

Universitatea Babeș-Bolyai din Cluj-Napoca
Facultatea de Geografie
Departamentul de Geografie Fizică și Tehnică
Școala Doctorală de Geografie

TEZĂ DE DOCTORAT

-Rezumat-

**Modelarea unui sistem suport de decizii spațiale pentru
controlul proactiv al inundațiilor aval de barajul
acumulării Firiza în relație cu viiturile afluențe din amonte**

Conducător doctorat

Prof. univ. dr. Dănuț PETREA

Doctorand

Daniel Andrei SABĂU

CLUJ-NAPOCA

2024

CUPRINS

1. INTRODUCERE.....	2
1.1. Scopul și obiectivele cercetării	4
2. STADIUL CERCETĂRILOR LA NIVEL NAȚIONAL ȘI INTERNAȚIONAL.....	5
3. BAZINUL HIDROGRAFIC FIRIZA	8
3.1. Arealul de studiu și context	8
4. CONSTITUIREA BAZEI DE DATE.....	11
5. METODOLOGIA CERCETĂRII.....	12
6. REZULTATELE CERCETĂRILOR ȘI DISCUȚII	21
6.1. Calibrarea modelului și verificarea lui prin modelarea unor viituri istorice	21
6.2. Aplicație pentru prognoza viiturilor	24
6.3. Discuții	26
CONCLUZII.....	32
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....	33

1. INTRODUCERE

Inundațiile sunt unul dintre cele mai semnificative hazarde hidrologice, având în vedere potențialul de pierdere de vieți și impactul socio-economic catastrofal (Jonkman & Vrijling 2008). În ultimul deceniu, frecvența inundațiilor a crescut din cauza creșterii populației și a schimbărilor climatice la nivel mondial (Pagano et al., 2014; Tol, 2016; Zhang et al., 2018; Wijayarathne et al., 2021). În România, țară predispusă la inundații (Figura 1), între 1960 și 2010, au avut loc aproximativ 400 de inundații majore, înregistrând 237 de victime (IGSU 2016). Viiturile rapide sunt responsabile pentru mai multe decese pe teritoriul României decât orice alt fenomen legat de furtunile convective (Stancalie et al. 2008). Viiturile rapide pot fi declanșate atunci când o cantitate mare de ploaie cade într-o anumită locație într-o perioadă scurtă de timp. Ploaia torențială este cheia declanșării viiturilor rapide, dar drenajul și topografia zonei înconjurătoare determină amploarea și impactul (Stancalie et al., 2008). În ultimii câțiva ani, inundații urbane semnificative, cum ar fi cele provocate de viitura rapidă din 5 martie 2001 la Baia Mare, au crescut cererea de măsuri de atenuare a inundațiilor în România (Sabău et al., 2020).

Măsurile standard de apărare împotriva inundațiilor sunt împărțite în două categorii principale: măsuri structurale și nestructurale (Thampapillai & Musgrave, 1985; Wijayarathne et al., 2021). Prognoza inundațiilor și pre-avertizările sunt recunoscute ca fiind cele mai importante metode nestructurale de reducere a daunelor provocate de inundații (Basawan, 1980; Sabău et al., 2022;). Un sistem de prognoză a inundațiilor care poate furniza previziuni precise și fiabile cu un timp adecvat este o parte critică a managementului nestructural al inundațiilor (Wijayarathne et al. 2021; Unduche et al., 2018; Sabău et al., 2022b). Potrivit Națiunilor Unite, pagubele provocate de inundații pot fi reduse cu până la 35% dacă o inundație este prognozată în mod adecvat în avans (Pilon et al., 2004). Diverse sisteme de prognoză a inundațiilor cu complexități diferite sunt utilizate în întreaga lume pentru a prognoza viiturile. Sistemul comunitar de prognoză hidrologică (CHPS) în Statele Unite, Sistemul european de prognoză a inundațiilor (EFFS) în Europa, Sistemul național de prognoză și modelare hidrologică (RONHFMS) și Sistemul de estimare a riscului de producere a viiturilor rapide în România (ROFFG) (Mătreța et al., 2013; Ioana et al., 2020; Adams et al., 2023) sunt câteva dintre exemple. Modelele hidrologice și hidraulice sunt componente critice ale unor astfel de sisteme de prognoză a inundațiilor (Teal & Allan, 2017).

