

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO – MATEMATIČKI FAKULTET
BIOLOŠKI ODSJEK

**PERSPEKTIVA DINAMIKE VODA U EUROPI USLIJED
KLIMATSKIH PROMJENA**

WATER DYNAMICS IN EUROPE DUE TO CLIMATE CHANGE

SEMINARSKI RAD

Sara Šariri

Preddiplomski studij Znanosti o okolišu
(Undergraduate Study of Environmental science)

Mentor: izv. prof. dr. sc. Marko Miliša

Zagreb, 2018

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. SREDNJE GODIŠNJE OTJECANJE I INDEKSI PROTOKA.....	3
3. EUROPSKE KLIMATSKE ZONE	4
4. PROMJENA ELEMENATA KLIME	5
5. OPĆENITO O PROMJENAMA PROTOČNIH REŽIMA U EUROPI	6
6. PROMJENE EKSTREMNIH PROTOKA	7
6.1. NISKI PROTOCI	7
6.2. VISOKI PROTOCI	8
6.3. USPOREDBA INDEKSA NISKIH I VISOKIH PROTOKA, SREDNJEG GODIŠNJEG PROTOKA I SEZONSKIH PROTOKA	8
7. POPLAVE	9
8. PROTOČNI REŽIMI 2050IH U RAZLIČITIM KLIMATSKIM ZONAMA.....	12
8.1. POLARNA ZONA	12
8.2. BOREALNA ZONA	13
8.3. UMJERENA KONTINENTALNA ZONA.....	14
8.4. UMJERENA PRIJELAZNA ZONA.....	15
8.5. UMJERENA OCEANSKA ZONA	16
8.6. MEDITERANSKA ZONA	17
8.6.1. PROTOČNI REŽIMI.....	17
8.6.2. UZROCI POVEĆANE UČESTALOSTI SUŠA	18
9. POSLJEDICE KLIMATSKIH PROMJENA NA EKOSUSTAVE KOPNENIH VODA.....	19
10. SOCIJALNE I EKONOMSKE POSLJEDICE PROMJENE DINAMIKE I GRANICE RASPOLOŽIVOSTI SLATKE VODE.....	21
11. LITERATURA	25
12. SAŽETAK.....	27
13. SUMMARY.....	27

1. UVOD

U posljednjem su stoljeću prirodni režimi tekućica znatno izmijenjeni različitim antropogenim utjecajima, prije svega kroz izgradnju brana, nasipa, kanala i drugih hidrotehničkih objekata, ravnanjem, produblivanjem ili proširivanjem korita te velikim promjenama u načinu korištenja zemljišta (Čanjevac 2012, Schneider i sur. 2013). Također, eksponencijalni rast stanovništva, a time i potražnje za vodnim resursima dovodi do smanjenja protoka rijeka zbog crpljenja vode za potrebe navodnjavanja, industrije, proizvodnje električne energije i dr. Velike površine zahvaćene su procesima urbanizacije i deforestacije, što za posljedicu ima brtvljenje tla koje dodatno utječe na promjenu protoka i dinamike tekućica jer smanjuje stopu evapotranspiracije i ubrzava otjecanje (Schneider i sur. 2013).

Uz sve te antropogene izmjene tokova, još jedan dodatni čimbenik, pod čijim utjecajem se mijenjaju protočni režimi, predstavljaju klimatske promjene. Očito je da je već došlo do njih iz zapaženog povećanja srednje globalne temperature zraka i oceana, promjene režima oborina, smanjenja snježnog pokrova i leda širom svijeta te iz povišenja prosječne globalne razine mora. Procjenjuje se da je u posljednjih stotinu godina temperatura zraka na površini Zemlje porasla za 0,5 – 0,9 °C. Zbog povećanja temperature ubrzava se hidrološki ciklus, što dovodi do prostornih i vremenskih promjena režima oborina i povećane stope evapotranspiracije. Upravo su te promjene glavni pokretač prirodnih promjena protočnih režima. Općenito se očekuje da će se povećati intenzitet kiša i učestalost ekstremnih vremenskih događaja, kao i veličina, učestalost i vrijeme javljanja riječnih poplava. U slivovima koji su pod utjecajem ledenjaka i snijega otjecanje je dodatno izmijenjeno zbog sve manjeg dotoka sniježnice i sočnice. Rezultat zajedničkog djelovanja svih tih posljedica klimatskih promjena izazvat će različite izmjene u protočnim režimima rijeka na klimatski drugačijim područjima (Čanjevac 2012, Schneider i sur. 2013).

Ispreplitanje antropogenog djelovanja na dinamiku voda i njezinih promjena pod utjecajem klime vidljivo je u istraživanju koje su proveli Döll i Müller Schmied 2012. g., u kojem su na globalnoj razini proučavali utjecaj klimatskih promjena na srednji godišnji protok rijeka do 2050-ih godina. Zaključili su da su, na područjima gdje je prirodni protok rijeka značajno smanjen zbog crpljenja vode (npr. u Španjolskoj i Turskoj), relativne promjene stvarnog protoka rijeke uslijed klimatskih promjena veće nego relativne promjene koje bi se dogodile da nema crpljenja vode.

Iako je teško odvojiti utjecaj klime od utjecaja ostalih fizičko-geografskih uvjeta i djelovanja čovjeka, najpouzdanije je, najpraktičnije i najčešće korišteno, u proučavanju i predviđanju učinaka klimatskih promjena na dinamiku voda, promatrati protočni režim. Protočni režim rijeke, pojam uži od pojma riječni režim, podrazumijeva prosječne vodne bilance u porječju te kretanje srednjih mjesečnih i drugih karakterističnih protoka tijekom godine. Protoci su, što se tiče mjerenja, najstabilnija komponenta

hidrološkog ciklusa i analizom dugih vremenskih nizova podataka o protocima mogu se dobiti vrijedne informacije o trendovima i varijacijama klime nekoga područja. Njihove se promjene mogu pratiti kroz prostor i vrijeme, pri čemu se skale kreću od minuta (npr. u slučaju naglih bujičnih poplava) do desetljeća (npr. u slučaju predviđanja količine vodnih resursa) i na temelju toga mogu se uočiti značajni obrasci. Godinama se na brojnim mjernim stanicama prati protočni režim, tj. uobičajeno kretanje količina vode u koritu rijeke te učestalost i intenzitet ekstremnih pojava, jer o poznavanju tih podataka ovisi kvalitetno upravljanje vodnim resursima (Čanjevac 2012., Čanjevac 2013, Döll i Schmied 2012).

Ti su podatci korišteni u istraživanju utjecaja klimatskih promjena na protočne režime riječnih tokova u Europi u kojem su Schneider i suradnici usporedili buduće protočne režime 2050-ih (2041 – 2070) pod utjecajem klimatskih promjena sa prirodnim protocima u početnom standardnom razdoblju (1971 – 2000). Važnost proučavanja promjena upravo režima protoka ističu i Döll i Schmied (2012), kako iz perspektive dobrobiti čovjeka i njegove opskrbe vodom, tako i iz perspektive staništa i očuvanja bioraznolikosti. Oni su na globalnoj razini proučavali vezu između promjena srednjeg godišnjeg otjecanja i indeksa protočnog režima rijeka uslijed klimatskih promjena te odredili gdje bi zbog njih moglo doći do prijelaza stalnih vodotoka u povremene (i obrnuto). Navode da se pri predviđanju utjecaja klimatskih promjena na kopnene vode najčešće gleda prosječno godišnje otjecanje, tj. razlika između višegodišnjih prosjeka godišnje količine oborina i evapotranspiracije, ali da je to previše pojednostavljeno i da je puno mjerodavnije promatrati protočni režim. Kako bi se razumio utjecaj klimatskih promjena na ljude i slatkovodne ekosustave potrebno je procijeniti promjene sezonalnosti, međugodišnje promjenjivosti, statističkih minimuma i maksimuma protoka te poplava i suša.

Iz svih navedenih razloga, ovom se radu pod dinamikom voda prvenstveno misli na protočni režim koji je nužno povezan sa svim dijelovima hidrološkog ciklusa na nekom području i odražava njegove promjene uslijed promjena klime tog područja. Cilj rada je sagledati kako će se u budućnosti mijenjati elementi klime u Europi, koliko će se i kako te promjene odraziti na protočne režime tekućica u pojedinim klimatskim zonama, s posebnim naglaskom na promjene niskih i visokih protoka te vremena javljanja riječnih poplava, te kakve će to posljedice imati za ekosustave i ljudsku zajednicu.

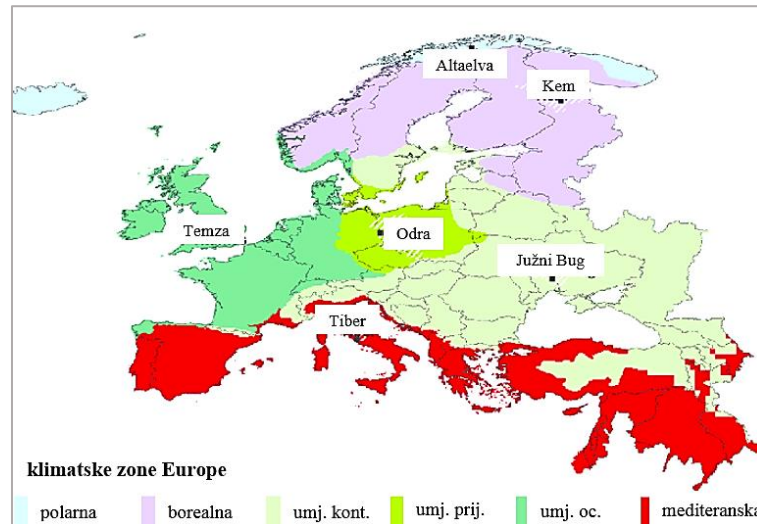
2. SREDNJE GODIŠNJE OTJECANJE I INDEKSI PROTOKA

U prosjeku preko 30 godina, srednje godišnje otjecanje (R_{mean}) je približno razlika između srednje količine oborina i srednje stvarne evapotranspiracije. Indeksi protoka često su korišteni na međunarodnoj razini i smatraju se prikladnom hidrološki baziranom metodom pri planiranju razvoja vodnog resursa i procjenjivanju graničnih vrijednosti protoka. Uključuju indekse kao što su srednji godišnji protok rijeke (Q_{mean}), niski protok Q_{90} (mjesečni protok koji je premašen u 9 od 10 mjeseci), visoki protok Q_{10} (mjesečni protok koji je prijeđen u 1 od 10 mjeseci) i srednji sezonski protoci (npr. QDJF srednji protok rijeke u razdoblju od prosinca do veljače). Osobito su proučavani i korišteni indeksi veličine (npr. $7Q_{10}$) i trajanja (npr. Q_{95}) niskih protoka jer pružaju bitne informacije pri određivanju ekološki prihvatljivih protoka. Najčešći hidrološki indeksi niskog protoka su $7Q_{10}$, Q_{95} , zatim $7Q_2$ i Q_{90} . Indeks protoka, kao što je $7Q_{10}$ može se protumačiti kao sedmodnevni niski protok s povratnim periodom od 10 godina, koristeći podatke o dnevnom protoku. Prekoračenje postotka Q_{95} može se tumačiti kao vrijednost protoka za koju se može očekivati da neće biti prekoračena 95 % vremena (Döll i Schmied 2012, Pyrcce 2004).

