

CWATM – HIDROLOŠKI MODEL VISOKE RAZLUČIVOSTI ZA INTEGRIRANO UPRAVLJANJE GLOBALNIH I REGIONALNIH VODNIH RESURSA

Hrvoje Herceg, mag.ing.geol.

**Interreg
Danube Region**



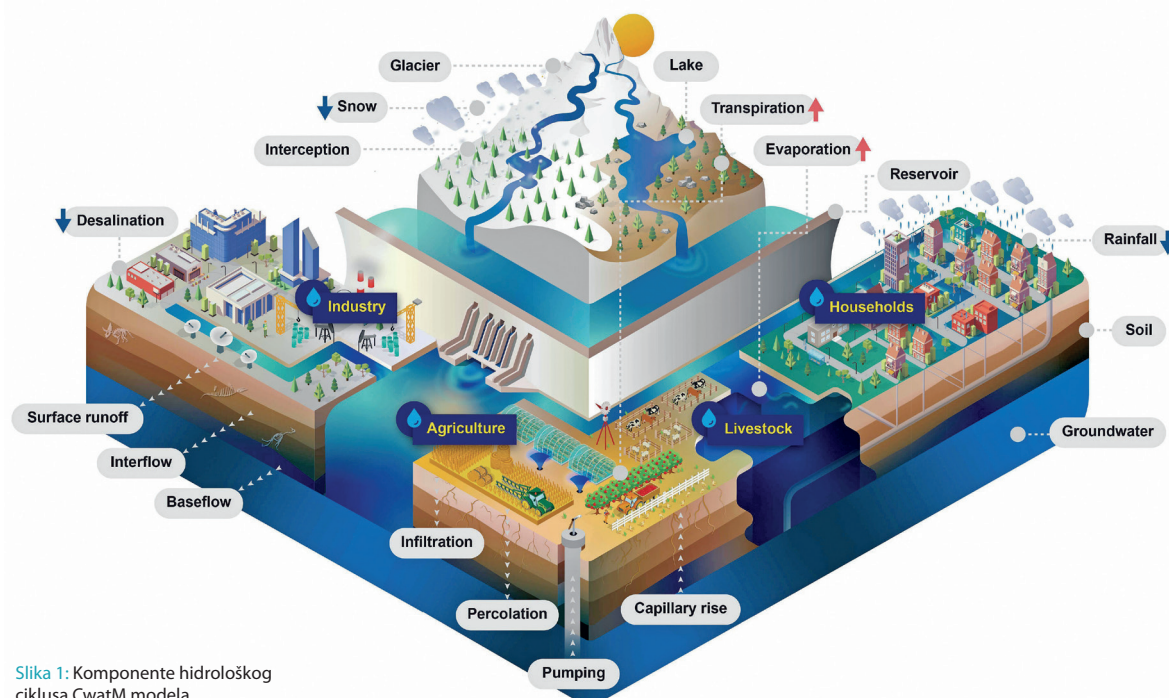
Co-funded by
the European Union

Danube Water Balance

1. UVOD

CwatM (*Community Water Model*) je globalni i regionalni hidrološki model otvorenog koda razvijen za simulaciju dinamike vodnih resursa, s ciljem podrške održivom upravljanju vodnim resursima. Model je osmišljen kako bi integrirao različite hidrauličke procese, uključujući površinske vode, podzemne vode, evapotranspiraciju, infiltraciju i otjecanje, omogućujući sveobuhvatan pregled dostupnosti i korištenja vode. Glavni cilj CwatM modela je omogućiti detaljne simulacije koje pomažu u razumijevanju

utjecaja klimatskih promjena, ljudskih aktivnosti i ekoloških procesa na vodne resurse. Model je koristan za istraživanja vezana uz procjenu rizika od poplava, suša, zagađenja, kao i za planiranje budućih strategija vodoopskrbe, navodnjavanja i upravljanja vodama u urbanim i ruralnim područjima. Jedna od ključnih prednosti CwatM modela je njegova sposobnost integriranja socioekonomskih podataka s podacima o vodnim resursima, što omogućuje procjenu potražnje za vodom u različitim sektorima poput poljoprivrede, industrije i domaćinstava. Ova fleksibilnost čini CwatM relevantnim za širok raspon scenarija s posebnim naglaskom na prilagodbu klimatskim promjenama i održivo upravljanje. CwatM se koristi u akademskim, istraživačkim krugovima kako bi se simulirali potencijalni budući uvjeti i testirale različite strategije upravljanja vodama. Zbog svoje prilagodljivosti CwatM je važan



Slika 1: Komponente hidrološkog ciklusa CwatM modela

alat u procjeni globalne vodne sigurnosti i podržava donošenje odluka temeljenih na podacima.