Abordările de modelare hidrologică și hidraulică au fost utilizate pentru a prognoza debitul afluent în lacurile de acumulare cu scopul de optimizare a exploatării barajelor de-a lungul deceniilor (Che & Mays, 2015; Leach et al., 2018; Wijayarathne & Coulibaly, 2020; Awol, 2020; Wijayarathne et al. 2021; Dunea et al., 2023). Aceste modele reprezintă diferite procese sau fenomene din ciclul hidrologic, cum ar fi precipitațiile, evapotranspirația (Talebmorad et al., 2020), infiltrarea, interceptia și scurgerea, folosind un set de parametri ai modelului (Sabău et al., 2022b). Modelele hidrologice simulează scurgerea de suprafață concentrată folosind intrări precum precipitațiile, temperatura, umiditatea solului (Devia et al., 2015). Modelele de simulare a exploatării lacurilor de acumulare utilizează rezultatele modelelor hidrologice pentru optimizarea exploatării (Aksoy et al., 2016). Dintre toate aporturile meteorologice, precipitațiile sunt inputul principal pentru modelele hidrologice (Ye et al., 2013; Ioana et al. 2020; Cho, 2020; Sabău et al. 2022b). Prin urmare, eficiența sistemelor de prognoză a inundațiilor în care sunt încorporate modele hidrologice și hidraulice este determinată în principal de acuratețea și fiabilitatea intrărilor de precipitații (Pappenberger & Buizza, 2009; Wetterhall et al., 2011).

În modelarea hidrologică la scară de bazin, intrările necesare ale caracteristicilor bazinului hidrografic (adică altitudinea, utilizarea terenului, solul etc.) și datele despre precipitații sunt ușor disponibile pe diferite site-uri web publice, inclusiv Administrația Națională Oceanică și Atmosferică (NOAA), Serviciul Național de Meteorologie (NWS) și Serviciul de Previzii Hidrologice Avansate (AHPS) din SUA, care furnizează date despre precipitații detectate de la distanță, cum ar fi radarul de supraveghere meteorologică – 1988 Doppler (WSR-88D) care utilizează radarul de generație următoare (NEXRAD) estimări cantitative ale precipitațiilor (Q.P.E) pentru prognozele meteo și viituri rapide etc. (NOAA 2020a, NOAA, 2020b; Cho, 2020). NEXRAD oferă oportunități excelente de simulare a proceselor modelelor hidrologice, permițând utilizarea precipitațiilor distribuite spațial bazate pe grid în loc de observații punctiforme de la pluviometre, folosind o reprezentare mai realistă a distribuției lor spațiale (Cho, 2020; Kull & Feldman, 1998; Peters & Easton, 1996).

După inundațiile severe din anii '70, România a început să investească masiv în infrastructura de protecție împotriva lor și a creat un sistem de gestionare a hazardelor generatoare de inundații. Acesta include diguri, dar și acumulări permanente și nepermanente laterale de vârf, derivații și noduri hidrotehnice. În momentul de față, întârzierea lucrărilor de mentenanță, precum și incidența barajelor nesigure din punct de vedere structural, care trebuie să funcționeze la niveluri cu mult sub cele de proiectare, pentru a garanta siguranța populației

din aval, reprezintă două dintre problemele majore cu care se confruntă sistemul de gospodărire a apelor din România (GBM, 2018).

