



Foto: Ivan Majić

# KLIMATSKE PROMJENE I POJAVA POPLAVA

dr. sc. Ivan Güttler

## Uvod

U ovom članku izložen je opći pregled globalnih promjena u hidrološkom sustavu tijekom 20. i 21. stoljeća, s naglaskom na procese vezane za nastanak i posljedice poplava. Namjera članka nije dati sveobuhvatan pregled nego izložiti osnovne informacije vezane za promjene u hidrološkom ciklusu uslijed povećanja antropogenih emisija i atmosferskih koncentracija stakleničkih plinova. Problematika u fokusu ovog pregleda je bitno određena dostupnim mjerenjima. Iako za neke komponente hidrološkog sustava postoji relativno dostatna količina i kvaliteta mjerenja (npr. količina oborine), efekti klimatskih promjena i detekcija trendova je za neke procese otežana zbog nedostatka višegodišnjih i kontroliranih skupova podataka (npr. informacije o broju i intenzitetu poplava u Europi; EEA 2017). Nastanak i posljedice poplava predstavljaju multi-disciplinarni istraživački problem te su ovdje prikazani sažeci re-

lativno novijih istraživanja iz klimatološke perspektive.

## Uzroci promjena u globalnom hidrološkom sustavu

Očekivane i uočene promjene u globalnom hidrološkom ciklusu, kao što su promjene u količini oborine na kopnu te protocima rijeka, općenito su posljedica dva antropogena utjecaja na velikoj prostornoj skali: povećanja emisija stakleničkih plinova i promjene u emisijama aerosola, tj. čestica u atmosferi koje su rezultat različitih ljudskih aktivnosti. Ta dva procesa mogu imati suprotan učinak na energetske i hidrološke bilance. Povećanje temperature zraka zbog porasta količine stakleničkih plinova uzrokuje povećanje količine vodene pare u atmosferi te posljedično i povećanje količina oborine te povećanu učestalost ekstremnih oborina (Endergrass i Hartmann 2014). Za svaki dodatni stupanj globalnog porasta temperature zraka, očekuje se porast maksimalnih količina vodene

*Tijekom 2017. godine dogodio se veći broj ekstremnih oborinskih događaja i poplava na manjim područjima diljem cijelog svijeta (WMO, 2017).*

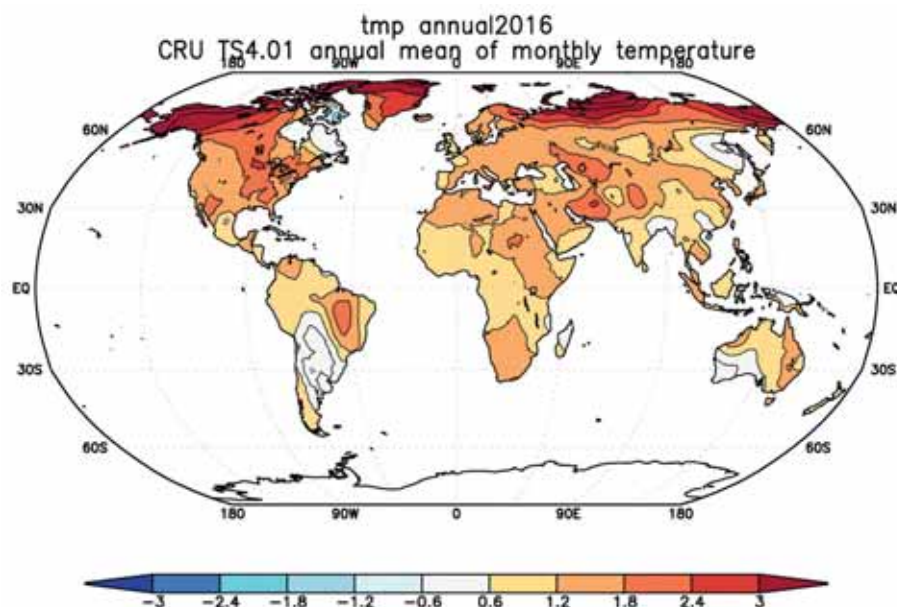
pare u nižim slojevima atmosfere u iznosu od 7 % (npr. Wasko i Sharma, 2017) te porast od 1 % do 3 % srednje globalne količine oborine (Wild 2012, IPCC 2013, Endergrass i Hartmann 2014). S druge strane, opaženo slabljenje u globalnom hidrološkom ciklusu od 1950. do 1990. je većim dijelom povezano s povećanim antropogenim emisijama aerosola (Wu i sur. 2013). Iako utjecaj antropogenih emisija sulfatnih aerosola ima bitnu međudekadsku promjenjivost, porast antropogenih emisija stakleničkih plinova ima izraženu tendenciju porasta, osobito u novijem razdoblju.