2. IZRADA MODELA

Interakcija između prirodnih vodnih resursa, klimatskih promjena, socioekonomskih utjecaja, upravljanje vodnim resursima i upravljanje ekosustavima sve je više uključena u proces izrade hidroloških modela. Ljudske intervencije u hidrologiji i upravljanju vodnim resursima esencijalne su za realne simulacije globalnih i regionalnih hidroloških procesa. Kako bi se savladala prepreka postojanja mnogobrojnih regionalnih i globalnih hidroloških modela, razvijen je CwatM model u koji su implementirani mnogi koncepti i pristupi hidrološkom modeliranju. Model je fleksibilne modularne strukture i jedinstvenog globalnog i regionalnog mjerila. Zbog složenih interakcija hidrologije s poljoprivredom, energijom i ekosustavima, očekuje se da hidrološki modeli mogu obuhvatiti te interakcije kao komponente modela. Kako bi se unaprijedio prijelaz s velikih hidroloških modela na preciznije prikazivanje hidroloških procesa, potrebno je stvoriti modeliranje vođeno zajednicom koja omogućuje razmjenu ideja, podataka i rezultata u razumljivim formatima.

Ključne karakteristike CwatM modela su korištenje platforme otvorenog tipa kao način razmjene ideja i razvoja koda te fleksibilna modularna struktura koja omogućuje povezivanje s drugim sektorskim modelima, poput modela korištenja zemljišta, poljoprivrede i energetike. CwatM model povezan s već postojećim najsuvremenijim modelima kao što su energetska model MESSAGE, modelom korištenja zemljišta i ekosustava GLOBIOM, modelom kvalitete vode MARINA i hidrokemijskim modelom ECHO. CwatM sustav modela napisan je u Pythonu 3.7 uz nekoliko dodatnih paketa kao što su numpy, scipy, gdal i netCDF4