Întrucât România este un teritoriu cu o densitate relativ mare a populației (predominant urbană) care trăiește în aval de importante lacuri de acumulare cu funcții complexe (Figura 1) și s-a dezvoltat în principal pe baza proximității de alimentări cu apă, asigurând în același timp protecția împotriva inundațiilor, necesitatea implementării globale a unui sistem suport de decizie (S.S.D) este extrem de importantă (Sabău et al., 2022b). Următorul pas pentru România va fi implementarea unui sistem integrat de gospodărire a apei. Până în prezent, au fost efectuate o serie de studii privind dezvoltarea sistemelor suport de decizie (S.S.D) pentru diferite bazine din România (Anderson et al., 2004; Adler et al., 2006; Popescu et al., 2012; Rață et al., 2016).

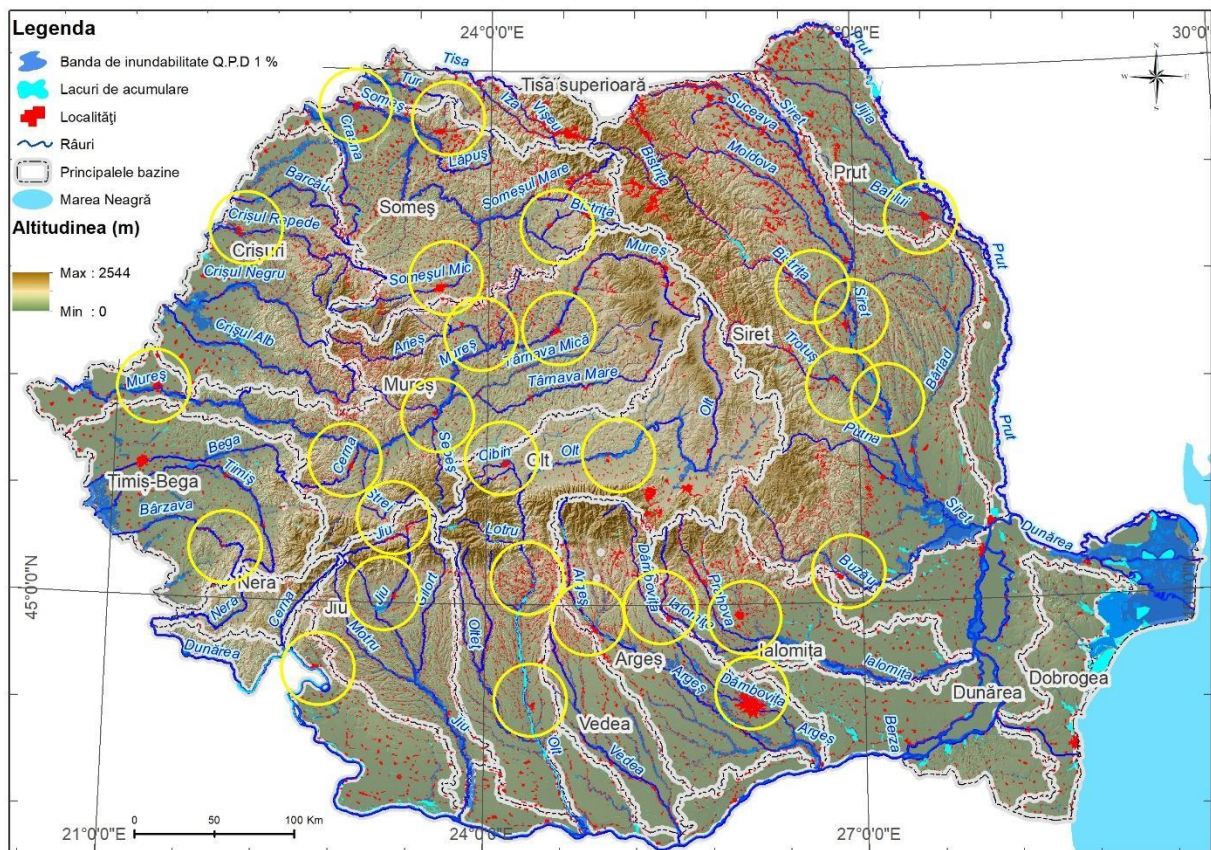


Figura 1. Localizarea principalelor aglomerări urbane românești în aval de lacuri de acumulare cu funcții complexe, raportate la banda de inundabilitate cu probabilitatea de depășire medie 1%, zone predispușe la inundații (sursa: ANAR, 2023) (adaptare după Sabău et al., 2022b)