Na globalnoj razini, klimatski uzrokovane promjene indeksa protočnog režima rijeka Q_{mean} , Q_{90} i Q_{10} prate prostorni raspored promjena srednjeg godišnjeg otjecanja (R_{mean}), a izmjene sezonskih protoka ne. Utjecaj klimatskih promjena na srednji protok rijeke ipak je drugačiji od utjecaja klimatskih promjena na godišnje otjecanje zato što protok akumulira i preusmjerava otjecanje sa svih područja duž drenažnog pravca u smjeru tečenja. Utvrđeno je da će na globalnoj razini promjene u niskim (low flows) i visokim (high flows) protocima biti u pravilu slične promjenama srednjih godišnjih protoka, s nekim iznimkama. Međutim, na nižoj skali više nema takve podudarnosti (npr. u UK i zapadnoj Francuskoj Q_{90} pada, dok Q_{mean} raste). Na razini ispod razine sliva predviđa se da će niski protoci do 2050-ih biti više nego upola niži na gotovo duplo većem području u usporedbi sa srednjim godišnjim otjecanjem. Slično, ljetni protoci na sjevernoj hemisferi smanjuju se više nego srednje godišnje otjecanje (Döll i Schmied 2012).

3. EUROPSKE KLIMATSKE ZONE

Schneider i suradnici u svom radu dijele Europu na 6 klimatskih zona: polarnu, borealnu, umjerenu kontinentalnu, umjerenu prijelaznu, umjerenu oceansku i mediteransku (slika 1).



Slika 1. Prostorni raspored europskih klimatskih zona s označenim reprezentativnim rijekama čiji hidrogrami odražavaju tipične promjene protočnog režima predviđene za 2050-e za svaku pojedinu klimatsku zonu (prema https://www.researchgate.net/figure/European-climate-zones-based-on-information-provided-by-EUCA15000-The-six-highlighted_fig1_277401585)

Na dalekom sjeveru Europe prevladava polarna zona. Polarnu klimu obilježavaju hladna ljeta i ekstremno hladne zime, tijekom kojih temperatura često po 6 mjeseci ne prelazi 0 °C.

Značajke borealne klime su vrlo hladne zime, kratka hladna ljeta, pojava oborina, s povećanjem udaljenost do obale, uglavnom u toplijim ljetnim mjesecima te smrzavanje tla zimi.

Borealnu klimatsku zonu slijedi umjerena, koja je podijeljena na oceansku, prijelaznu i kontinentalnu. U kontinentalnom su dijelu zone izražena godišnja kolebanja klime. Ljeta su vruća i suha, a zime vrlo hladne. Veći dio ukupne godišnje količine oborina padne u zimu. U oceanskoj je umjerenoj klimi godišnji raspon temperature manji zbog ublažujućeg utjecaja oceana. Karakteristična su topla ljeta i blage zime. Oborine su obilne tijekom cijele godine i većinom se javljaju u obliku kiše. Prijelazna je zona između te dvije i može se opisati toplim ljetima, hladnim zimama i oborinama prisutnim tijekom cijele godine.

Područja mediteranske klimatske zone većinom su smještene u blizini mora koje ublažava temperaturne ekstreme zbog čega je godišnji temperaturni raspon relativno malen. Dok su ljeta vruća i suha, zime su blage, s temperaturama u pravilu iznad 0 °C. Mediteranska područja primaju gotovo cijelu

godišnju količinu kiše tijekom zimskog razdoblja. Snijeg se rijetko javlja, ali može pasti na visokim planinskim lancima (Schneider i sur. 2013).

4. PROMJENA ELEMENATA KLIME

Promjene protočnih režima rijeka zbog promjene klimatskih elemenata ponajprije se u Europi odnose na način prihrane rijeka. Glavni elementi klime, čijim izmjenama će klimatske promjene do 2050-ih promijeniti hidrološki ciklus i protočne režime, su oborine, temperatura i snježni pokrov.

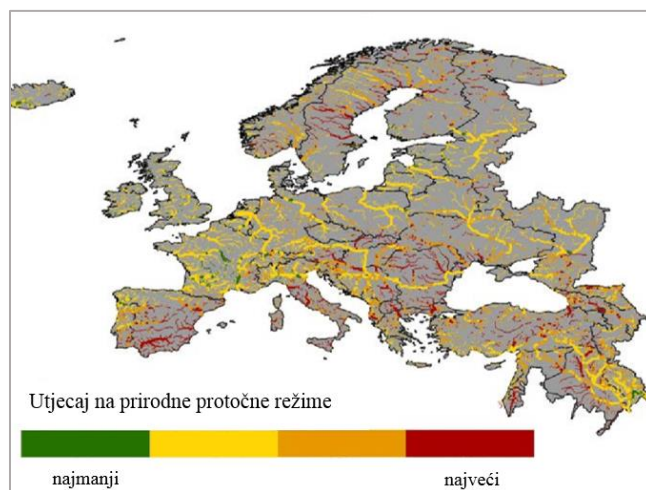
S obzirom na režime oborina, može se uočiti podjela Europe na sjever i jug. Općenito će sjever postajati sve vlažniji, a već suh jug primat će još manje oborina. U zimskoj polovini godine (tj. od listopada do ožujka) jedino će mediteranske zemlje primati manje oborina nego sad, dok će ostatak Europe, osobito njen sjeverni dio, primati veću količinu oborina. Povećanje količine oborina zimi najveće je u borealnoj klimatskoj zoni (srednja vrijednost promjene + 13.8), a smanjenje u mediteranskoj (srednja vrijednost – 11.9). U ljetnoj polovini godine (tj. od travnja do rujna) smanjenje količina oborine postaje sve ozbiljnije u mediteranskim državama, ali i u Istočnoj Europi, što povećava pritiske na vodne resurse kada su oni i najpotrebniji. U polarnoj će se zoni količina oborina ljeti najviše povećati (+ 8.8), a u mediteranskoj najviše smanjiti (– 23.0).

Temperatura bi trebala porasti u svim dijelovima Europe, ali najviše daleko na sjeveru i u Istočnoj Europi. Posljedično će vjerojatno porasti stope evapotranspiracije i dovesti do smanjenja otjecanja. Srednja vrijednost promjene godišnje temperature ni u jednoj od 6 europskih klimatskih zona nije negativna. Najveća je u polarnoj (+ 2.7), a najmanja u umjerenj oceanškoj zoni (+ 2.0). Porast temperature je blaži na zapadnim obalama Europe najvjerojatnije zbog utjecaja maritimnosti.

Nadalje, smanjuje se duljina trajanja snježnog pokrivača, s najjačim utjecajem na zemlje oko Baltičkog mora i u planinskim područjima (Alpe, Dinaridi, Karpati, Rila, planine na Islandu i u Skandinaviji). Smanjenje udjela sniježnice i sočnice ima za posljedicu velike promjene u visini protoka u zimskom dijelu godine te u vremenu javljanja prvih (proljetnih) maksimuma (Čanjevac 2012, Schneider i sur. 2013).

5. OPĆENITO O PROMJENAMA PROTOČNIH REŽIMA U EUROPI

Simulirane bi promjene različitih klimatskih elemenata mogle značajno izmijeniti protočne režime u Europi u 2050-ima (slika 2). Procjenjuje se da će klimatske promjene imati veći utjecaj na protočne režime nego što su do sad imali izgradnja brana i crpljenje vode.



Slika 2. Jačina utjecaja klimatskih promjena na prirodne protočne režime rijeka u Europi 2050-ih (prema https://www.researchgate.net/figure/Climate-change-impact-on-the-natural-flow-regime-in-the-2050s-under-the-SRES-A2_fig18_291938256)

Najveći stupanj promjene protočnih režima riječnih tokova može se očekivati u mediteranskoj i borealnoj klimatskoj regiji. Konkretno, utjecaji će biti najveći u južnoj Europi, koja će biti ozbiljno pogođena smanjenjem i ljetnih i zimskih oborina, te u Skandinaviji gdje porast količine oborina tijekom godine i smanjenje snježnog pokrova igraju ključnu ulogu. Osim u tim regijama, planinska područja kao što su Karpati i Balkan određena su kao svojevrsne „vruće točke“ s ogromnim izmjenama protočnih režima uslijed klimatskih promjena. Tamo su za 2050-e naznačena prilično značajna smanjenja kopnjenja snijega i ljetnih oborina.

Najmanji je utjecaj u zapadnoj Europi (točnije u Irskoj, UK, Danskoj, BENELUX-u, Galiciji i Francuskoj). U tim su regijama hidrološke izmjene uzrokovane promjenama količine oborina i temperature blaže, a utjecaj snijega je mali. U kontekstu klimatskih zona, one pripadaju umjerenj oceanskoj.

Naime, u umjerenj su zoni utjecaji klimatskih promjena na protočne režime sve veći od zapada prema istoku. U oceanskom dijelu u 2050-ima 86 % površine ostaje u razredima malog i srednjeg utjecaja, a u kontinentalnom dijelu samo 37 %. Prijelazna umjerenj zona ima 66 % u tim dvama

razredima. Na ovom je primjeru vidljivo kako položaj riječnog sliva u odnosu na ocean može ublažiti njegov odgovor na klimatske promjene (Schneider i sur. 2013).

6. PROMJENE EKSTREMNIH PROTOKA

6.1. NISKI PROTOCI

Osim stupnja promjene protočnog režima također je važno razmotriti koje će se točno karakteristike toka mijenjati u budućnosti jer one određuju koje su ekološke funkcije ugrožene i preko toga koje vrste flore i faune će vjerojatno postati ranjive (Schneider i sur. 2013).

