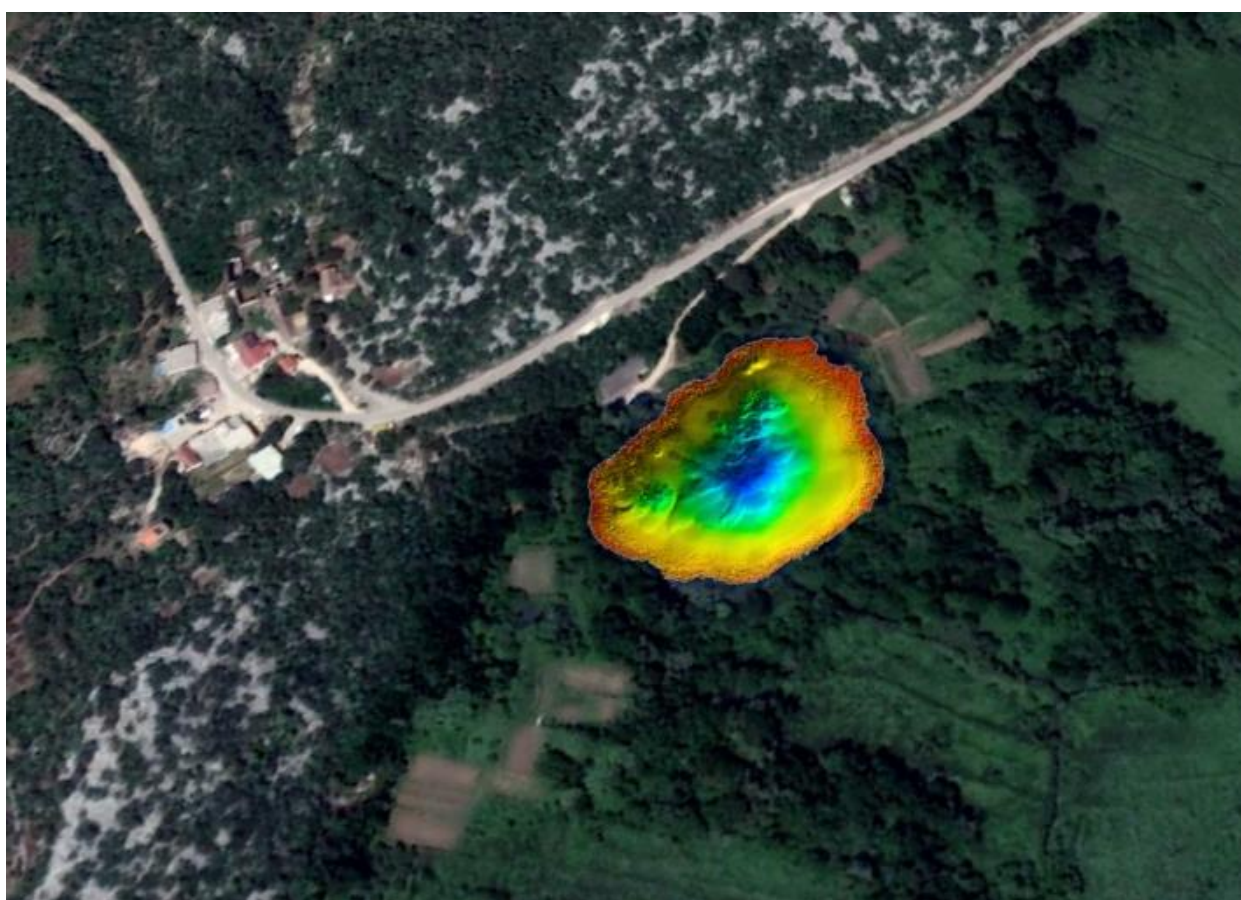
<https://www.vanessen.com/products/data-loggers/ctd-diver/> (pristup listopad 2020,)

8. PRILOG – Izvještaj o provedenom batimetrijskom premjeru Modrog oka

Broj predmeta: 7/19

HIDROGRAFSKO-GEODETSKI SITUACIJSKI NACRT

„jezero Modro oko“



Za **TRIPODIJ** d.o.o.

Tomislav Čipčić, dipl. inž. geod.