1.1. Scopul și obiectivele cercetării

Acest studiu își propune să dezvolte și să adapteze noi metodologii care să servească drept fundament pentru un nou model hidrologic distribuit, o componentă esențială a unui Sistem Suport de Decizii Spațiale (SSDS) care integrează GIS cu aplicații hidraulice și hidrologice. Obiectivele principale sunt următoarele: (1) să investigheze capacitatea modelării hidrologice care integrează prognozele cantitative ale precipitațiilor (QPF) și prognozele ansamblului de precipitații (EPF) pentru prognoza viiturilor și (2) să demonstreze adecvarea predicției debitului pentru optimizarea exploatării lacului de acumulare, folosind HEC-ResSim și intrările asociate modelului hidrologic. În acest scop, a fost dezvoltat un model hidrologic distribuit și utilizat pentru simularea unui scenariu de prognoză a precipitațiilor. Este propusă o metodologie pentru dezvoltarea modelului distribuit și aplicarea precipitațiilor grid în cadrul modelului HEC-HMS în afara regiunilor acoperite de sistemul de coordonate Hydrologic Rainfall Analysis Project (HRAP) și grid hidrologic standard (SHG). Este descris procesul de adaptare a metodologiilor de prelucrare a precipitațiilor, a pierderilor și a parametrilor de transformare a scurgerii pentru un bazin românesc. Modelul a fost calibrat folosind debitele observate de la stația hidrometrică Firiza, în perioada 21 iulie–4 august 2017, 7–21 martie 2018, atât pentru perioadele umede, cât și pentru perioadele uscate. EPF-uri cu rază medie au fost utilizate pentru prognoza debitului afluent în acumulare. Optimizarea evacuărilor din lac prin uvrajele barajului a fost examinată în diferite scenarii de optimizare folosind prognoza debitului afluent pe 10 zile. Rezultatele fiecărei alternative de prognoză au fost comparate cu valorile măsurate și au fost utilizate ca debit afluent pentru exploatarea lacurilor de acumulare și scenariile de cartografiere a inundațiilor. Metodologia elaborată a fost aplicată pentru Barajul Strâmători (NV România), pentru a evidenția provocările și posibilele soluții pentru exploatare în timpul unei viituri majore care a avut loc în anul 2001. Sunt prezentate avantajele utilizării noii metodologii adaptate contextului românesc pentru optimizarea exploatării lacurilor de acumulare din România.

2. STADIUL CERCETĂRILOR LA NIVEL NAȚIONAL ȘI INTERNĂȚIONAL

În mod convențional, precipitațiile areale sunt estimate prin folosirea metodelor de mediere (de exemplu, poligonul Thiessen, etc.) a datelor punctuale tradiționale de la posturile pluviometrice. Această metodă a fost utilizată pe scară largă pentru simularea procesului de

precipitare-scurgere într-un bazin hidrografic deoarece implică o procedură relativ simplă în comparație cu procesarea complicată a datelor asociată cu datele grid bazate pe radar (Sabău et al., 2022b).