Niski protoci smanjuju asimilativni kapacitet rijeka što negativno utječe na kvalitetu vode nizvodno od točke ispuštanja onečišćivača. Indeksi niskog protoka pokazuju kada bi kvaliteta riječne vode ili vodenog staništa mogla biti ispod prihvaćenog standarda, ali niski protoci ipak nisu potpuno štetni za rijeke i potoke. Neke ekološke dobrobiti povezane s niskim protocima rijeke uključuju pružanje mogućnosti vrstama biljaka u priobalnoj zoni da se obnove u regijama gdje su poplavna područja često plavljena i omogućavanje prisutnosti vrstama beskralježnjaka i riba na područjima gdje bi ih mogle zamijeniti dominantnije, ali manje tolerantne vrste. Također, vrijeme javljanja niskih protoka može služiti kao znak za iniciranje prijelaza u životnom ciklusu, kao što su mrijest, izlijeganje iz jaja, briga za potomstvo ili migriranje. S druge strane, niski protoci dovode do fragmentacije staništa, povećanja gustoće lacija vodenih organizama, smanjenja raznolikosti biljnih vrsta zbog fiziološkog stresa koji uzrokuje smanjenje stope rasta biljaka, morfološke promjene ili smrt (Pyrce 2004).

U Europi se niski protoci obično javljaju u kasno ljeto ili ranu jesen. Obujam minimalnog protoka pod snažnim je utjecajem u mediteranskoj (pad) i u sjevernim klimama (porast), a prati ih umjerena kontinentalna klimatska zona u kojoj ljeta postaju značajno suša. Suprotno tome, niski protoci su tek marginalno pod utjecajem u umjerenj prijelaznoj i oceanskoj zoni. Zbog smanjenja prosječne količine ljetne oborine nad velikim dijelovima kontinenta i zbog povećanja stope evapotranspiracije mogu se očekivati daljnje redukcije niskih protoka u južnim i istočnim regijama. Jedino se u Skandinaviji može uočiti da su povišeni. Tamo, kao i u europskom dijelu Rusije, zimski će se niski protoci vjerojatno povećati zbog sve većeg javljanja zimske oborine u obliku kiše i uočeno je da niski protok (Q90) jače raste nego srednji godišnji protok (Qmean). U Alpama se naime Q90 povećava, a Qmean smanjuje. Tamo su zimski niski protoci u drastičnom porastu zbog viših temperature i manje količine vode pohranjene u obliku snijega. Za UK, Irsku, Dansku, BENELUX, Baltičke države i za

većinu rijeka u Njemačkoj nisu otkrivene bitne promjene obujma ni niskih ni visokih protoka (Döll i Schmied 2012, Schneider i sur. 2013).

6.2. VISOKI PROTOCI

Obujam je maksimalnih protoka najintenzivnije modificiran u mediteranskoj, ali također i u borealnoj klimatskoj zoni, koja će vjerojatno pretrpjeti određene štete zbog pomaka u vremenu javljanja i visokih i niskih protoka. Dok će vrijeme javljanja minimalnih protoka biti znatno izmijenjeno u dvije sjeverne klime, vrijeme javljanja maksimalnih protoka većinom je promijenjeno u snježnim klimama s toplijim ljetima.

Maksimumi protoka će se vjerojatno povećati u Švedskoj, Norveškoj i UK zbog predviđenog povećanja zimskih oborina. Nadalje, bitno će se smanjiti u južnoj Europi (u Španjolskoj, srednjoj i južnoj Italiji, Grčkoj i na rijekama koje su pod utjecajem Taurskog gorja u Turskoj) zbog značajnog smanjenja količine oborina tijekom godine, kao i u istočnoj Europi (osobito na rijekama pod utjecajem Karpata i planina na Balkanskom poluotoku). Kao posljedica toga, poplavna područja u istočnoj Europi mogla bi biti rjeđe poplavljavana uslijed klimatskih promjena što će se negativno odraziti na vegetaciju i ihtiofaunu tih područja. Vrijeme javljanja maksimuma poplava češće će biti pomaknuto na raniji mjesec. Raniji maksimumi vodostaja vjerojatno će se događati u istočnom dijelu Europe i djelomično tamo gdje rijeke izvire u visokim planinama (npr. u Karpatima ili Taurskom gorju). Te se promjene visokih protoka mogu objasniti porastom temperatura zbog kojeg one prelaze 0 °C ranije u toku godine. Osim toga, oborina češće pada u obliku kiše umjesto u obliku snijega. Zbog toga se kopnjenje događa ranije i manje vode je pohranjeno u snježnom pokrovu što dovodi do uranjenih i nižih maksimuma poplava izazvanih kopnjenjem snijega u istočnoj Europi (Schneider i sur. 2013).

6.3. USPOREDBA INDEKSA NISKIH I VISOKIH PROTOKA, SREDNJEG GODIŠNJEG PROTOKA I SEZONSKIH PROTOKA

Döll i Schmied su u svojoj analizi 2012. g. podijelili relativnu promjenu vrijednosti indeksa protočnog režima u razrede i za svaki promatrali na kolikom postotku površine kopna je zastupljen za pojedini indeks. Pri tom su određivali postotak ukupne površine kopna na Zemlji (isključujući Antarktiku i Grenland) koji je pogođen promjenama tog određenog intenziteta između 1961 – 90 i 2041 – 70 te uspoređivali pojedine indekse.

Zaključili su da su na globalnoj razini relativne promjene mjesečnih visokih protoka (Q_{10}) i srednjih godišnjih protoka (Q_{mean}) sličnije su nego promjene Q_{10} i Q_{90} , osobito tamo gdje se Q_{mean} smanjuje. Gdje se Q_{mean} povećava, odredili su da je relativna promjena Q_{10} pretežno veća od one Q_{mean} , što ukazuje na jače povećane vrijednosti visokih protoka. Na područjima gdje Q_{90} i Q_{mean} pokazuju suprotne predznake promjene, Q_{10} i Q_{mean} se uglavnom mijenjaju u istom smjeru i obrnuto.

Razlika između Q_{10} i Q_{90} može se smatrati mjerom vremenske promjenjivosti mjesečnih protoka rijeke, s protokom 8 od 10 mjeseci unutar tog raspona. To je snažno korelirano s relativnom promjenom Q_{mean} , s nekim iznimkama u regijama pod utjecajem snijega. Globalno, Q_{90} se zbog klimatskih promjena povećava manje nego Q_{mean} , a smanjuje više nego Q_{mean} , dok se Q_{10} mijenja slično kao i Q_{mean} .

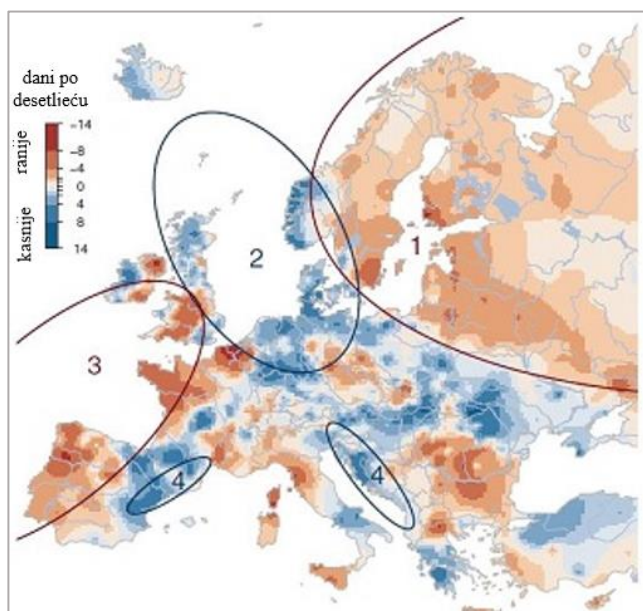
Obrasci relativne promjene visokih i niskih protoka rijeka povezani su s obrascima relativne promjene sezonskih protoka. Ako su se npr. niski protoci 1961 – 90 javljali na sjevernoj hemisferi zimi, kao u Alpama i europskom dijelu Rusije, i QDJF (srednji protok rijeke od prosinca do veljače) i Q_{90} su porasli zbog porasta temperature i posljedično količine kiše i otjecanja zimi.

Klimatske promjene će dovesti do visokih promjena sezonskih protoka u gotovo cijelom svijetu. Samo će se na vrlo malenom dijelu kopna sezonski protok mijenjati približno kao godišnji protok. Predviđa se da će se ljetni protok QJJA (srednji Q rijeke u razdoblju od lipnja do kolovoza) u većini regija sjeverno od 30-35°s.g.š. (južni rub Sredozemnog mora) smanjiti. To je više izraženo u područjima u kojima se smanjuje Q_{mean} (srednji godišnji protok), kao u centralnoj Europi, ali se uočava čak i u mnogim područjima gdje se Q_{mean} povećava, kao u sjevernoj Europi. Za zimske protoke predviđa se suprotno (Döll i Schmied 2012).

7. POPLAVE

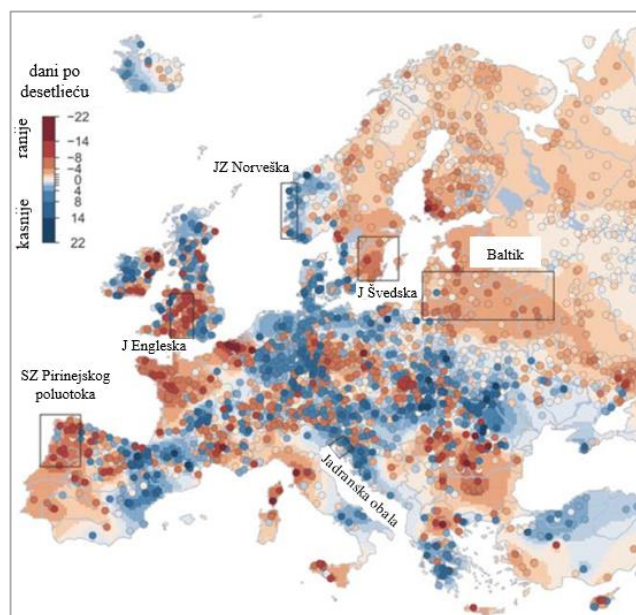
Poplave rijeka pogađaju više ljudi diljem svijeta nego bilo koja druga prirodna nepogoda i uzrokuju velike ekonomske štete. Očekuje se da će se u budućnosti one povećati kao rezultat daljnjeg ekonomskog rasta i klimatskih promjena. Predviđeno je da će ubrzavanje hidrološkog ciklusa zbog zagrijavanja klime promijeniti intenzitet, učestalost i vrijeme javljanja riječnih poplava. Blöschl i suradnici analizirali su vrijeme javljanja riječnih poplava u Europi tijekom posljednjih 5 desetljeća koristeći pan-europsku bazu podataka s 4262 hidrometrijske stanice i odredili jasne obrasce promjene u vremenu javljanja poplava. Budući da su one rezultat uzajamnog djelovanja oborina, vlažnosti tla i procesa povezanih sa snijegom, analizirali su kako će se tijekom vremena razvijati te varijable i usporedili ih s razvojem poplava.