U Splitu studeni, 2019

SADRŽAJ

1. PODRUČJE SNIMANJA.....	1
1.1. Profil brzine zvuka.....	2
1.2. Kalibracija.....	3
1.3. Ocjena točnosti.....	4
2. PLOVILO.....	6
2.1. Opći podaci.....	6
3. INSTRUMENTARIJ.....	7
3.1. Dubinomjer.....	7
3.2. Navigacija.....	9
3.3. Profiler brzine zvuka.....	10
3.4. Računalni sustav.....	10
4. PRIMJERI.....	12
5. PRILOZI.....	13
6. CD.....	13

1. PODRUČJE SNIMANJA



Slika 1. Prikaz područja snimanja na DOF podlozi

Tijekom listopada 2019. godine, od strane poduzeća TRIPODIJ d.o.o. provedena su hidrografska-geodetska mjerenja za područje jezera *Modro oko* sjeverno od grada Ploče. Podmorsko područje jezera snimano je višesnopnim (Multibeam) dubinomjerom marke Teledyne RESON model SeaBat T20-P. Kopneni dio jezera je snimljen koristeći uređaj STONEX S9 III GNSS prijamnik, te bespilotnom letjelicom (Dron).

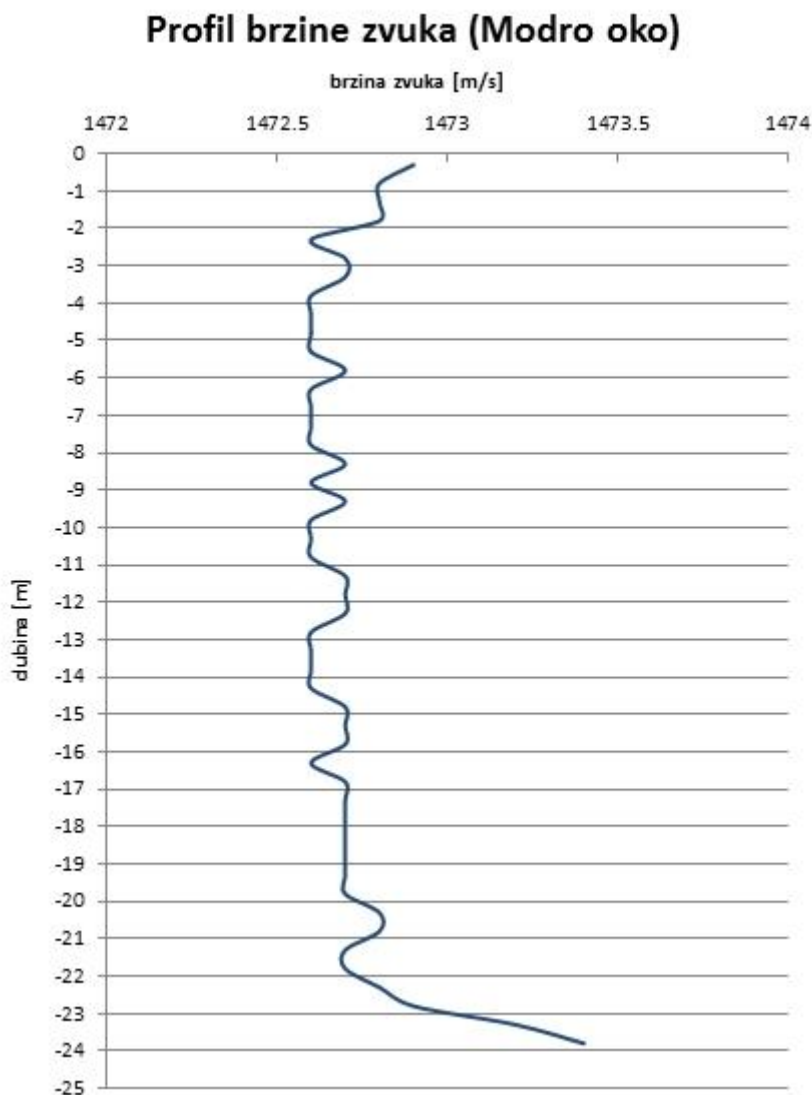
Na snimak je uklopljen katastarski plan preuzet od Državne geodetske uprave. Obalna linija navedenog jezera nije mogla biti točno izmjerena zbog nepristupačnosti terena i nabujale vegetacije stoga dajemo njen položaj isprekidanom linijom koja odgovara stvarnoj vrijednosti unutar jednog metra. Na terenu je izmjerena visina vrha vodomjerne letve te visina repera koji služi za kontrolu letve. Podaci su u tablici ispod.