Cu toate acestea, din cauza eterogenității precipitațiilor pe un spectru larg de scări spațio-temporale, observațiile pluviometrice reprezintă cel mai adesea doar condițiile locale și pot duce la erori potențiale atunci când sunt interpolate la scări mai mari, în special în zonele ce prezintă teren complex (Michaelides, 2019; Cho, 2020). Astfel, distribuția spațială a precipitațiilor nu este reprezentată în mod corespunzător, chiar dacă există date de pluviometru in situ, deoarece precipitațiile pot prezenta o eterogenitate extremă la scara bazinului hidrografic, cu spații în care se înregistrează ploi torențiale, în timp ce în altele nu se înregistrează valori în timpul multor astfel de manifestări. Utilizarea datelor de la pluviometre provoacă, de asemenea, dificultăți în ceea ce privește simularea precisă a proceselor de precipitație scurgere și calibrarea modelelor hidrologice la scara bazinului hidrografic, deoarece trebuie utilizate ipoteze sau parametri suplimentari pentru potrivirea debitelor observate și simulate (Cho & Engel, 2016; Cho et al., 2018; Cho, 2020). Apar diferențe substanțiale între simulările bazate pe precipitații distribuite pe grid față de precipitațiile mediate spațial, dacă o furtună are o variabilitate spațială marcată, așa cum este cazul unei furtuni convective localizate (Zhang et al., 2004; Cho, 2020). Prin urmare, trebuie dezvoltat un model hidrologic care să permită utilizarea precipitațiilor cu rezoluție spațio-temporală înaltă bazată pe radar și implementarea de simulări precipitație scurgere distribuite spațial, pentru a obține avantajul calculelor de debit cu date adecvate de rezoluție spațială temporală și fină (Cho, 2020).

HEC-HMS a fost aplicat cu succes pe scară largă pentru analiza viiturilor rapide în regiunile muntoase din întreaga lume (Xin et al., 2019; Yuan et al., 2019). Mai mulți autori au încercat să implementeze un model hidrologic de prognoză a scurgerii în bazinele lacurilor de acumulare, care să fie utilizat ca prim modul pentru un viitor S.S.D care vizează reducerea riscului de inundații în aval de baraje (Haberlandt, 2010; Yavuz et al., 2012; Şensoy et al., 2016; Srinivas et al., 2017). Printre multe modele hidrologice, HEC-HMS a evoluat pentru a aborda datele de precipitații bazate pe radar pentru modelarea unui bazin hidrografic la nivel de grid folosind software-ul asociat de procesare a datelor, inclusiv HEC-GeoHMS, HEC-DSSVue și HEC-GridUtil cu tehnici avansate (USACE, 2009; USACE, 2011; Cho 2020). Deși limitate, au fost făcute mai multe aplicații pilot folosind QPE-uri NEXRAD pentru râul

Salt, râul Illinois și râul Muskingum din SUA (Kull et al., 1996; Peters & Easton, 1996; USACE, 1996a; USACE, 1996b; Kull & Fledman, 1998; Cho 2020).

În toate cazurile menționate mai sus, algoritmul ModClark, o versiune modificată a hidrografului unitar Clark (Clark, 1945; Cho, 2020) dezvoltat de HEC (USACE, 1995a), a fost adaptat pentru precipitații distribuite spațial. Acest model Clark distribuit a fost adoptat și în multe alte studii cu HEC-HMS (Anderson et al., 2002; Saleh et al., 2016; Yoo et al., 2016; Shakti et al., 2019; Cho 2020; Sabău et al., 2022b). Pentru aplicațiile de date privind precipitațiile în format grid, Shakti et al. (2019) și Cho (2020) au utilizat QPE-urile radar regionale, în timp ce Pappenberger și Buizza (2009), Ye et al. (2013), Saleh et al. (2018) și Haiden et al. (2019), respectiv, au cuplat modelul atmosferic al *Centrului European de Prognoze Meteorologice pe Interval Mediu* (ECMWF).

În România, în principal din cauza constrângerilor descrise, s-au făcut doar eforturi limitate pentru evaluarea influenței precipitațiilor asupra scurgerii de suprafață și acestea includ simularea simplă cu modelul HEC-HMS concentrat ori cel semi distribuit pe subbazine a unor evenimente extreme singulare din trecut de autori precum Gyori și Haidu (2011), Gyori et al., (2013), Haidu și Ivan (2016), etc. Până la acest studiu, metoda distribuită ModClark, a fost utilizată foarte puțin în România, de către autori precum Chitu et al. (2016); Sabău et al. (2020, 2022b) etc.