Očekivane i uočene promjene u globalnom hidrološkom ciklusu, kao što su promjene u količini oborine na kopnu te protocima rijeka, općenito su posljedica dva antropogena utjecaja na velikoj prostornoj skali: povećanja emisija stakleničkih plinova i promjene u emisijama aerosola.

Iako uz globalno zagrijavanje rastu ukupne i ekstremne količine oborine, za razdoblja kada je utjecaj aerosola manji može se očekivati smanjenje broja kišnih dana zbog tzv. pomaka razdiobe količine oborine prema većim iznosima (Endergrass i Hartmann 2014). No, postoje i iznimke od ovog pravila, tj. povećanje broja kišnih i ekstremno kišnih dana uz smanjenje broja umjerenog kišnih događaja (npr. Rajah i sur. 2014).

Rezultati nedavnih istraživanja također daju uvid o tome da samo za najekstremnije situacije i za manje slivove (npr. površine manje od 1.000 km<sup>2</sup>) postoji direktna veza između porasta temperature zraka, porasta količine oborine te porasta riječnih protoka (Wasko i Sharma, 2017). Veza između porasta temperature i količine vodene pare u atmosferi je očekivana i dokumentirana, veza između porasta temperature i količine oborine je u nekim razdobljima maskirana utjecajem efekta aerosola, dok je najzahtjevnije detektirati direktnu vezu između porasta temperature zraka i promjene u riječnim protocima na globalnoj skali.

Veze između temperature i oborine te temperature i riječnih protoka dobivene pomoću izmjerenih podataka imaju raznolike odnose u prostoru. Na primjer, za više geografske širine je s porastom temperature zraka uočen *porast* količina oborine uz *smanjenje* protoka (Wasko i Sharma 2017). Objašnjenje ovog rezultata je u činjenici da ekstremni oborinski događaji na velikim slivovima rijetko u potpunosti doprinose porastu vodostaja rijeka i

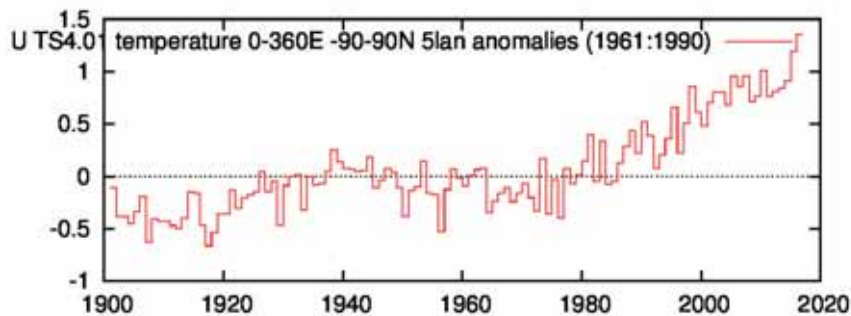


Anomalija srednje godišnje temperature zraka na 2 m (mjerna jedinica °C) u 2016. godini u odnosu na srednjak u razdoblju 1961. – 1990. Izvor podataka: CRU TS 4.01; vizualizacija: <https://climexp.knmi.nl/>; autor materijala: Ivan Güttler

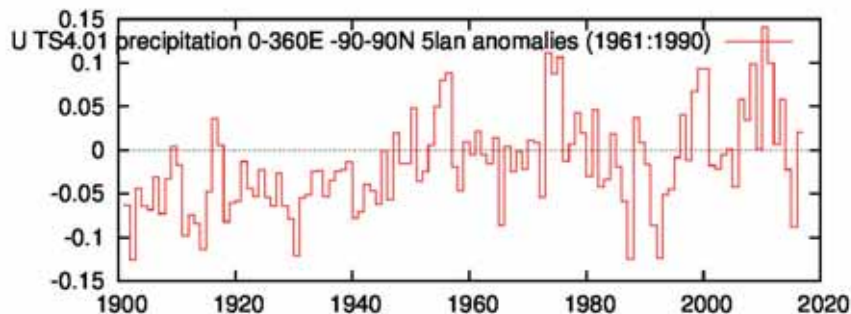
njihovih protoka jer, određene količine oborinskih voda (ovisno o podlozi) odlaze u niže slojeve tla te dijelom isparavaju. Ukoliko su ovi dodatni procesi jednako aktivni i u toplijoj klimi, može se očekivati porast u riječnim protocima. U suprotnom, npr. zbog porasta temperature zraka isparavanje postaje izraženije, a suho tlo je češće u mogućnosti akumuliranja viška oborinskih voda, za očekivati je smanjenje riječnih protoka. I za slivove s manjim utjecajem ljudskih aktivnosti (npr. manje od 10% površine sliva je modificirano te manje od 5% ukupnog godišnjeg protoka je ekstrahirano) vrijede slične veze između temperature zraka, količina oborine i riječnih protoka (Wasko i Sharma, 2017).