Promjene su najkonzistentnije u sjeveroistočnoj Europi (slika 3, područje 1) gdje 81 % stanica pokazuje pomak prema ranijim poplavama (50 % stanica za više od -8 dana u 50 godina). Budući da tamo poplave uzrokuje kopnjenje snijega u proljeće, a ono se samo zbog porasta temperature javlja sve ranije u toku godine, utvrđeni trend je logična posljedica. Najveće su promjene zabilježene u zapadnoj Europi duž sjevernoatlantske obale od Portugala do Engleske (područje 3) gdje 50 % stanica pokazuje pomak prema ranijim poplavama za barem - 15 dana u 50 godina (25 % stanica za više od -36 dana u 50 god). One su uzrokovane pomakom vremena dostizanja maksimuma vlažnosti tla jer se inače podudaraju zimsko javljanje maksimuma vlažnosti tla i poplava. Oko Sjevernog mora (područje 2), 50 % stanica pokazuje pomak prema kasnijim poplavama za više od + 8 dana u 50 godina. Do njih su doveli ekstremi oborina i poplavljanja zimi u kombinaciji s pomakom vremena javljanja zimskih oluja s ekstremnim oborinama. U nekim dijelovima na sredozemnoj obali (područje 4: sjeveroistočna obala Jadrana, sjeveroistočna Španjolska) postoji pomak prema kasnijim poplavama (50 % stanica za više od + 5 dana u 50 godina) zbog jačeg utjecaja Atlantika zimi.



Slika 3. Trendovi ranijeg ili kasnijeg javljanja poplava u danima po desetljeću na području Europe za razdoblje 1960 – 2010, podjela na regije s različitim uzrocima pomaka vremena poplavljanja

(prema <https://www.ceh.ac.uk/news-and-media/news/climate-link-european-floods>)



Slika 4. Trendovi pomaka vremena poplavljanja u razdoblju 1960 - 2010 na pojedinačnim hidrometrijskim stanicama, pravokutnicima označene podregije (prema Supplementary Materials for Changing climate shifts timing of European flood, Blöschl i sur. 2017)

Osim gore opisanih obrazaca promjene za četiri regije velikih razmjera, mogu se odrediti i obrasci promjena vremena poplavlivanja na manjim razinama. Uočeno je da su one posebno jasno izražene u šest podregija ili „vrućih točaka“: u južnoj Švedskoj, na Baltiku, u jugozapadnoj Norveškoj, južnoj Engleskoj, na sjeverozapadu Pirinejskog poluotoka i na jadranskoj obali (slika 4).

U južnoj Švedskoj i na Baltiku do poplava dolazi najviše zbog kopnjenja snijega u proljeće. Promjena vremena nastupanja poplava zato usko prati promjenu vremena kopnjenja snijega, pomičući se s kraja ožujka na veljaču. Poznato je da do ranijeg kopnjenja snijega dovode lokalni porast temperature i smanjenje učestalosti prodiranja arktičkih zračnih masa. Baltik je od njih topografski slabije zaštićen nego južna Švedska, što se odrazilo na većim promjenama u vremenu kopnjenja snijega 1990-ih.

U jugozapadnoj Norveškoj maksimum oborina na kraju godine izaziva poplave otprilike u isto vrijeme kada se i javlja zato što tamo prevladavaju plitka tla koja imaju ograničen kapacitet zadržavanja podzemne vode (Blöschl i sur. 2017). Sjeverno-atlantska oscilacija (North Atlantic Oscillation - NAO) regionalna je manifestacija hemisferskog cirkulacijskog polja Arktička oscilacija i predstavlja bitan element klimatske promjenjivosti na sjevernoj hemisferi (Stilinović i sur. 2014). Promjene u NAO od 1980. možda su uzrok kasnijeg dolaska intenzivnih zimskih oborina s pomakom maksimuma s listopada na prosinac u ovoj regiji. Navedene anomalije NAO pojave manje su izražene od početka 2000-ih..

U južnoj Engleskoj retencijski kapacitet tla za vodu puno je veći nego na obalama Norveške. Maksimum kiše, koji se javlja u jesen, obično se pohranjuje, a vlažnost tla i količina vode u podzemlju kontinuirano se povećavaju dok ne dosegnu maksimum u zimu. Kiše se nastavljaju te tada padaju na tla već zasićena vodom i uzrokuju najveće poplave zimi. Zbog toga je vrijeme javljanja poplava u južnoj Engleskoj više povezano s vremenom maksimuma vlažnosti tla, nego s vremenom ekstremnih oborina.

Promjene u vremenu poplavlivanja na sjeverozapadu Pirinejskog poluotoka slične su onima u južnoj Engleskoj, iako na Pirinejskom poluotoku ima više oborina zimi, tako da se ekstremne oborine i maksimalna vlažnost tla (uzrokovana neprekidnim oborinama) više podudaraju.

Utjecaj Atlantskog oceana velikih razmjera djeluje na ciklonsku aktivnost srednjih razmjera nad Jadranom, što na njegovoj obali izaziva intenzivne oborine prema kraju godine. Pomaci putanja oluja u smjeru sjever-jug pojačali su atmosfersko strujanje s Atlantika na Sredozemlje zimi što je dovelo do kasnijeg javljanja ekstreme oborina i poplava.

Prosječno vrijeme javljanja poplava u toku godine postupno se mijenja kako od zapada prema istoku, zbog povećanja udaljenosti od Atlantskog oceana, tako i od juga prema sjeveru, zbog povećanja utjecaja procesa povezanih sa snijegom. Učinak održavanja i kopnjenja snijega na velikim nadmorskim visinama (npr. na Alpama ili Karpatima) superponiran je na ovaj prostorni obrazac (Blöschl i sur. 2017).

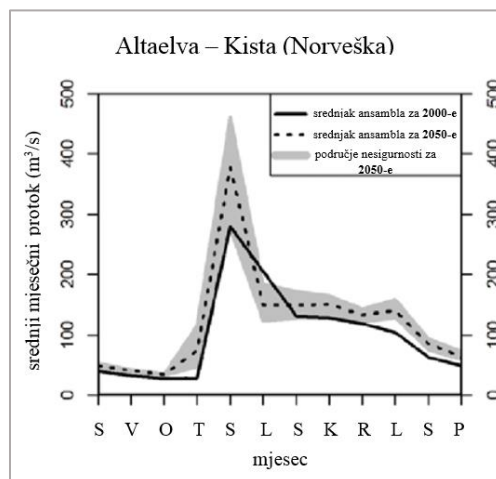
8. PROTOČNI REŽIMI 2050-IH U RAZLIČITIM KLIMATSKIM ZONAMA

Schneider i suradnici (2013) modelirali su za svaku klimatsku zonu kako bi tipični protočni režimi mogli izgledati 2050-ih pod utjecajem isključivo klimatskih promjena. Ti rezultati mogli bi vrijediti za većinu rijeka u svakoj zoni, ali moguće su lokalne varijante zbog lokalnih čimbenika kao što su visoki planinski lanci, pohranjivanje vode u jezerima i močvarama, antropogene modifikacije i sl.

Efekti na protočni režim unutar klimatske zone objašnjeni su hidrogramom reprezentativne rijeke (slika 1). Te su rijeke izabrane kao primjeri zbog svog centralnog položaja unutar klimatske zone i zbog toga što odražavaju promjene protočnog režima specifične za tu klimatsku zonu. Hidrogrami sadrže prirodne mjesečne protočne režime u početnom standardnom razdoblju (1971 – 2000) i 2050-ih (2041 – 2070) uslijed klimatskih promjena.

8.1. POLARNA ZONA

Zbog dugih i ekstremno hladnih zima u polarnoj zoni, snijeg kopni vrlo kasno u proljeće, zbog čega se najveće poplave obično javljaju u svibnju ili lipnju. Nakon ekstremno niskih protoka zimi, ta poplava donosi više od 60 % ukupnog godišnjeg protoka unutar tri mjeseca. Prema klimatskim projekcijama, polarna se zona suočava s najvećim porastom temperature (prosječno + 2,7 °C) i povećanjem prosječne količine oborina kako u ljetnoj tako i u zimskoj polovini godine. Predviđa se da će u većini mjeseci u godini protoci 2050-ih biti veći. Veće količine oborina prevladavaju nad većim stopama evapotranspiracije. Osobito u travnju povećanje protoka može biti ekstremno kako se kopnjenje odvija brže i počinje ranije u toku godine zbog viših temperatura. Detaljnija analiza pokazuje da će vjerojatno maksimumi poplava biti niži većinom na Islandu. Suprotno od toga, maksimumi protoka teže povećavanju u sjevernoj Skandinaviji zbog znatno više predviđenih zimskih oborina, tj. više snijega pohranjenog u snježnom pokrovu čije kopnjenje dovodi do maksimuma poplava. Rijeka Altaelva u sjevernoj Norveškoj opisuje tipični primjer kontinentalnog dijela polarne zone (slika 5). Ovdje su najveći protoci veći u usporedbi s prirodnim protočnim režimom, ali opadaju brže kao rezultat ubrzanog kopnjenja, što može dovesti do nižih protoka u rano ljeto usprkos povećanju kiše (Schneider i sur. 2013).