Utilizarea directă a acestor seturi de date distribuite spațial (adică, QPE-uri bazate pe radar, produse de rețea ECMWF) în aplicații hidrologice, cum ar fi HEC-HMS, nu este lipsită de provocări, din cauza cerințelor pentru o înțelegere aprofundată a sistemului de hărți radar a precipitațiilor și a georeferențării. În SUA setul de date NEXRAD (QPEs) bazat pe rețeaua radar Doppler de supraveghere meteorologică (WSR-88D), adoptă sistemul de coordonate Hydrologic Rainfall Analysis Project (HRAP), pentru a defini locația fiecărei valori estimate a precipitațiilor, Reed și Maidment (1999), Cho (2020). Autorii au dezvoltat o metodă proprie pentru transformarea celulelor grid HRAP într-un sistem de coordonate utilizat în mod obișnuit pentru cartografierea datelor din sistemul de informații geografice (GIS), pentru a efectua modelări hidrologice HEC-HMS cu precipitații grid și alte produse geospațiale. Ulterior a fost dezvoltat un grid hidrologic standard (SHG), al cărui sistem de hărți este realizat prin proiecția cu arii egale Albers. În mod similar, Xie et al. (2005) au introdus, de asemenea, abordări automate de procesare a datelor de precipitații NEXRAD Etapa III pentru integrarea și vizualizarea datelor bazate pe GIS folosind sistemul de coordonate standard (Cho, 2020). Cu toate acestea, procesarea datelor pentru obținerea intrărilor de precipitații grid

pentru aplicațiile HEC-HMS, este încă o provocare, deoarece poate implica dezvoltarea de programe (sau script-uri) de computer bazate pe utilizator. Acest lucru poate face ca modelul HEC-HMS să aibă utilizare limitată pentru unii utilizatori, chiar înainte de a ajunge la procesul principal de modelare hidrologică (Cho, 2020). În unele cazuri, datele interpolate și chiar mediate din măsurătorile punctuale ale precipitațiilor utilizate pentru simularea hidrologică au fost utilizate cu algoritmul ModClark (Paudel et al., 2010; Ghavidelfar et al. 2011; Alexakis et al., 2014; Cho, 2020).

3. BAZINUL HIDROGRAFIC FIRIZA

3.1. Arealul de studiu și context

Bazinul hidrografic Firiza are un nivel ridicat de urbanizare de-a lungul ultimilor 14 km ai cursului principal de apă (Figura 2), iar acest lucru se exprimă prin densitatea mare de case, fabrici și alte infrastructuri, care au fost dezvoltate preponderent în ultimul secol (pop. 140,000, Figura 2). Zona a fost expusă la inundații, fie ca evenimente extinse, fie ca inundații rapide, iar acestea au produs pagube materiale semnificative (Sabău et al., 2022b).

Barajul Strâmtori a fost proiectat și construit între anii 1960 și 1964, pentru a permite alimentarea cu apă a orașului Baia Mare și a zonei miniere învecinate, precum și pentru producția de hidroenergie (Sabău et al. 2020). Lacul de acumulare Strâmtori-Firiza nu are o tranșă permanentă pentru atenuarea viiturilor. Protecția împotriva inundațiilor în zona aval este asigurată numai prin exploatarea coordonată a lacului de acumulare. În prezent, manevrele executate la descărcătorii de ape mari (debit maxim instalat 270 m³/s) sunt singura soluție disponibilă pentru diminuarea riscului la inundații din aval. Cu toate acestea, această limită de debit este mult mai mare decât limita de 110 m³/s, care este pragul limită peste care se pot produce pagube însemnate riveranilor din aval.