Rezultati nedavnih istraživanja također daju uvid o tome da samo za najekstremnije situacije i za manje slivove (npr. površine manje od 1.000 km<sup>2</sup>) postoji direktna veza između porasta temperature zraka, porasta količine oborine te porasta riječnih protoka (Wasko i Sharma, 2017).

Konačno, osim direktne termodinamičke veze između temperature zraka i količine vodene pare u atmosferi, dinamički efekti vezani uz preraspodjelu tipičnih obrazaca strujanja zraka na većim područjima također mogu imati bitnu ulogu u hidrološkom ciklusu, no njihova uloga u toplijoj klimi nije još u potpunosti istražena (Zhang i sur. 2013).



Vremenski niz anomalija globalnog (iznad kopna) srednjaka godišnje temperatura zraka na 2 m (mjerna jedinica °C) odnosu na srednjak u razdoblju 1961. – 1990. Izvor podataka: CRU TS 4.01; vizualizacija: <https://climexp.knmi.nl>; autor materijala: Ivan Güttler



Vremenski niz anomalija globalnog (iznad kopna) srednjaka godišnje količine oborine (mjerna jedinica mm/dan) u odnosu na srednjak u razdoblju na 1961. – 1990. Izvor podataka: CRU TS 4.01; vizualizacija: <https://climexp.knmi.nl>; autor materijala: Ivan Güttler

### Rizik od poplava u 21. stoljeću

Hirabayashi i sur. (2013) su povezali rezultate projekcija desetak globalnih klimatskih modela s detaljnim globalnim modelom za procjenu riječnih protoka i površinu poplavljenih područja. Uz pretpostavku scenarija daljnjeg porasta emisija i koncentracija stakleničkih plinova rezultati njihove studije ukazuju na visoku vjerojatnost povećanja učestalosti poplava u jugoistočnoj Aziji, Indiji, istočnoj Africi i dijelovima Južne Amerike, no također i na mogućnost smanjenja učestalosti poplava u nekim drugim dijelovima Svijeta uključujući dijelove Europe kao što je sliv Dunava. Ipak, autori naglašavaju mogućnost precjenjivanja procjena jer model protoka rijeka nije uključivao antropogene utjecaje kao što su upravljanje akumulacijskim jezerima. Unatoč metodološkim ograničenjima, za porast globalne temperature zraka u iznosu od 2, 4 i 6 °C dobivene su procjene o broju ljudi koji će biti izloženi poplavama i to 27, 62 i 93 milijuna ljudi do kraja 21. stoljeća.

Unatoč metodološkim ograničenjima Hirabayashi i sur. (2013), za porast globalne temperature zraka u iznosu od 2, 4 i 6 °C procjenjuju da će 27, 62 i 93 milijuna ljudi do kraja 21. stoljeća biti izloženi poplavama.

Ranije studije tipa Hirabayashi i sur. (2013) su temeljene na tzv. globalnim klimatskim modelima te su pouzdanije za slivove većih prostornih dimenzija. Kako bi pokušali istražiti moguće klimatske promjene na manjim prostornim skalama, jedan od načina je primjena tzv. regionalnih klimatskih modela. Tako npr., Gampe i sur. (2016) daju procjene utjecaja klimatskih promjena na dostupnost vode u nekoliko europskih slivova, uključujući sliv rijeke Save. Njihove klimatske projekcije za 21. stoljeće (promjene na godišnjoj skali u razdoblju 2035. – 2065. u odnosu na razdoblje 1981. – 2010.) ukazuju na porast srednje temperature zraka, no blago smanjenje u količinama oborine (izraženiji porast zimi i smanjenje ljeti) i smanjenje u isparavanju te površinskom i ukupnom otjecanju, pridonoseći nedostatku vode posebno u južnom dijelu sliva rijeke Save.