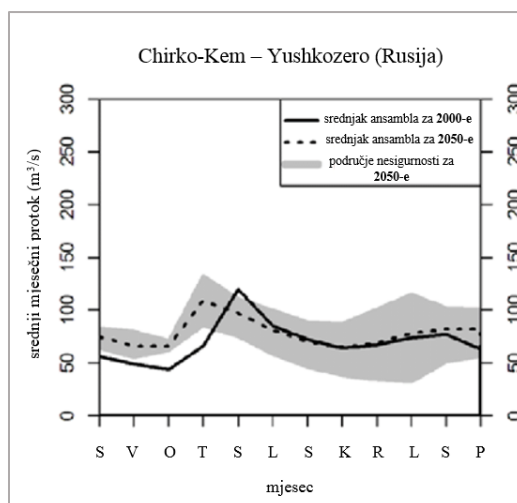


Slika 5. Usporedba srednjih mjesečnih protoka Altaelve 2000-ih i 2050-ih (prema https://www.researchgate.net/figure/Direction-of-change-in-the-2050s-plotted-for-all-grid-cells-of-the-polar-climate-zone_fig23_291938256)

8.2. BOREALNA ZONA

I u borealnoj se zoni snijeg nakuplja pet do šest mjeseci, često bez prekida povremenim okopnjavanjem. Također prevladava nivalni režim gdje kopnjenje snijega i leda uzrokuje brzu zamjenu niskih zimskih protoka proljetnim bujicama koje obično dosežu svoj vrhunac u svibnju. Ljeti protoci opadaju zbog veće evapotranspiracije, ali može se javiti manji sekundarni maksimum sredinom jeseni s pojavom oluja s pljuskovima u to doba. U borealnoj se zoni predviđa najveći porast srednje količine oborina zimi 2050-ih (+ 13.8 %), a očekuje se da će srednja količina oborina ljeti porasti za 6 %. Prema tome, u budućnosti će zimski protok biti viši u usporedbi s prirodnom protočnim režimom, dok će ljetni protok biti pod manjim utjecajem. U borealnoj je regiji ranije kopnjenje snijega najizraženije u usporedbi s ostalim klimatskim zonama. Kao posljedica toga, protok će u budućnosti dosežati maksimum mjesec dana ranije (u travnju umjesto u svibnju). Zbog ranijeg kopnjenja snijega u proljeće i povremenih epizoda okopnjavanja u zimskim mjesecima, količina vode pohranjena u snijegu bit će sve manja. Ipak, u Švedskoj i Norveškoj ti su efekti više nego kompenzirani većom količinom oborina i tu će se obujam proljetnih bujica vjerojatno povećati 2050-ih. Zimski će protoci porasti zbog povećanja količine oborina, zamjene snijega kišom i povremenog kopnjenja snijega koje se događa već u zimskim mjesecima u 2050-ima. Tijekom ljeta (od lipnja do rujna) povećana količina oborina često je nadjačana većom stopom evapotranspiracije i oko 50 % površine borealne klimatske zone vjerojatno će imati manji ljetni protok. Hidrogram rijeke Chirko-Kem u Kareliji (Rusija) predstavlja tipičan primjer zone, s uranjenim maksimumom poplava izazvanog kopnjenjem snijega (slika 6). Različite studije koje su analizirale trendove riječnih protoka u Skandinaviji, europskom dijelu Rusije i u Baltičkim državama upućuju na

to da se zimski, ljetni i jesenski protoci povećavaju, a proljetni protoci smanjuju od sredine 1970-ih (Schneider i sur. 2013).

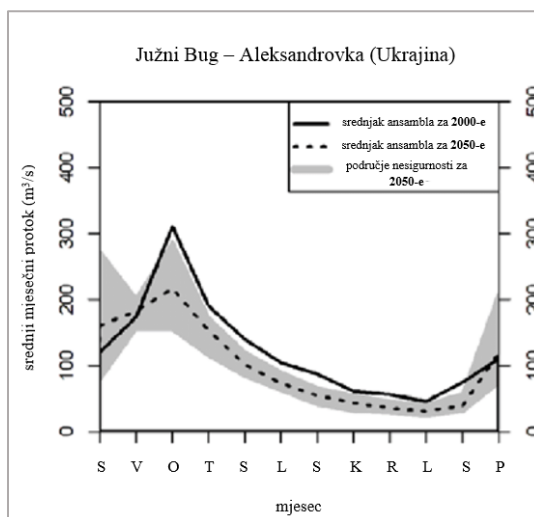


Slika 6. Usporedba srednjih mjesečnih protoka Chirko-Kema 2000-ih i 2050-ih (prema https://www.researchgate.net/figure/Direction-of-change-in-the-2050s-plotted-for-all-grid-cells-of-the-boreal-climate-zone_fig24_291938256)

8.3. UMJERENA KONTINENTALNA ZONA

Rijeke u umjerenj kontinentalnoj zoni dosežu maksimum početkom ili sredinom proljeća. Tada proljetne poplave može izazvati i samo kiša, ali obično su one pojačane i oslobađanjem zimskih oborina koje su bile pohranjene u snijegu tijekom hladnijih mjeseci. Ljeti protoci obično opadaju dok ponovno ne porastu u kasnu jesen. Izrazita promjenjivost u kontinentalnoj klimatskoj zoni vjerojatno će se 2050-ih dodatno povećati. Količina oborina zimi neznatno će porasti, a i tako sušnija ljeta bit će još intenzivnija i primati 13,4 % manje oborina, što predstavlja drugo najveće smanjenje nakon mediteranske klimatske zone. Srednji porast temperature (+ 2,4 °C) bit će viši nego u umjerenj oceanskoj klimatskoj zoni. Analize pokazuju da se zimski protoci povećavaju, ali da će proljetni maksimumi, kao i ljetni i jesenski protoci, biti niži u 2050-ima. Protoci će između travnja i studenog biti znatno manji zbog smanjene količine oborina ljeti. Maksimumi kopnjenja snijega i leda niži su i javljaju se ranije u toku godine, što će imati snažan utjecaj u ovoj regiji s vrlo hladnim zimskim mjesecima. Ipak, ranije vrijeme javljanja često je uranjeno manje od 30 dana. Primjer Južnog Buga u Ukrajini pokazuje da se i maksimalni i minimalni protoci smanjuju. U umjerenj kontinentalnoj zoni uočen je najširi raspon promjena u usporedbi s drugim klimatskim zonama. Razlog tome je što je ona najveće područje analizirano u studiji (proteže se od južne Švedske do Turske) i sadrži velike planinske lance

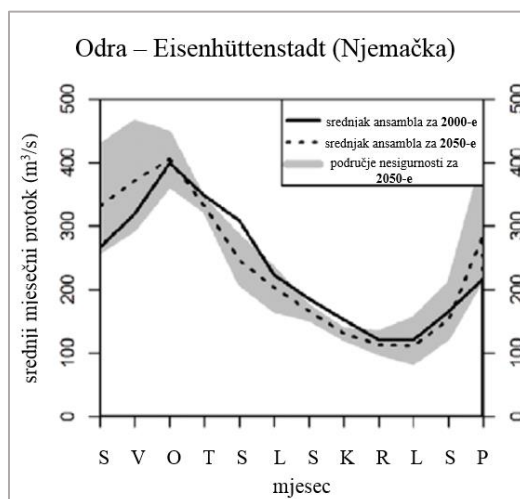
kao što su Alpe, Pirineji i Karpati koji uzrokuju lokalne ekstreme i divergencije. Ipak, smjer promjene je homogen u cijeloj regiji od travnja do studenog. Zimski protoci (od prosinca do veljače) povećat će se u 2050-ima, ali pokazuju veći raspon promjene (Schneider i sur. 2013).



Slika 7. Usporedba srednjih mjesečnih protoka Južnog Buga 2000-ih i 2050-ih (prema https://www.researchgate.net/figure/Direction-of-change-in-the-2050s-plotted-for-all-grid-cells-of-the-temperate_fig25_291938256)

8.4. UMJERENA PRIJELAZNA ZONA

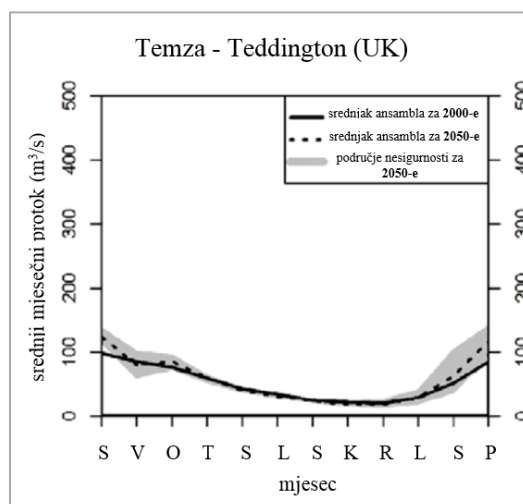
Protočni režimi u umjerenoj prijelaznoj zoni slični su protočnim režimima u kontinentalnom dijelu Europe, ali su ujednačeniji. Dosezanje visokih protoka odvija se sporije i ranije u proljeće. Niski protoci su manje izraženi. Simulirani klimatski uvjeti za ovu regiju predviđaju relativno visok porast srednjih temperatura (za 2.4 °C) do 2050-ih. Nisu određene izražene promjene količine oborina ljeti, ali očekuje se da će srednja količina oborina zimi porasti za 10,2 %. Simulirani hidrogrami u ovoj regiji u 2050-ima pokazuju jak utjecaj jedino u trima zimskim mjesecima, prikazan na primjeru rijeke Odre u Njemačkoj (slika 8). Relativno konzistentni za cijelu regiju, rezultati upućuju na neznatno niže protoke između travnja i studenog zbog viših temperatura i malo smanjene količine oborina. Maksimumi, koji se obično javljaju u ožujku ili travnju, rijetko su izmijenjeni, ali mogu biti malo uranjeni. Moguće je da u budućnosti umjerena prijelazna klimatska zona više ne bude pod značajnim utjecajem kopnjenja snijega. Predviđeni porast zimske količine oborina, prijelaz snijega u kišu i tzv. “rain on snow events” mogu uzrokovati da kiše izazovu neposredne maksimume otjecanja, čineći zimske protoke u ovoj regiji ne samo većima, nego i promjenjivijima. Takav trend od snježnog režima otjecanja prema režimu zimskih kiša već je opažen na nekim područjima (Schneider i sur. 2013).



Slika 8. Usporedba srednjih mjesečnih protoka Odre 2000-ih i 2050-ih (prema https://www.researchgate.net/figure/Direction-of-change-in-the-2050s-plotted-for-all-grid-cells-of-the-temperate_fig26_291938256)

8.5. UMJERENA OCEANSKA ZONA

U vlažnoj umjerenjnoj oceanskoj zoni, s ravnomjernim rasporedom oborina tijekom godine, protočni režimi su još ujednačeniji. Obično imaju jasan zimski maksimum (u Škotskoj jasan jesenski maksimum) te manje protoke ljeti zbog gubitaka evapotranspiracijom. U ovoj zoni, koja graniči s obalom Atlantskog oceana, utvrđena je najniža vrijednost porasta temperature (prosječno + 2,0 °C). Ipak, u cijeloj se regiji srednja količina oborina zimi povećava za 8,8 %, a srednja količina oborina ljeti smanjuje za 9,9 %. Kao odgovor na umjerenije promjene elemenata klime, protočni režimi rijeka predviđeni za 2050-e manje su pogođeni klimatskim promjenama. Protoci u ljetnoj polovini godine ipak će tada biti manji, a protoci u zimskim mjesecima (od prosinca do veljače) će se povećati. Hidrogram rijeke Temze kod Teddingtona pokazuje gotovo prirodne uvjete protoka u budućnosti, koji bi se u umjerenjnoj oceanskoj zoni, posebno u Ujedinjenom Kraljevstvu, mogli održati (slika 9). Analize trenda riječnih protočnih režima u UK-u za sada ne pokazuju jasne statističke trendove pod utjecajem klime ni za visoke ni za niske protoke. U Irskoj i Škotskoj otkriveno je povećanje vrijednosti otjecanja u posljednjih 40 godina (Schneider i sur. 2013).