	HVRS71	HVRS1875 („Trst“)
Vodomjerna letva	1.25	1.58
Visinski reper	1.56	1.89

Snimanje, obrada podataka i crtanje obavljeno je u HTRS96/TM koordinatnom sustavu, a visine i dubine su dane u HVRS71 visinskom sustavu.

1.1. Profil brzine zvuka

Brzina zvuka u jezeru mjerena je na sredini jezera. Podatak o brzini zvuka u jezeru je bitan zbog korekcija mjerenih dubina, što je glavni ulazni podatak za ispravna mjerenja s multibeam dubinomjerom. Naime zbog promjene temeprature vode s dubinom zvučni val se ne giba pravocrtno nego se lomi. Zbog toga nakon izrade profila brzina zvuka, možemo korigirati mjerenje vrijednosti.



Slika 2. Vertikalni profili brzine zvuka za jezero Modro oko – 09.10.2019

1.2. Kalibracija

Hydrografski sustav korišten pri batimetrijskoj izmjeri omogućava integraciju različitih senzora u jedinstveni mjerni sustav te zajedničku obradu njihovih opažanja, a sve u cilju određivanja horizontalnog i vertikalnog položaja s visokom preciznošću. Prema tome osim samog višesnopnog dubinomjera (engl. Multibeam echosounders) sustav uključuje i inercijalnu mjernu jedinicu (engl. Inertial Measurement Unit - IMU) i GNSS (engl. Global Navigation Satellite System) prijamnik s dvije antene. U svrhu očuvanja mjerne nesigurnosti provedenih mjerenja kao imperativ postavlja se provođenje terenske kalibracije prilikom izmjere. Kalibracija obuhvaća sistematski pristup prikupljanja hidrografskih podataka i naknadno njihovu statističku obradu kako bi se korigirale sistematske pogreške nastale prilikom montaže prethodno navedenih senzora. U idealnim uvjetima položaj senzora bi trebao biti takav da se svi nalaze u istoj ravnini i time optimalno orijentirani jedno prema drugom, što je u praksi neostvarivo. Prema tome, kako bi se odredila kutna odstupanja odnosno kako bi se uspostavio ispravan relativan odnos i položaj između skupa senzora potrebno je izvršiti kalibraciju. Obavlja se svaki put nakon početne instalacije sustava, a nakon toga povremeno ukoliko se promjene relativni odnosi između senzora. Tijekom postupka kalibracije određuju se sljedeće veličine:

- a) Korekcija za ljuljanje (engl. Roll)
- b) Korekcija za poniranje (engl. Pitch)
- c) Korekcija za skretanje (engl. Yaw)

Ljuljanje predstavlja rotaciju u odnosu na uzdužnu os plovila. Da bi se ustanovila vrijednost ove korekcije, potrebno je provesti mjerenja na području ravnog dna. Definira se linija plovidbe preko željenog područja po kojoj se plovi dva puta istom brzinom ali u suprotnim smjerovima. Kod tako prikupljenih podataka dolazi do različitog prikaza u poprečnom profilu morskog dna gdje će set podataka jednog mjerenja biti nagnut u suprotnom smjeru u odnosu na drugi set podataka mjerenja (tzv. "X" formacija). Pri instalaciji ovog sustava, a u svrhu bolje prekrivenosti koristi se adapter pomoću kojeg je sonar nagnut 15° prema desnoj strani broda (engl. Starboard), što se prilikom izračuna korekcije uzima u obzir.

Poniranje se odnosi na rotaciju oko poprečne osi kretanja plovila koja je definirana pravcem Lijeva strana broda – Desna strana broda „Port side-Starboard side“. Prisutnost ove korekcije utvrđuje se plovidbom identičnom brzinom u suprotnim smjerovima po definiranoj liniji plovidbe, a koja je postavljena okomito na područje gdje morsko dno sadrži nagib, padinu ili dobro definiran objekt. Koristeći oba seta mjerenja te kreiranjem uzdužnog profila koji koristi podatke prikupljene u neposrednoj blizini linije plovidbe moguće je ustanoviti dolazi li do nepodudarnosti u izmjerenim dubinama.

Skretanje se odnosi na rotaciju oko vertikalne osi plovila. Ova korekcija utvrđuje se na način da se plove dvije paralelne linije identičnom brzinom i kursom sa svake strane dobro definiranog objekta ili područja koje sadrži nagib. Linije vožnje razmaknute su oko pola širine premjerenog traka (otprilike 2 - 3 x dubina) postižući tako potpunu prekrivenost unutar kojih bi se po sredini trebao nalaziti objekt. Korekcija se očituje u prividnom pomaku položaja objekta, što je moguće razaznati iz uzdužnog profila koji se primjenjuje na objektu ili nagibu gdje dolazi do preklopa podataka iz dva seta mjerenja.