### Posljedice poplava

Prema posebnom izvješću Svjetske meteorološke organizacije i suradničkih institucija (WMO, 2014) u razdoblju od 1970. do 2012., u deset atmosferskih nepogoda s najvećim brojem stradalih, ulaze poplave 1999. u Venecueli (30.000 žrtava) i 1974. u Bangladešu (28.700 žrtava). Istovremeno, u deset atmosferskih nepogoda s najvećim financijskim štetama, iz istog razdoblja, ulaze poplave 1998. u Kini (42.25 milijardi USD), 2011. u Tajlandu (40,82 milijardi USD) te 1995. u Sjevernoj Koreji (22,59 milijardi USD). Od ukupno analiziranih 8.835 nepogoda, 44 % događaja se odnosilo na poplave. Od gotovo 2.000.000 ljudskih žrtava, poplave su uzrokovale 14 % svih stradanja, a od ukupno 2.390 milijardi USD, štete od poplava su uzrokovale 33 % svih troškova. Ako se analizira samo Europa, od 1.352 nepogode, 38 % su bile poplave. Od gotovo 150.000 ljudskih žrtava, poplave su uzrokovale stradanja u 3 % slučajeva, a u ukupnim štetama u iznosu od 375,7 milijardi USD, štete od poplava su iznosile 40 % (WMO, 2014).

Od ukupno analiziranih 8.835 nepogoda na globalnoj razini, 44 % događaja se odnosilo na poplave. Od gotovo 2.000.000 ljudskih žrtava, poplave su uzrokovale 14 % svih stradanja, a od ukupno 2.390 milijardi USD, štete od poplava su uzrokovale 33 % svih troškova (WMO, 2014).

Prema izvješću Europske agencije za okoliš (EEA, 2017), iako se broj prijavljenih poplava na području Europe povećao u nedav-

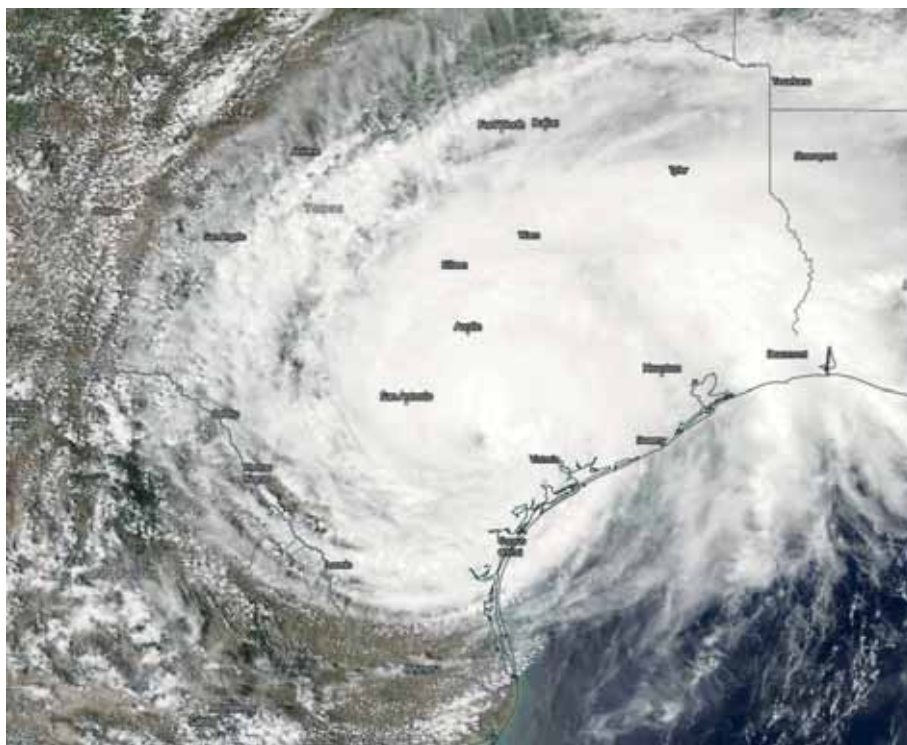
nom razdoblju, zbog izražene međugodišnje varijabilnosti i promjena tijekom vremena u kvaliteti izvještavanja nije moguće u ovom trenutku do kraja razlikovati utjecaj ekstremnih oborinskih događaja i promjena u korištenju tla i površine. Za područje Europe vjerojatna je u budućnost pojava poplava uslijed ekstremnih oborinskih događaja, a u područjima u kojima se očekuje intenzivnije otapanje snijega tijekom zime, raste rizik od poplava u proljetnom razdoblju (EEA, 2017).