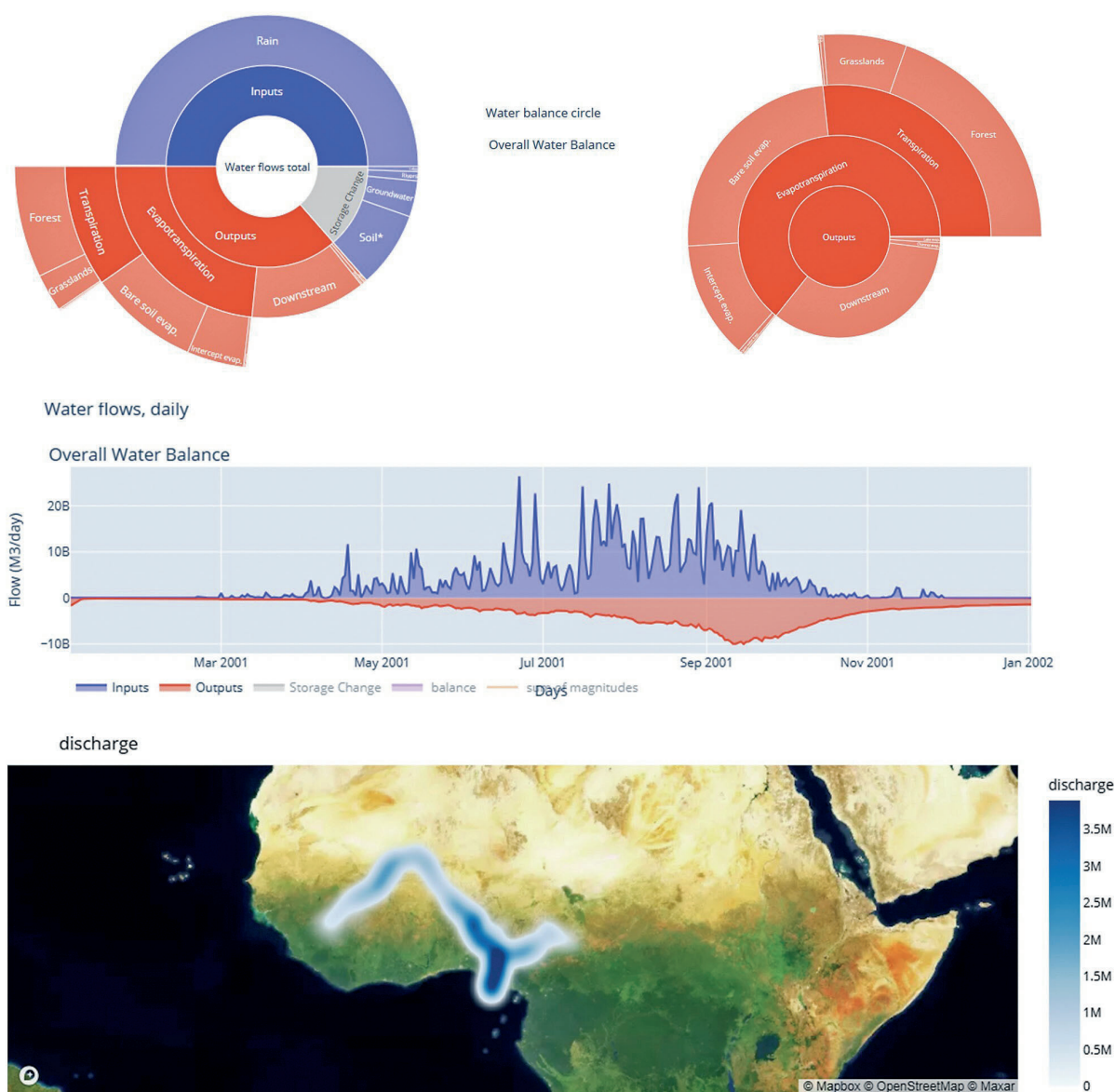
koji imaju mogućnosti biti korišteni na različitim operativnim sustavima. Razvoj modela fokusiran je na izradi fleksibilne arhitekture i prikazivanje cjelokupnog hidrološkog modela kojim bi se omogućilo računanje dostupnosti vodnih resursa. Model može biti izrađen u više različitih rezolucija od 1 do 50 km s dnevnim podacima za različite namjene od globalnih do regionalnih procjena. Za izradu CwatM modela koristi se širok spektar podataka koji pokrivaju hidrauličke, klimatske, geografske i socioekonomske aspekte. Skupovi podataka omogućuju preciznu simulaciju dinamike vodnih resursa i procjenu dostupnosti, potražnje te utjecaja na vodne resurse. Ključni podaci koji se koriste za izradu CwatM modela.

Ovi podaci zajedno omogućuju CwatM modelu simuliranje složene interakcije između prirodnih sustava, ljudske aktivnosti i klimatskih promjena te daje precizne procjene budućih uvjeta u vezi s vodnim resursima. Rezultati CwatM modela su vrlo detaljni i pružaju različite informacije o dinamici vodnih resursa. Oni mogu biti predstavljeni u obliku tablica, grafikona, karata i drugih vizualizacija koje olakšavaju razumijevanje vodnih tokova, promjena u razini vode te raspodjele i potražnje za vodom.

Model ima mogućnost izrade simulacije protoka rijeka tijekom vremena, prikazujući kako se količina vode mijenja u različitim periodima i pod različitim klimatskim uvjetima. Uz površinske obrađuju se i podzemne vode, odnosno model može prikazati kako razina podzemne vode varira u vremenu i prostoru, što je ključno za procjenu dostupnosti podzemnih resursa. Rezultati se mogu koristiti za praćenje sniženja razine podzemne vode u sušnim razdobljima. Isto tako, model može simulirati i ukupne oborine po regijama i daje podatke o količini padalina u različitim sezonama. Podaci o oborinama često se prikazuju u obliku toplinskih karata.