U sljedećoj tablici nalaze se rezultati kalibracije:

ROLL	PITCH	YAW
-15.03 °PU+	0.01 °BU+	0.42°

1.3. Ocjena točnosti

Ocjena točnosti cjelokupnog snimka se utvrđuje na osnovu parametra TPU (engl. Total Propagation Uncertainty). Taj parametar uzima u obzir sve komponente sustava i sve izvore pogrešaka, te se sastoji od dvije komponente:

- 1) Horizontalna komponenta - THU (engl. Total Horizontal Uncertainty)
- 2) Vertikalna komponenta - TVU (engl. Total Vertical Uncertainty)

Svaka ćelija rasterskog prikaza snimljenog područja sadrži svoju TPU vrijednost. Pravilnikom o uvjetima i načinu obavljanja djelatnosti hidrografske izmjere ovlaštenih pravnih osoba (u postupku donošenja) propisana je maksimalna dopuštena ukupna horizontalna i vertikalna nesigurnost za kategoriju posebnih uvjeta, što za horizontalnu komponentu uz razinu pouzdanosti od 95% iznosi 2 m dok uz istu razinu pouzdanosti ukupna vertikalna nesigurnost dana je formulom:

$$\pm\sqrt{a^2 + (b \times d)^2}$$

gdje je:

a - koeficijent koji predstavlja udio pogreške mjerenja koja ne ovise o dubine ($a=0.25$ m za kategoriju posebnih uvjeta)

b - koeficijent koji predstavlja udio pogreške mjerenja koja ovisi o dubini ($b=0.0075$ za kategoriju posebnih uvjeta)

d - dubina

b x d - predstavlja udio pogreške mjerenja koja se mjenja s dubinom

Obzirom da u navedenu kategoriju spada i područje izmjere koje je predmet ovog elaborata, potrebno je bilo udovoljiti navedenim zahtjevima. To je postignuto na način da je prilikom obrade podataka korišten filter koji automatski odbacuje sva mjerenja koja ne udovoljavaju zahtjevima za kategoriju posebnih uvjeta, a koje propisuje gore navedeni pravilnik. Nastavno na to prilikom izrade digitalnog modela terena snimljenog područja odabrana je opcija prema kojoj svaka ćelija sadrži informaciju o maksimalnoj dopuštenoj ukupnoj horizontalnoj i vertikalnoj nesigurnosti (95% razina pouzdanosti), te se naknadnom analizom utvrdilo da su sve vrijednosti unutar propisanih.

Nadalje, drugi način utvrđivanja ocjene točnosti se temelji na očitavanju standardnog odstupanja svake ćelije rasterskog prikaza snimljenog područja na preklapima odnosno na područjima na kojima postoji prekobrojnost snimljenih podataka. Standardno odstupanje digitalnog modela terena u ovom slučaju iznosi **0.09 m**, a navedena vrijednost izračunana je pomoću sljedeće formule:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\sigma_{(svih\ \acute{c}elija)}^2)}{n}}$$

gdje je:

σ - standardno odstupanje

n - broj korištenih ćelija

Sukladno gore navedenom vidljivo je da je postupak analize potignute točnosti dane u elaboratu proveden u skladu sa standardom S-44 Međunarodne hidrografske organizacije (IHO - International Hydrographic Organization), a time i u skladu s Pravilnikom o uvjetima i načinu obavljanja djelatnosti hidrografske izmjere ovlaštenih pravnih osoba.

2. PLOVILO



Slika 3. Plovilo s montiranim instrumentarijem

2.1. Opći podaci

Ime:	571-ST,
Vlasnik:	Tripodij d.o.o.,
Godina izgradnje:	2012 godina.
Marka plovila	Colnago 20

Dimenzije

Dužina:	5.95 m,
BT:	1.09 t,

Pogon

Glavni pogon:	vanbrodski YAMAHA, 73.6 kW
---------------	----------------------------

3. INSTRUMENTARIJ

3.1. Dubinomjer

Višesnopni (Multibeam) dubinomjer marke Teledyne RESON model SeaBat T20-P se sastoji od odašiljača zvučnih valova, prijamnika i sonde za mjerenje brzine zvuka. Sve tri navedene komponente se nalaze ispod razine mora. Na plovilu se nalazi jedinica za prijem i obradu podataka (PSP – Portable Sonar Processor).