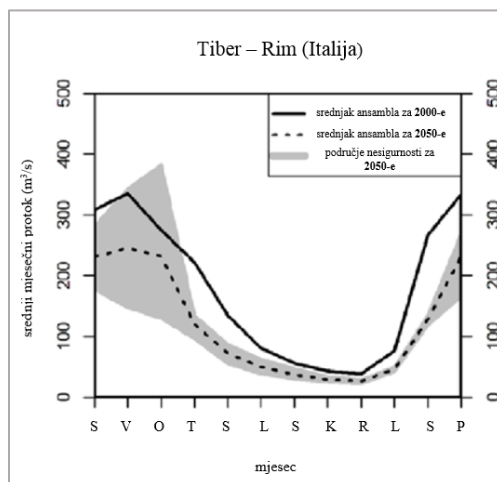


Slika 9. Usporedba srednjih mjesečnih protoka Temze 2000-ih i 2050-ih (prema https://www.researchgate.net/figure/Direction-of-change-in-the-2050s-plotted-for-all-grid-cells-of-the-temperate-oceanic_fig27_291938256)

8.6. MEDITERANSKA ZONA

8.6.1. PROTOČNI REŽIMI

Protočni režimi rijeka u mediteranskoj klimatskoj zoni vrlo su promjenjivi. Dok se oborine uglavnom javljaju u zimskoj polovini godine, tijekom sušnih ljetnih mjeseci mogu se pojaviti izrazito niski protoci, što može dovesti do presušivanja korita ili formiranja razdvojenih lokvi duž rijeke i prijelaz s tekućih na stajaće vode. Hidrološke simulacije za mediteransku klimatsku zonu karakterizira značajno smanjenje srednje količine oborina i za ljetnu i za zimsku polovinu godine. Osobito ljeti količina oborina opada za 23 %, što predstavlja najveće smanjenje dobiveno u analizi klimatskih zona. Promjene protoka rijeka pokazuju vrlo konzistentne rezultate za cijelu regiju od travnja do studenog, no raspon promjene je vrlo velik od listopada do ožujka. Jedan razlog za to je utjecaj različitih planinskih lanaca u Južnoj Europi, tako da na nekim lokacijama otjecanje može biti pod utjecajem snijega. Hidrogram rijeke Tiber blizu Rima pokazuje značajno smanjenje protoka tijekom godine. Prema simulacijama, protoci rijeka u Sredozemlju vjerojatno će biti još manje postojani u budućnosti, s većim brojem događaja nultog protoka, tj. isušivanja koje stvara razdvojene lokve. (Schneider i sur. 2013). Döll i Schmied (2012) također predviđaju da bi zbog klimatskih promjena moglo doći do prijelaza stalnih vodotoka u povremene u ovoj zoni.



Slika 10. Usporedba srednjih mjesečnih protoka Tibera 2000-ih i 2050-ih (prema:

https://www.researchgate.net/figure/Direction-of-change-in-the-2050s-plotted-for-all-grid-cells-of-the-Mediterranean_fig28_291938256)

8.6.2. UZROCI POVEĆANE UČESTALOSTI SUŠA

U mediteranskoj se regiji u razdoblju 1902. – 2010. g. vjerojatno dogodila promjena u količini zimskih oborina prema sušnijim uvjetima, s povećanom učestalošću suša nakon oko 1970. g. Zapažena je promjena djelomično pripisana osjetljivosti mediteranske regije na vanjskim faktorima uzrokovanu (procesima izvan Zemlje i njezine atmosfere koji utječu na klimu) promjenu bilance energije klimatskog sustava (radiative forcing). Radiative forcing (RF) predstavlja razliku između apsorbiranog i reflektiranog sunčevog zračenja u Wattima po metru kvadratnom (W/m^2). Promjenjivošću vanjskih čimbenika koji utječu na klimu moguće je objasniti otprilike polovinu magnitude uočene promjene prema sušnijim uvjetima, što upućuje na zaključak da su vjerojatno i drugi procesi doprinijeli tom trendu. Među unutarnjim faktorima koji utječu na klimu (unutar Zemlje i njezine atmosfere) ključni su antropogeni staklenički plinovi i aerosoli. Nadalje, temperatura površine mora (sea surface temperature - SST) 1902 - 2010 vjerojatno je igrala važnu ulogu u zabilježenom „sušenju“ Sredozemlja, a utjecaj vanjskih čimbenika na tu promjenu vjerojatno također djeluje preko promjene SST. Zabilježeno je da je globalna SST važan čimbenik koji utječe na klimu sjevernog Atlantika i Europe preko osjetljivosti zimske NAO oscilacije (Čalogović 2014, Hoerling i sur. 2011, URL 1). Kada su Hoerling i sur. 2011. g. istraživali moguće uzroke povećane učestalosti suša u Sredozemlju uočene tijekom posljednjih desetljeća, fokusirali su se na promjenu količine zimskih oborina u regiji pod utjecajem promjene temperature površine mora (SST). Modificirali su klimatske modele na tri načina:

Jednoliko zagrijavanje svjetskih oceana za $10,58\text{ }^{\circ}\text{C}$ izazvalo je značajno sušenje istočnog dijela Sredozemlja, ali nije uspjelo stvoriti svojstveni trend sušenja cijelog Sredozemlja koji je vidljiv u zapažanjima i simulacijama klimatskih modela. Umjesto toga, pokazalo se da su potrebni meridionalni

i zonalni gradijenti u obrascu promjene SST kako bi potaknuli odgovarajuću promjenu količine oborina nad Sredozemljem.

Za porast površinske temperature oceana za 10,58 °C ograničen samo na tropske širine (što uvodi povećanje klimatološkog meridionalnog gradijenta), sušenje obuhvaća cijelu mediteransku regiju. Odgovor regionalne cirkulacije atmosfere u tim uvjetima sličan je simuliranome te, iako je drugačiji od obrasca NAO oscilacije, pogodan je za premještanje oluja koje nose vlagu prema sjeveru u europski kontinent.

Intenzitet simuliranog sušenja Sredozemlja bitno se povećava, osobito u njegovom zapadnom dijelu, kada je tropski Indijski ocean zagrijan 10,58 °C više nego ostatak tropskih oceana (što uvodi povećanje klimatološkog zonalnog gradijenta). U ovom scenariju obrazac odgovora atmosferske cirkulacije nalikuje na pozitivnu fazu NAO. Općenito, tijekom pozitivne NAO pojave nad područjem južne Europe količina oborine je smanjena, a temperature su nešto više od prosjeka. Iako je to dodatno zagrijavanje Indijskog oceana u odnosu na Pacifički ocean tijekom zadnjeg stoljeća preuveličano, eksperimentalni rezultati mogli bi ipak ukazati na faktor koji doprinosi blagom uzlaznom trendu u NAO indeksu (razlika atmosferskog tlaka između Islanda i Azora) u zapažanjima i simulacijama u razdoblju 1902 - 2010. Hoerling i sur. (2011) su zaključili da NAO pojava nije prvenstveno osjetljiva na samo zagrijavanje Indijskog oceana, nego na razliku između stupnja zagrijavanja Indijskog oceana i ostatka tropskih oceana. Ipak, ne može se isključiti mogućnost da su male amplitude uočenog uzlaznog trenda prema pozitivnoj fazi NAO nastale samo zbog unutrašnje atmosferske promjenjivosti (Hoerling i sur. 2011, Stilinović i sur. 2014).

9. POSLJEDICE KLIMATSKIH PROMJENA NA EKOSUSTAVE KOPNENIH VODA

Protočni režimi imaju velik utjecaj na riječnu biotu i vegetaciju priobalne zone pa će slatkovodni ekosustavi biti posebno ugroženi zbog njihovih promjena. U riječnim ekosustavima različiti protoci imaju različite ekološke funkcije te se mogu okarakterizirati svojim obujmom, vremenom pojavljivanja, trajanjem, učestalošću i promjenjivošću. Različite kombinacije navedenih čimbenika oblikuju različite stanišne uvjete i stoga imaju izuzetnu važnost u stvaranju i održavanju bioraznolikosti. Promjene protoka od suša do poplava neophodne su kako bi se sačuvali biološki sastav, integritet i evolucijski potencijal riječnih ekosustava, uključujući s rijekama povezanih poplavnih područja i močvara. Tijekom evolucijskog vremena autohtona je biota razvila različite morfološke, fiziološke i bihevioralne osobine kako bi se prilagodila na prirodni protočni režim. Sve veća odstupanja od prirodnih obrazaca fluktuacije protoka dovode do povećanih ekoloških posljedica koje odgovaraju širenju invazivnih vrsta na račun

prilagođenih endemskih vrsta (Schneider i sur. 2013). Posebno su značajni za slatkovodne ekosustave prijelazi između stalnih, prijelaznih i povremenih vodotoka. Oni predstavljaju velike promjene stanišnih uvjeta i stoga značajan utjecaj klimatskih promjena na slatkovodne ekosustave. Predviđa se da bi se ti prijelazi mogli dogoditi većinom u polusušnim, ali i u nekim hladnim područjima u kojima prije zimi gotovo da i nije bilo vodotoka zbog smrzavanja. Prijelazi iz stalnih u povremene (ili obrnuto) vodotoke u korelaciji su sa smanjenjem (ili povećanjem) srednjeg otjecanja, ali čak i više sa smanjenjem (ili povećanjem) niskih protoka (Döll i Schmied 2012).