Tablica 1: Pregled podataka za izradu CwatM modela

Hidrološki podaci	Hidrografska mreža
	Jezera, akumulacije i retencije
Podaci o podzemnim vodama	Hidrogeološke karakteristike vodonosnika
	Podaci o razinama podzemnih voda
Klimatski podaci	Dnevne ili mjesečne vrijednosti temperature zraka
	Evapotranspiracija
	Oborine: količina i distribucija oborina u vremenu
	Vjetar i vlažnost zraka
Geografski podaci	Digitalni model terena (DEM)
	Tipovi tla
	Informacije o korištenju zemljišta
Socioekonomski podaci	Podaci o broju stanovnika i gustoći naseljenosti
	Industrijska i poljoprivredna aktivnost
	Infrastruktura vodnog gospodarstva
Ekološki podaci	Vodeni ekosustavi (rijeke, močvare, jezera)
	Podaci o zaštićenim područjima



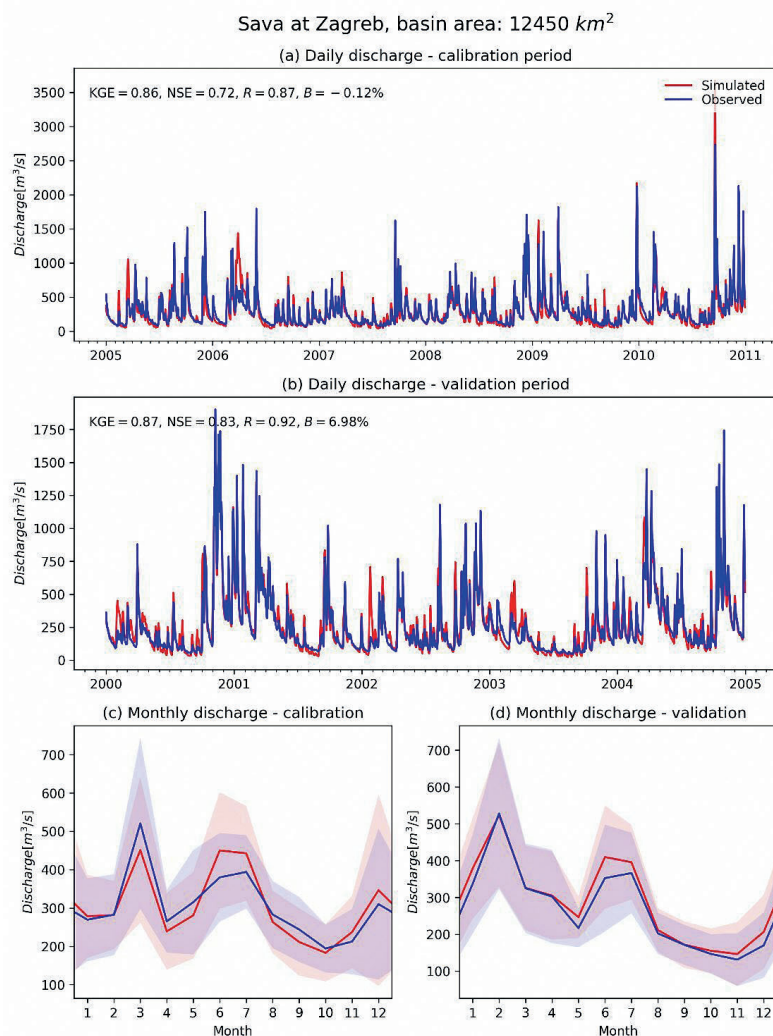
Slika 2: Prikazivanje rezultata CWatM modela u formatu infografika, dijagrama i karata

CwatM također prikazuje količinu vode u hidrološkom ciklusu koja se koristi u procesima transpiracije i evaporacije, odnosno ukupne evapotranspiracije. Ovi podaci važni su za procjenu vodnih gubitaka i dostupnosti u različitim ekosustavima. Model prikazuje i distribuciju i potrošnju vode po različitim sektorima te kako se potrošnja mijenja tijekom vremena. CwatM može generirati simulacije za buduće klimatske scenarije, pokazujući kako bi se vodni resursi mogli promijeniti uslijed globalnog zagrijavanja, promjena u oborinama i ekstremnim vremenskim uvjetima. Karte koje prikazuju kako će se distribucija vode promijeniti u narednim desetljećima, što omogućuje izraživačima planskih dokumenata i donositeljima odluka bolju pripremu za klimatske promjene. Rezultati mogu pokazati ukupnu količinu vode koja ulazi u sustav (oborine), količinu vode

koja izlazi (isparavanje, otjecanje) i neto bilancu vode u određenom području. Ovakvo bilanciranje pomaže u razumijevanju dostupnosti vode i potencijalnih nedostataka. U modelu mogu biti integrirani i socioekonomski podaci koji bi pokazali kako promjene u populaciji, industriji ili poljoprivredi mogu utjecati na potražnju za vodom.