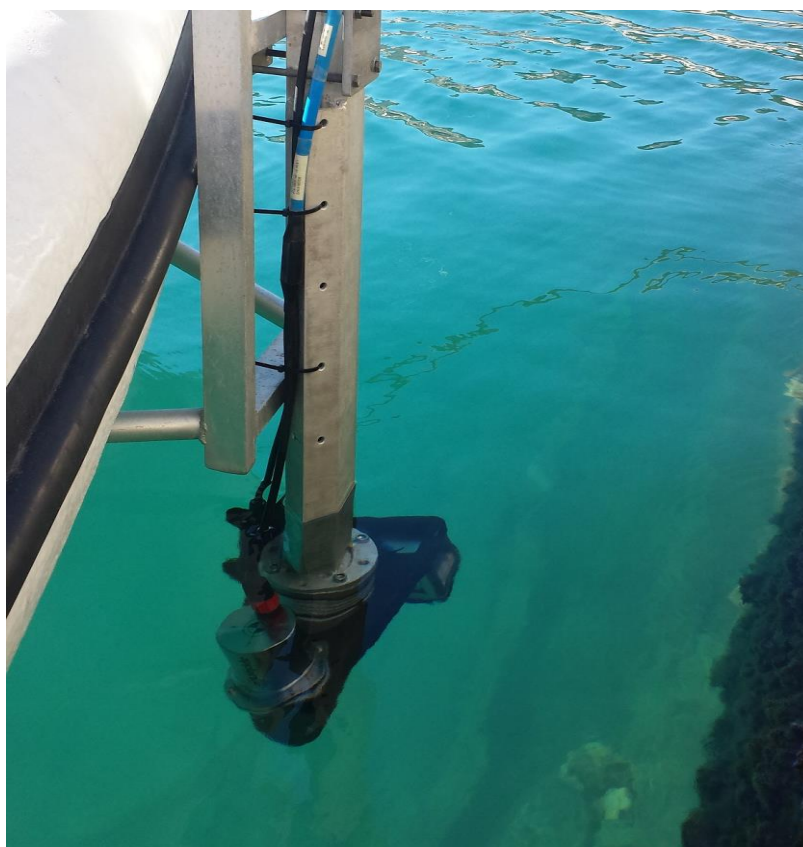
Slika 4. PSP, odašiljač (valjkasti dio) i prijamnik



Slika 5. Montirani dio dubinomjera na stativu

Specifikacije dubinomjera

Ulazni napon	24V ili 100-230V 50/60 Hz	
Snaga (tipična/maksimalna)	200W / 300W	
Zaštita PSP-a	Vodootporan (IP54)	
Raspon frekvencija	200 kHz	400 kHz
Broj snopova	Min 10, Max 512	
Poprečna rezolucija snopa	2°	1°
Uzdužna rezolucija snopa	2°	1°
Širina snimanja	140° Equi-Distant, 165° Equi-Angle	
Tipična dubina (CW) ¹	0.5 – 375 metara	0.5 – 150 metara
Maksimalna dubina (CW)	550 metara	250 metara
Broj očitavanja (ovisan o dubini)	Max 50 očitavanja u sekundi	
Duljina pulsa	30 – 300 μs	
Rezolucija dubine	6 mm	



Slika 4. Uronjeni dio dubinomjera

¹ CW – eng. Countinuous wave, val s kraćom valnom duljinom zbog veće rezolucije, ali slabijeg dometa

3.2. Navigacija

Sustav za navigaciju tvrtke Applanix, model POS MV WaveMaster se sastoji od dva GNSS prijamnika marke Trimble, inercijalne navigacijske jedinice (INS), koja se nalazi uz odašiljač dubinomjera ispod razine mora, i jedinice za obradu podataka. Pozicija se dobiva preko GNSS prijamnika i to koristeći CROPOS VPPS servis. INS se sastoji od tri akcelerometra i tri žiroskopa koji prate sva relativna gibanja plovila te ih kombiniraju s GNSS podacima čime se dobiva rješenje pozicije odašiljača i prijamnika dubinomjera s minimalnim pogreškama.