Makrozoobentos, posebno kukci, dominantan su takson u većini tekućica. Budući da je njihov životni razvoj najviše određen fotoperiodom i temperaturom, zatopljenje klime bi moglo imati značajan utjecaj na vodene kukce. Na kopnenim su vodama već vidljivi učinci porasta temperature i promjena hidrološkog režima. Te lokalne promjene okoliša selektiraju specifične prilagodbe, što kasnije dovodi do promjena u funkcionalnoj i taksonomskoj raznolikosti starosjedilačkih zajednica. Razlike u morfološkim, bihevioralnim i fiziološkim značajkama pojedine vrste prate klimatske gradijente, tj. regije s različitim klimatskim uvjetima naseljavaju organizmi s različitim, tim uvjetima prilagođenim, biološkim osobinama. Posljedično, klimatske će promjene vjerojatno izmijeniti sastav značajki i vrsta. Tijekom perioda rapidnih promjena u okolišu, određene će značajke vrstama biti korisne. Očekuje se da će generalisti bolje uspijevati u okolišima koji se mijenjaju, dok bi se specijalisti sa striktnim ekološkim zahtjevima i malim kapacitetom disperzije mogli suočiti sa smanjenjem rasprostranjenosti ili čak izumiranjima uslijed klimatskih promjena. Prateći te generalne pretpostavke istraživači kopnenih voda počeli su koristiti makrozoobentos kao pokazatelje potencijalnih utjecaja klimatskih promjena na vodene ekosustave (Conti i sur. 2013).

Conti i sur. 2013. g. su analizirali ekološke i biološke značajke triju redova vodenih kukaca (Ephemeroptera, Plecoptera, i Trichoptera) na razini europskih ekoregija kako bi procijenili njihovu potencijalnu ugroženost klimatskim promjenama. Uočili su jasne opće obrasce ugroženosti vodencvjetova (Ephemeroptera), obalčara (Plecoptera) i tulara (Trichoptera) i odredili da su obalčari najugroženija grupa, jer zauzimaju usku ekološku nišu, a vodencvjetovi najmanje ugrožena grupa. Ovi su zaključci povezani s općim karakteristikama analiziranih redova kukaca, ali ne uzimaju u obzir regionalne čimbenike kao što su antropogeni utjecaj ili potencijalni utjecaj invazija alohtonih vrsta, kojima pogoduju poremećaji ekosustava, a koje ekosustave čine još osjetljivijima. Ugroženost vodenih kukaca po europskim ekoregijama pokazuje opći gradijent smanjivanja od juga prema sjeveru. Kao "vruće točke" ugroženosti makrozoobentosa u Europi zbog klimatskih promjena određeni su mediteranski poluotoci i Alpe. Vrste prilagođene na hladne uvjete i endemske vrste prilagođene na tople uvjete, koje naseljavaju dva ekstrema, vrlo su osjetljive na promjene u okolišu. To se može zaključiti iz podudarnosti longitudinalnih gradijenata i gradijenata endemizma, s najugroženijim vrstama koje naseljavaju hladne izvorišne dijelove rijeka ili su endemi mediteranskih potoka, što za sobom povlači

pomak areala vrsta prema sjeveru. Općenito, predviđena smanjenja areala mogla bi biti povezana s gubitkom intraspecijske genetičke varijabilnosti zbog smanjenja efektivne veličine populacija i izumiranja regionalnih genetskih linija, što teoretski negativno utječe na metapopulacije vrsta. Iako predviđanja za planinske vodene kukce Europe potvrđuju ta očekivanja, s najvećim gubitcima bioraznolikosti u mediteranskoj regiji, analize genetičke raznolikosti refugijalnih populacija vodencvjeta *Palingenia longicauda*, čija se rasprostranjenost znatno smanjila, nisu otkrile takve efekte (Conti i sur. 2013).

Osim globalnim utjecajima kao što su klimatske promjene i kisele oborine, slatkovodni su ekosustavi ugroženi prekomjernim iskorištavanjem, zagađenjem, uništavanjem, degradacijom staništa te širenjem invazivnih vrsta. Bioraznolikost se u kopnenim vodama zbog tih brojnih stresora smanjuje brže nego na kopnu i u moru, sa stopom nestajanja usporedivom s povijesnim događajima velikih izumiranja., a pokazalo se da su slatkovodni ekosustavi među najugroženijim ekosustavima na svijetu. Od 1900. g. nestalo je pola močvarnih područja u svijetu, a od 1970. g. broj slatkovodnih biljnih i životinjskih vrsta smanjio se za 50 %. Prema sadašnjim trendovima gubitka riječnih vrsta, globalnog zagrijavanja, rasta broja stanovnika i promjena načina korištenja zemljišta, to će se nastaviti i u budućnosti. Kako bi se smanjio daljnji pritisak na riječne ekosustave potrebni su prilagodljivo upravljanje ekološki prihvatljivim protokom te inteligentno korištenje brana koje osigurava ekološki važne elemente protočnog režima i visoke protoke za poplavljanje močvarnih područja (Conti i sur. 2013, Gleick i Palaniappan 2010, Schneider i sur. 2013).

10. SOCIJALNE I EKONOMSKE POSLJEDICE PROMJENE DINAMIKE I GRANICE RASPOLOŽIVOSTI SLATKE VODE

Ekonomске i socijalne posljedice promjena protočnih režima također su brojne su brojne. Osim do ekoloških, moglo bi doći i do značajnih ekonomskih posljedica ako se, gore navedeni, sadašnji trendovi u vremenu poplavljanja nastave, zato što su se društva i ekosustavi prilagodili prosječnom vremenu javljanja poplava u toku godine. Kasnije zimske poplave u slivovima oko Sjevernog mora, npr., dovest će do smanjenja poljoprivredne produktivnosti. Ranija pojava proljetnih poplava u toku godine u sjeveroistočnoj Europi mogla bi ograničiti nadopunjavanje rezervoara vode, s bitnim smanjenjima u vodoopskrbi, navodnjavanju i proizvodnji hidroenergije. Osim mogućih financijskih gubitaka u industrijskom sektoru, manjka usjeva i šteta od poplava, socijalni troškovi zbog oštećenja ekosustava također će biti veliki. Zdrave rijeke čovječanstvu pružaju velik broj dobara i usluga ekosustava. Njihova vrijednost globalno procijenjena je na 6,5 bilijuna USD i uključuje pročišćavanje vode, proizvodnju hrane, opskrbu sirovinama, ublažavanje poplava, rekreacijske vrijednosti, genetičke

resurse i mnoštvo drugih vitalnih funkcija koje se temelje na bogatoj bioraznolikosti rijeka (Blöschl i sur. 2017, Schneider i sur. 2013).

2000. godine približno 2,4 milijarde ljudi živjelo je u slivovima rijeka u uvjetima vodnog stresa, a predviđa se da će taj broj u budućnosti porasti. Povećanje vodnog stresa može biti uzrokovano smanjenjem ukupnog protoka ili samo promjenama njegove sezonalnosti. Npr., navodnjavanje za potrebe poljoprivrede, najveći potrošač vode u svijetu, ovisi o njezinoj dostupnosti tijekom ljeta kada je protok nizak. Iako neki slivovi mogu dosegnuti više vrijednosti godišnjeg otjecanja zbog klimatskih promjena, višak vode će se najvjerojatnije javljati za vrijeme visokih voda, što neće riješiti problem sušnih razdoblja. Klimatske promjene često se povezuju s problemima smanjivanja raspoloživosti vode i nestašice vode te se sve više raspravlja o tome približavamo li se točki maksimalne proizvodnje vode, tj. gornjoj granici eksploatacije vode, slično kao što je predviđeno za naftu. Koncept nestanka vode na globalnoj razini ima malu vjerojatnost. Puno veće količine vode od ukupne količine koju koriste ljudi distribuiraju se u svijetu u različitim oblicima zaliha. Budući da izvori slatke vode na Zemlji nikada neće “nestati”, zabrinutost zbog nestašice vode mora biti rezultat nečeg drugog osim straha da doslovno trošimo ograničene izvore. A oni su naravno slijedeći: izazovi vezani za vodu rezultat su iznimno neravnomjerne geografske distribucije vode (kako zbog prirodnih, tako i zbog ljudskih čimbenika), gospodarskih i fizičkih ograničenja eksploatacije nekih od najvećih izvora slatkih voda (kao što su podzemne vode duboko ispod zemlje i led na Antarktici i Grenlandu), zagađivanje od strane ljudi nekih već dostupnih zaliha te visoki troškovi transporta vode iz jednog mjesta do drugog (Gleick i Palaniappan 2010, Schneider i sur. 2013).

Voda je u velikoj mjeri obnovljiv resurs s brzim tokovima iz jedne zalihe i oblika u drugi, a ljudska upotreba vode tipično nema utjecaj na tempo prirodnog nadopunjavanja. No također postoje fiksne ili izolirane zalihe lokalnih izvora vode koji se konzumiraju puno bržim tempom od tempa prirodnog nadopunjavanja (npr. vodonosnici podzemnih voda). Te zalihe vode koje se konzumiraju lokalno zapravo su neobnovljivi izvori: kada potrošena voda nije nadopunjena u vremenskom razdoblju koje je od društvenog interesa, ta zaliha s vremenom biva iscrpljena, potrošena. Sama voda ostaje u hidrološkom ciklusu u nekoj drugoj zalihi ili toku, no više nije raspoloživa za potrošnju u regiji gdje se prvobitno nalazila. Kada se dostignu granice raspoloživosti vode u određenim regijama, malo je mogućih opcija koje bi mogle zadovoljiti dodatne potrebe: smanjivanje potražnje, zamjena jedne vrste upotrebe vode za drugu koja ima veću gospodarsku ili društvenu vrijednost, fizičko premještanje potrebe za vodom u regiju gdje je dodatna voda raspoloživa; ili investiranje u izvor opskrbe koji ima višu cijenu, uključujući desalinizaciju, uvoz ili transfer vode u rasutom obliku. U ovom slučaju, cijena novog oblika opskrbe, uključujući trošak transporta vode, je ograničavajući faktor (Gleick i Palaniappan 2010).

Gleick i Palaniappan 2010. g. predložili su tri definicije u kojima je koncept gornje granice koristan u kontekstu izvora vode i uveli izraz koji je koristan kada se razmišlja o maksimiziranju

višestrukih sustava zalihe vode: “gornja granica raspoloživosti ekološke vode”. Ovi koncepti mogu pomoći znanstvenicima iz područja hidrologije, onima koji upravljaju vodama, donositeljima političkih odluka i javnosti da bolje razumiju te učinkovitije i na održiv način upravljaju različitim vodenim sustavima.

Gornja granica raspoloživosti obnovljive vode. Dio ukupne količine ljudske potrošnje vode dolazi od vode koja se koristi iz obnovljivih tokova kišnice, rijeka, potoka i bazena podzemnih voda koji se nadopunjuju u relativno kratkom vremenskom razdoblju. Iako određeni izvor vode može biti obnovljiv, to ne znači da je neiscrpan. Svaki sliv ima samo određenu količinu godišnje obnovljive zalihe vode. Ukoliko godišnja proizvodnja obnovljive vode iz sliva počne eksponencijalno rasti, doći će do prirodne granice ukupne godišnje obnovljive zalihe vode. Ta granica varira prema prirodnom variranju u hidrologiji, no to je krajnja razina u smislu dodjeljivanja obnovljive zalihe vode. Odgovarajuća stvarna granica može biti značajno manja od nje, kako je objašnjeno u nastavku, u odjeljku o gornjoj granici raspoloživosti ekološke vode.