3. KALIBRACIJA CWATM MODELA

Jedan od glavnih razloga kalibracije modela je nepouzdanost ulaznih podataka, parametara, heterogenosti ćelija mreže modela, prvenstveno na nižim rezolucijama. Kalibracija CwatM modela je ključan korak u osiguravanju točnosti i pouzdanosti simulacija koje model generira. Kalibracija podrazumijeva prilagođavanje modela tako da simulirani rezultati



Slika 3: Grafički prikaz rezultata kalibracije CWatM modela

što bolje odgovaraju stvarnim podacima o vodnim resursima. Proces kalibracije CWatM modela uključuje nekoliko koraka i korištenje različitih vrsta podataka, a sve u cilju optimizacije parametara modela. Postupak kalibracije zahtijeva korištenje povijesnih i aktualnih podataka o vodnim resursima, koji se uspoređuju. Za kalibraciju CWatM modela koristi se modificiran model efikasnosti Kling-Gupta kojim je r vrijednost definirana kao korelacijski koeficijent između mjerenih i simuliranih protoka. Kalibracija zahtijeva korištenje povijesnih i aktualnih podataka o vodnim resursima, koji se uspoređuju sa simulacijama modela. CWatM model ima niz parametara koji utječu na simulaciju dinamike vode, poput infiltracije, evapotranspiracije, protoka rijeka i korištenja vode. U procesu kalibracije, ovi parametri se iterativno prilagođavaju kako bi se postiglo što bolje slaganje između simuliranih i stvarnih podataka. Ključni parametri koji se podešavaju uključuju koeficijent otjecanja koji ovisi o tipu tla i vegetaciji, infiltraciji i evapotranspiraciji, te hidrogeološkim karakteristikama vodonosnika. Nakon prilagodbe parametara, uspoređuju se rezultati modela sa stvarnim podacima

protoka rijeka koji se uspoređuju sa simuliranim podacima. Ukoliko simulacije odgovaraju stvarnim podacima protoka u različitim vremenskim razdobljima, model se smatra dobro kalibriranim. Nakon što je model kalibriran, slijedi proces validacije, gdje se model koristi na novim podacima (koji nisu korišteni u fazi kalibracije) kako bi se testirala njegova sposobnost predviđanja.

4. DANUBE WATER BALANCE INTERREG PROJEKT

Sliv rijeke Dunav jedno je od najvažnijih hidroloških područja u Europi, koje dijeli 19 zemalja, pri čemu neke zemlje imaju samo mali udio u slivu (npr. Švicarska, Poljska, Sjeverna Makedonija, Crna Gora, Albanija i Italija). Suradnja između susjednih zemalja poboljšat će mogućnosti sveobuhvatnog modeliranja vodne bilance na razini cijelog sliva, što će predstavljati važan alat za planiranje vodnih resursa i izradu akcijskih planova za ublažavanje klimatskih promjena. Projekt Danube Water Balance usmjeren je na razvoj i harmonizaciju sustava modeliranja vodne bilance u slivu rijeke