Slika 5. GNSS antene za navigaciju

Specifikacije navigacijskog sustava

POS MV WAVEMASTER	DGPS	RTK	Preciznost prilikom gubitka GNSS signala
Pozicija	0.5 – 2 m	Horizontalno: +/- (8 mm + 1 ppm×duljina bazne linije) Vertikalno: +/- (15 mm + 1 ppm×duljina bazne linije)	~ 9 m za 60 s prekida (RTK) ~ 3 m za 30 s prekida (RTK) ~ 2 m za 60 s prekida (IAPPK)
Prevrtnje i poniranje	0.03°	0.02° (0.015° s post processing-om)	0.04°
Pravi kurs	0.015° sa 4 m bazne linije ² 0.03° sa 2 m bazne linije 0.06° sa 1 m bazne linije	-	<2° pogoršanje za sat vremena (zanemarivo za prekide kraće od 60 sekundi)
Dizanje	5 cm ili 5% ³	5 cm ili 5% ³	5 cm ili 5% ³

² Udaljenost između dvije GNSS antene

³ Ovisno koja je vrijednost veća za periode od 20 sekundi ili manje

3.3. Profiler brzine zvuka

Uređaj tvrtke Valeport marke miniSVP koristi se za izradu profila brzine zvuka. Uređaj se sastoji od senzora za mjerenje brzine zvuka, termometra i podvodnog barometra.



Slika 6. Profiler brzine zvuka

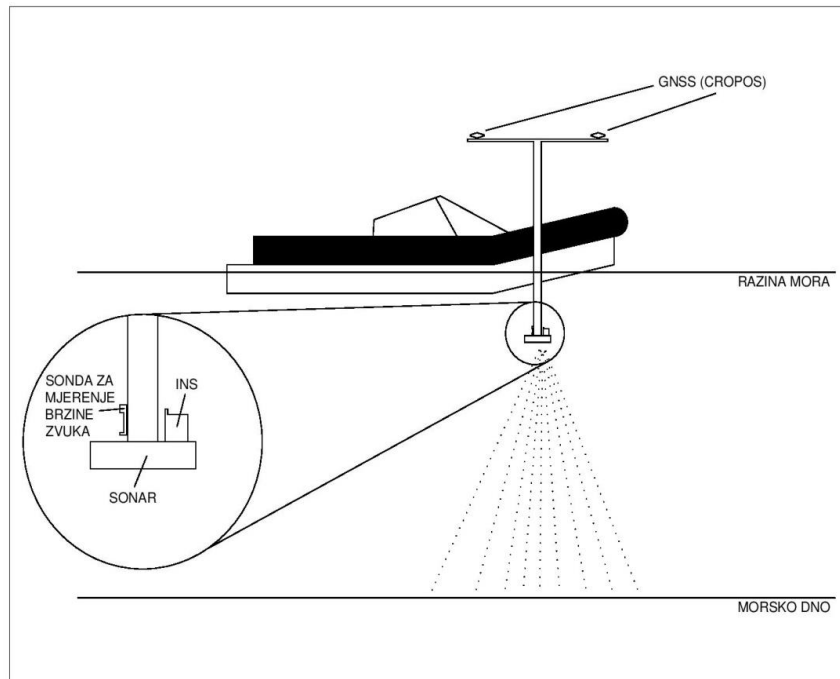
Specifikacije profilera brzine zvuka

	Brzina zvuka	Temperatura	Tlak
Raspon	1375 – 1900 m/s	-5°C do + 35°C	0 - 50 Bar
Rezolucija	0.001 m/s	0.001°C	0.0005 Bar
Točnost	+/- 0.02 m/s	+/- 0.01°C	+/- 0.025 Bar