Osim rizika poplavlivanja uslijed porasta vodostaja i protoka rijeka, dodatan rizik od poplavlivanja urbanih i naseljenih prostora je prisutan u obalnim područjima. U tim područjima uz generalan porast populacije i ulaganja u infrastrukturu te supsidenciju tla, riziku poplava doprinose i klimatske promjene (Hallegatte i sur. 2013). Osim mogućnosti porasta ekstremnih količina oborine, u obalnim područjima je prisutan proces rasta srednjih razina mora te pojava olujnih uspora. Prema Hallegatte i sur. (2013), na godišnjoj razini su gubici za 136 svjetskih gradova u 2005. iznosili 6 milijardi USD. Bez prilagodbe, Hallegatte i sur. (2013) daju procjenu od više od 1.000 milijardi USD po godini do 2050. Autori naglašavaju da se ovaj iznos ne promatra kao precizna prognoza nego demonstracija mogućnosti izraženih šteta u slučaju izostanka prilagodbe klimatskim promjenama. U slučaju prilagodbe na razine mora uslijed subsidencije i stvarnog porasta razine mora, prilagodba koja za cilj ima zadržavanje konstantne vjerojatnosti poplavlivanja dovodi do srednjih godišnjih gubitaka između 60 i 63 milijardi USD.

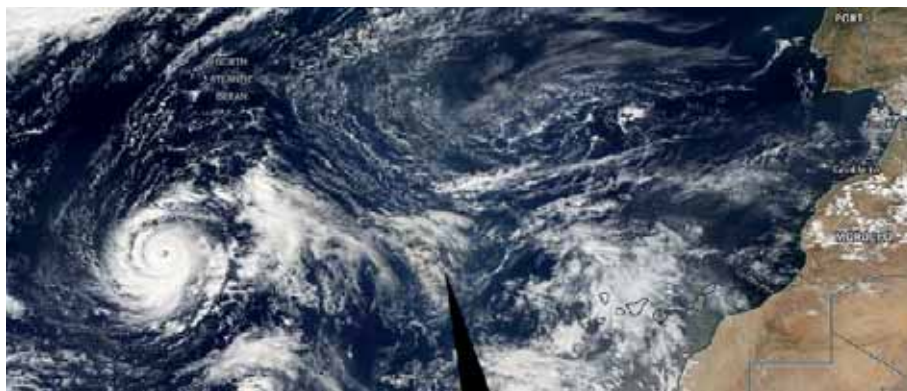
## Zaključak

Prema WMO (2017) priopćenju o stanju globalne klime za 2017. godinu, naglašeni su sljedeći događaji obilježeni izraženijim poplavama: (1) poplave na Indijskom potkontinentu uslijed jake sezone monsunna, (2) poplave na Novom Zelandu u ožujku, travnju te srpnju, (3) aktivno razdoblje tropskih ciklona, itd. Tijekom 2017. godine dogodio se veći broj ekstremnih oborinskih događaja i poplava na manjim područjima diljem cijelog svijeta (WMO, 2017).

Neovisno o klimatskim promjenama, poplave na području riječnih slivova kao i obalno poplavlivanje, će osim visokih financijskih troškova i u budućnosti predstavljati bitan rizik za sigurnost i zdravlje ljudi (EEA, 2017). Nužno je održavanje i nadopuna postojećih sustava za mjerenje svih komponentni hidrološkog sustava, kako bi se osigurala dovoljna kvaliteta i gustoća mje-



Satelitska snimka uragana Harvey na dan 26.8.2017. Mjerenja: Aqua/MODIS; vizualizacija: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>; autor materijala: Ivan Güttler



Satelitska snimka uragana Ophelia na dan 12.10.2017. Mjerenja: Aqua/MODIS; vizualizacija: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>; autor materijala: Ivan Güttler

renja koja je preduvjet za pouzdanu detekciju ekstremnih događaja. Osim toga, za potrebe razumijevanja osnovnih procesa koji dovode do klimatskih promjena i kraćih klimatskih varijacija, nužno je proširiti mrežu mjerenja i mogućnosti modeliranja kao i svih drugih sastavnica klimatskog sustava. Neke od tih mogućnosti istražuju se kroz projekt Hrvatske zaklade za znanost *Klima jadranske regije u njenom globalnom kontekstu* (eng. Climate of the Adriatic Region in its global context – CARE!). ■

<sup>1</sup> <http://www.pmf.unizg.hr/geof/znanost/klimatologija/care>