Dunava. Pokrenut 1. siječnja 2024., projekt obuhvaća 20 projektnih i 13 pridruženih partnera iz zemalja sliva, s ciljem postizanja održivog i integriranog upravljanja vodnim resursima. S ukupnim budžetom više od 3 milijuna eura, DWB teži uspostaviti zajednički pristup proračunu vodne bilance, što je ključno za razumijevanje glavnih komponenti vodnog ciklusa. Tri su glavna cilja projekta, a to su poboljšano upravljanje podacima za sadašnje i buduće izračune bilance vode koje će se sastojati od (i) repozitorija podataka za sve ulazne i izlazne podatke modela, (ii) skupa alata koji podržavaju prikupljanje ulaznih podataka, validaciju, pretvorbu i vizualizaciju i interpretaciju rezultata i (iii) novu strategiju upravljanja podacima koja pruža čvrstu osnovu za aktivnosti povezane s podacima za buduće modeliranje bilance vode i upravljanja vodama. Repozitorij podataka i alati bit će otvorenog pristupa, stoga se popis korisnika proteže od stručnjaka za vode koji koriste razvijeni model preko stručnjaka iz drugih područja povezanih s vodama do donositelja odluka voljnih razumjeti glavne karakteristike Dunavskog vodnog područja kao hidrološkog sustava. Budući da projekt ima za cilj razvoj zajedničkog rješenja za modeliranje vodne bilance,

nužno je osigurati ujednačenu bazu podataka s fizičkim parametrima modela i graničnim uvjetima za kalibraciju i validaciju modela, uz harmonizirane skupove podataka za sve korisnike i dionike projekta.

5. ZAKLJUČAK

Zaključno, CwatM (*Community Water Model*) predstavlja važan alat za razumijevanje složenih vodnih sustava na globalnoj i regionalnoj razini koji koristi besplatne i javno dostupne podatke. Njegova otvorena platforma omogućava zajednici znanstvenika, istraživača i donositelja odluka da zajedno razvijaju i unapređuju modele vodnih resursa. S obzirom na sve izraženije izazove poput klimatskih promjena, rasta populacije i promjena u korištenju zemljišta, CwatM pomaže u predviđanju i planiranju učinkovitijeg upravljanja vodom. Ovaj model nudi detaljan pregled hidroloških procesa, od poplava do suša, te pomaže u oblikovanju politika koje osiguravaju održivu uporabu vodnih resursa. Njegova dostupnost i fleksibilnost čine ga ključnim sredstvom za rješavanje trenutnih i budućih izazova u vodenim ekosustavima. ■

LITERATURA

Burek, P.; Smilovic, M.; Satoh, Y.; Kahil, T.; Guillaumot, L.; Tang, T.; Wada, Y. 2019. Community Water Model (CwatM) (Version v1.04). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3361478>.

Burek, P.; Smilovic, M.; Satoh, Y.; Kahil, T.; Tang, T.; Grave, P.; Guillaumot, L.; Zhao, F.; Wada, Y. 2020. Development of the Community Water Model (CWatM v1.04) – a high-resolution hydrological model for global and regional assessment of integrated water resources management. *Geosci. Model Dev. Discuss.* <https://gmd.copernicus.org/articles/13/3267/2020/>.

Burek, P.; Smilovic, M.; Guillaumont, L.; Bruijn, J.; Grave, P.; Satoh, Y.; Islaam, A.; Virgen-Urcelay, A.; Tang, T.; Kahil, T.; Wada, Y. 2020. Community Water Model CWatM Manual. International Institute for Applied Systems Analysis IIASA.

Wada, Y. 2016. Modeling Groundwater Depletion at Regional and Global Scales: Present State and Future

Prospects. *Surv. Geophys.* <https://doi.org/10.1007/s10712-015-9347-x>.

Wada, Y.; Bierkens, M. F. P.; de Roo, A.; Dirmeyer, P. A.; Famiglietti, J. S.; Hanasaki, N.; Konar, M.; Liu, J.; Müller Schmied, H.; Oki, T.; Pokhrel, Y.; Sivapalan, M.; Troy, T. J.; van Dijk, A. I. J. M.; van Emmerik, T.; Van Huijgevoort, M. H. J.; Van Lanen, H. A. J.; Vörösmarty, C. J.; Wanders, N.; Wheeler, H. 2017. Human–water interface in hydrological modelling: current status and future directions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* <https://doi.org/10.5194/hess-21-4169-2017>.

Wada, Y.; Flörke, M.; Hanasaki, N.; Eisner, S.; Fischer, G.; Tramberend, S.; Satoh, Y.; van Vliet, M. T. H.; Yillia, P.; Ringler, C.; Burek, P.; and Wiberg, D. 2016. Modeling global water use for the 21st century: the Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. *Geosci. Model Dev.* <https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016>.