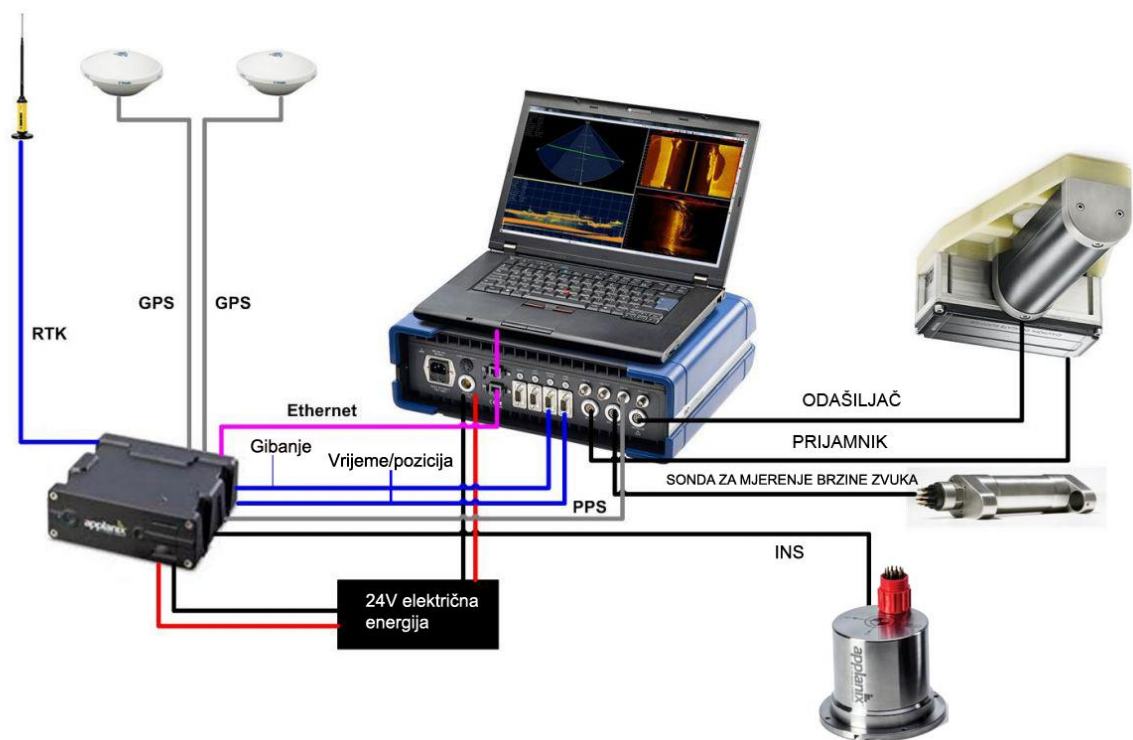
3.4. Računalni sustav

Hardware: Prijenosno računalo Lenovo
Software: SeaBat UI (za upravljanje radom multibeam dubinomjera)
POS MV View (za upravljanje i kontrolu sustava za pozicioniranje)
GNSS Surfer (kontrola primanja RTK korekcija)
PDS 2000 (program za prikupljanje i obradu podataka)