Gornja granica raspoloživosti neobnovljive vode. U nekim slivovima značajna količina trenutne potrošnje vode dolazi iz zaliha vode koje su zapravo neobnovljive, kao što su podzemni vodonosnici s vrlo sporim tempom nadopunjavanja ili sustavi podzemnih voda koji gube sposobnost nadopunjavanja kada dođe do prekomjernog crpljenja uslijed zbijanja ili drugih fizičkih promjena u bazenu. Kada potrošnja vode iz podzemnih vodonosnika daleko premaši tempo prirodnog nadopunjavanja, ta zaliha podzemne vode vrlo će brzo biti iscrpljena. Ili ukoliko podzemni vodonosnik bude kontaminiran zagađivačima koji dovode do toga da se voda ne može koristiti, obnovljivi vodonosnik može postati neobnovljiv. U nekim će područjima klimatske promjene utjecati na prirodu i veličinu gornje granice raspoloživosti vode. Tamo gdje su trenutno lokalne zajednice ovisne o otjecanju rijeka uslijed kopnjenja ledenjaka, gubitak ledenjaka u narednim godinama dovest će efekta “gornje granice raspoloživosti neobnovljivih izvora vode”: smanjenje zaliha vode kroz određeno vrijeme. Zajednice ovisne o nadopunjavanju podzemnih voda kod kojih je došlo do smanjenog tempa nadopunjavanja također će osjetiti efekt sličan gornjoj granici raspoloživosti vode. U tom slučaju, koncept gornje granice raspoloživosti je nešto malo drugačiji: ne pogađa ga obim ljudske potrošnje nego fizički i klimatski čimbenici koji umanjuju tempo, odnosno potencijal nadopunjavanja.

Gornja granica raspoloživosti ekološke vode. Za brojne slivove ozbiljniji problem koji zahtijeva trenutnu pozornost nije nestanak vode nego premašivanje točke eksploatacije vode koje uzrokuje ozbiljnu i nepopravljivu ekološku štetu. Svako zahvaćanje vode za ljudsku upotrebu i potrošnju, smanjuje raspoloživost tog resursa za podršku ekosustavima i umanjuje kapacitet izvršavanja funkcija vode. Voda koja je privremeno prisvojena ili premještena, nekada je održavala na životu druge organizme i staništa. Kako se voda oduzima iz sliva za ljudske potrebe, vrijednost ekoloških funkcija koje ona pruža se smanjuje, a vrijednosti ljudskih usluga zadovoljenih potrošnjom te vode se povećava.

Na određenom nivou te su vrijednosti jednake. Iznad njega, povećano prisvajanje vode dovodi do ekoloških poremećaja preko vrijednosti koju ta povećana količina vode pruža ljudima (pad ekoloških funkcija je veći od rasta vrijednosti za ljude). Tu pojavu definiramo kao gornju granicu raspoloživosti ekološke vode, gdje će društvo maksimizirati ukupne ekološke i ljudske koristi koje pruža voda.

Koncepti o gornjoj granici raspoloživosti vode važni su za pokretanje određenih promjena u potrošnji i upravljanju vodom. Sama spoznaja da postoje ograničenja raspoloživosti obnovljive potrošnje vode prisiljavaju na nove rasprave o poboljšanju učinkovitosti potrošnje vode i razvoj inovativnih tehnologija za tretiranje i ponovnu upotrebu vode kao alternative. Loša vijest je da ubrzano stižemo do granice raspoloživosti vode. Dobra vijest je da prepoznavanje i razumijevanje tih granica može stimulirati inovacije i ponašanje koje će smanjiti potrošnju vode i povećati njezinu produktivnost, mijenjajući politiku vode u smjeru održivije budućnosti vode (Gleick i Palaniappan 2010).

11. LITERATURA

- Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R. A., Merz, B., Arheimer, B., ... & Čanjevac, I. (2017). Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357(6351), 588-590.
- Conti, L., Schmidt-Kloiber, A., Grenouillet, G., & Graf, W. (2014). A trait-based approach to assess the vulnerability of European aquatic insects to climate change. *Hydrobiologia*, 721(1), 297-315.
- Čalogović, J. (2014). Influence of solar activity on Earth's space environment and climate (Doctoral dissertation, Geodetski fakultet, Sveučilište u Zagrebu).
- Čanjevac, I. (2012). Novije promjene protočnih režima u hrvatskom dijelu poriječja Dunava. *Hrvatski geografski glasnik*, 74(1.), 61-74.
- Čanjevac, I. (2013). Tipologija protočnih režima rijeka u Hrvatskoj. *Hrvatski geografski glasnik*, 75(1.), 23-42.
- Döll, P., & Schmied, H. M. (2012). How is the impact of climate change on river flow regimes related to the impact on mean annual runoff? A global-scale analysis. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014037.
- Gleick, P. H., & Palaniappan, M. (2010). Peak water limits to freshwater withdrawal and use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(25), 11155-11162.
- Hoerling, M., Eischeid, J., Perlwitz, J., Quan, X., Zhang, T., & Pegen, P. (2012). On the increased frequency of Mediterranean drought. *Journal of climate*, 25(6), 2146-2161.
- Pyrce, R. (2004). Hydrological low flow indices and their uses. *Watershed Science Centre,(WSC) Report*, (04-2004).
- Schneider, C., Laizé, C. L. R., Acreman, M. C., & Flörke, M. (2013). How will climate change modify river flow regimes in Europe?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 325-339.
- Stilinović, T., Herceg-Bulić, I., & Vučetić, V. (2015). Influence of the winter North Atlantic Oscillation on spring soil temperatures in Croatia. *Hrvatski meteorološki časopis*, 48(48/49), 37-45.
- URL 1: https://www.plantsciences.ucdavis.edu/plantsciences_faculty/bloom/camel/internal.html
- Slika 1: https://www.researchgate.net/figure/European-climate-zones-based-on-information-provided-by-EUCA15000-The-six-highlighted_fig1_277401585
- Slika 2: https://www.researchgate.net/figure/Climate-change-impact-on-the-natural-flow-regime-in-the-2050s-under-the-SRES-A2_fig18_291938256

Slika 3: <https://www.ceh.ac.uk/news-and-media/news/climate-link-european-floods>

Slika 4: Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Merz, B., Arheimer, B., ... & Živković, N. (2017). Supplementary Materials for Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357(6351), 588.

Slika 5: https://www.researchgate.net/figure/Direction-of-change-in-the-2050s-plotted-for-all-grid-cells-of-the-polar-climate-zone_fig23_291938256

Slika 6: https://www.researchgate.net/figure/Direction-of-change-in-the-2050s-plotted-for-all-grid-cells-of-the-boreal-climate-zone_fig24_291938256

Slika 7: https://www.researchgate.net/figure/Direction-of-change-in-the-2050s-plotted-for-all-grid-cells-of-the-temperate_fig25_291938256

Slika 8: https://www.researchgate.net/figure/Direction-of-change-in-the-2050s-plotted-for-all-grid-cells-of-the-temperate_fig26_291938256

Slika 9: https://www.researchgate.net/figure/Direction-of-change-in-the-2050s-plotted-for-all-grid-cells-of-the-temperate-oceanic_fig27_291938256

Slika 10: https://www.researchgate.net/figure/Direction-of-change-in-the-2050s-plotted-for-all-grid-cells-of-the-Mediterranean_fig28_291938256

12. SAŽETAK

Prirodni su protočni režimi rijeka u Europi već bitno izmijenjeni djelovanjem čovjeka: izgradnjom brana, nasipa i kanala, ali također i crpljenjem vode za potrebe stanovništva. Klimatske promjene predstavljaju dodatan rizik. Glavni elementi klime, čije će promjene utjecati na hidrološki ciklus i protočne režime rijeka, su oborine, temperatura i snježni pokrov. Same promjene tih elemenata i njihove posljedice bit će drugačije u pojedinim klimatskim zonama Europe. Najveći stupanj promjene može se očekivati u mediteranskoj i borealnoj klimatskoj zoni, a najmanji u oceanskom dijelu umjerene. Doći će do promjene obujma i vremena javljanja ekstremnih protoka, što će biti bitno za učestalost javljanja i intenzitet riječnih poplava. Očekuje se da će se one u budućnosti povećati kao rezultat daljnjeg ekonomskog rasta i klimatskih promjena. Prosječno vrijeme poplavlivanja u toku godine u Europi se postupno mijenja kako od zapada prema istoku, zbog povećanja udaljenosti od Atlantskog oceana, tako i od juga prema sjeveru, zbog povećanja utjecaja procesa povezanih sa snijegom. U seminarskom je radu za svaku od šest europskih klimatskih zona objašnjeno kako bi tipični protočni režimi mogli izgledati 2050ih pod utjecajem isključivo klimatskih promjena i prikazano hidrogramom reprezentativne rijeke. Klimatske će promjene imati velike posljedice, kako na ekosustave kopnenih voda, tako i na raspoloživost slatke vode za ljudsku upotrebu i neophodno je pažljivo upravljanje vodnim resursima kako bi se te posljedice ublažile.

13. SUMMARY

Natural river flow regimes in Europe have already been heavily modified by different anthropogenic impacts such as damming, embanking, channelization and water withdrawals. Climate change induces an additional risk. The main elements of the climate whose changes will affect the hydrological cycle and river flow regimes are precipitation, temperature, and snow cover. The changes of these elements and their consequences will be different in various European climate zones. The highest degree of change can be expected in the Mediterranean and Boreal climatic zone and the smallest in the temperate oceanic zone. There will be a change in magnitude and timing of extreme flows which will be important for the frequency and intensity of river flooding. It is expected that they will increase in the future as a result of further economic growth and climate changes. Timing of European floods is gradually changing from west to east due to increasing distance from the Atlantic Ocean as well as from the south to the north due to the increasing impact of snow-related processes. In a seminar paper it is explained for each of the six European climatic zones how typical river flow regimes could look like in

2050 under the influence of climate change only and it is demonstrated by the hydrography of each representative river. Climate change will have major consequences both on land and the ecosystems and on the availability of fresh water for human consumption so it is imperative to carefully manage water resources in order to alleviate them.