Shema razmještaja instrumentarija prilikom izmjere

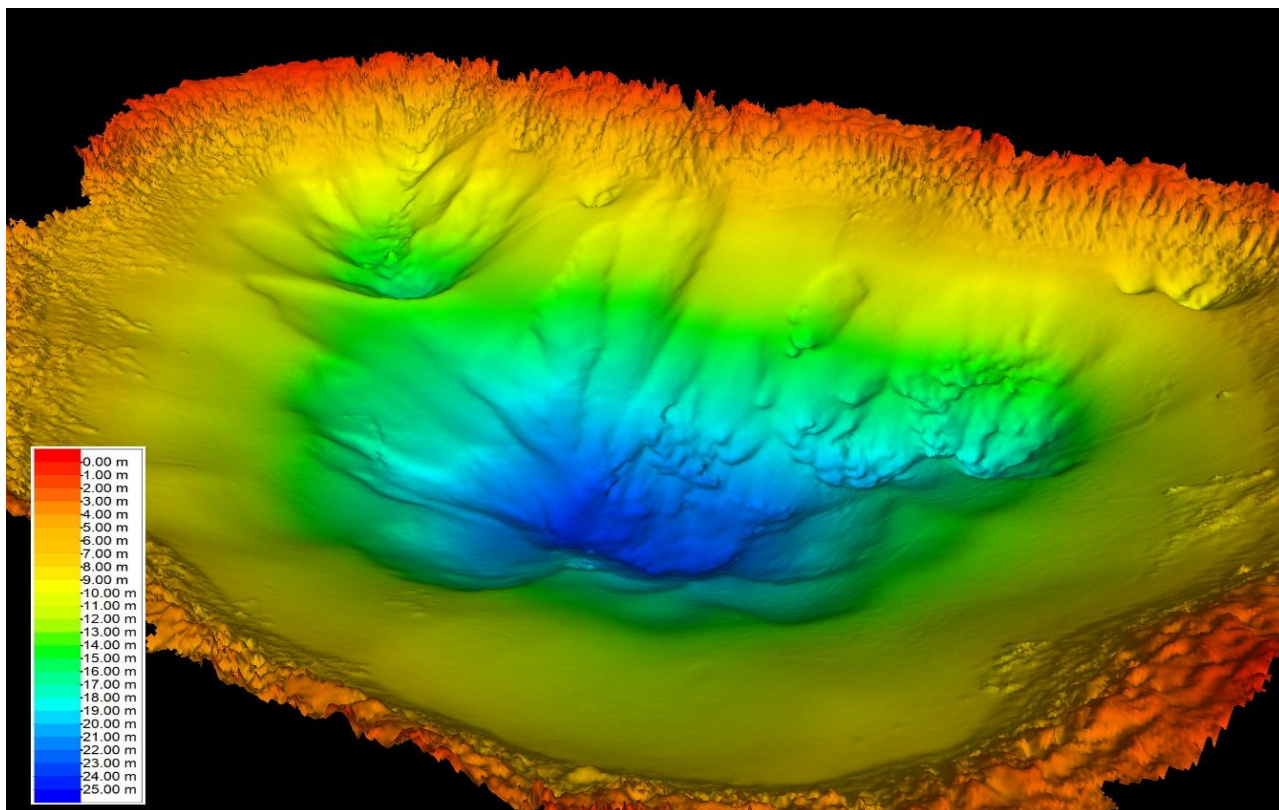


Slika 7. Shema broda i instrumentarija

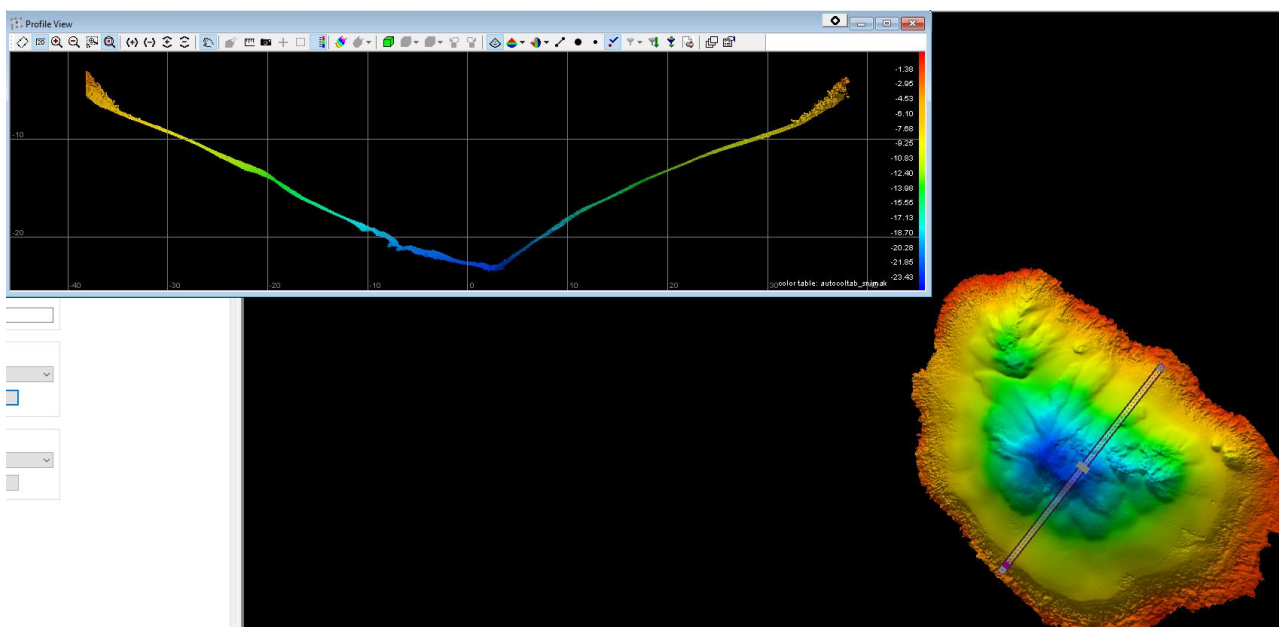


Slika 8. Shema povezanosti instrumentarija

4. PRIMJERI



Slika 9. Trodimenzionalni prikaz jezera



Slika 10. Poprečni profil jezera

5. PRILOZI

Geodetsko-batimetrijski situacijski prikaz jezero Modro oko (1:200), Pregledni prikaz jezero Modro oko (1:200) – 3 lista

6. CD

- Situacija200 HTRS HVRS.dwg
- Izvjesce.pdf
- Modro oko 20cm HTRS HVRS.txt (3D model podmorja u tekstualnom obliku u HTRS96/TM položajnom i HVRS71 visinskom sustavu tzv. geodetska nula)
- DOF Modro oko.tif