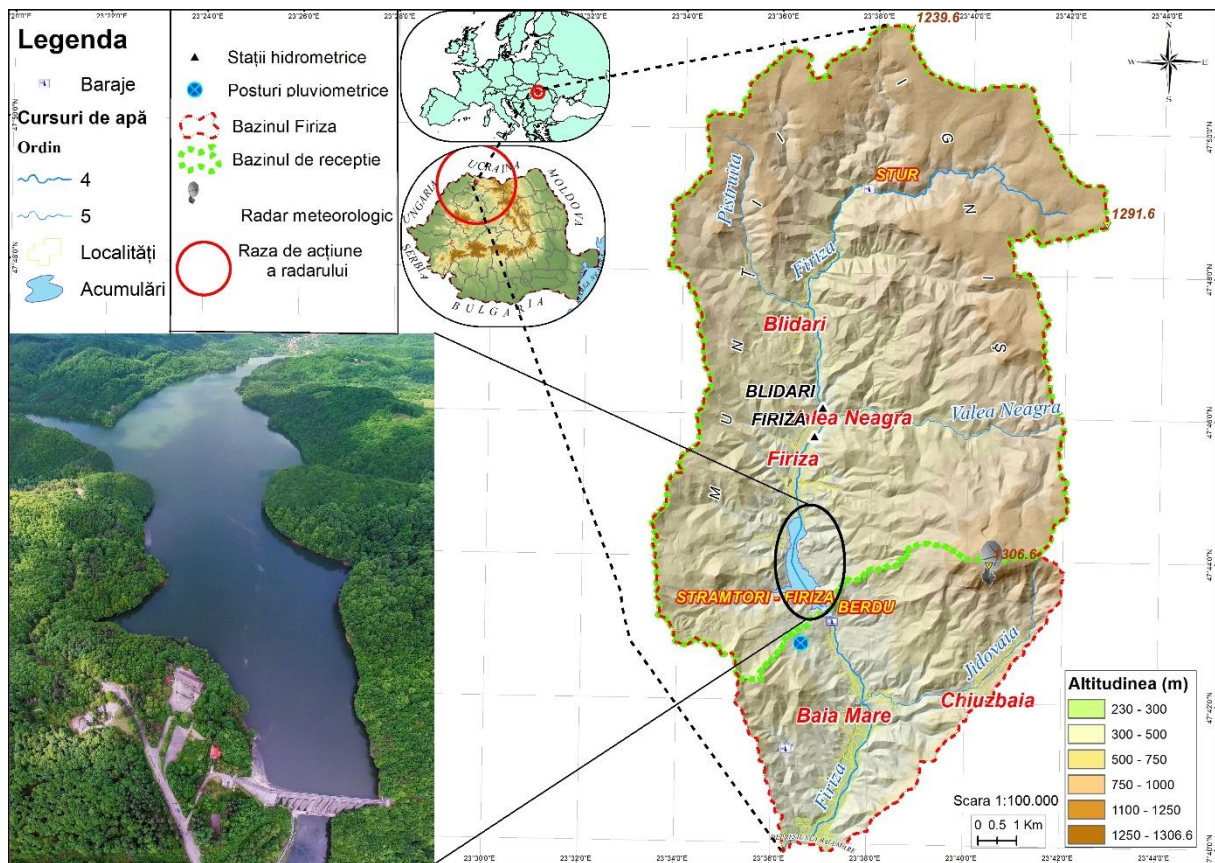


Figura 2. Localizarea geografică a bazinului studiat (adaptare după Sabău et al., 2022b)

Deși de a lungul timpului s-au înregistrat inundații importante, cum ar fi cele din anii (1970, 1995, 2001, 2005), soldate cu pagube importante, ajungând la ~ 6 milioane de euro (Mustăța, 2005), barajul încă nu are un sistem de avertizare a viiturilor afluate bazat pe prognoză (Sabău et al., 2020) pentru diminuarea pagubelor în zona urbană Baia-Mare (Tabelul 1).

Tabelul 1. Debitul maxim cu probabilități de depășire pentru cele mai însemnate viituri înregistrate în bazinul hidrografic Firiza (sursa: A.B.A.S.T)

Secțiune	Q ₀ (m ³ /s)	1970			1993			1995			2001			2005		
		Q max (m ³ /s)	Data	P (%)	Q max (m ³ /s)	Data	P (%)	Q max (m ³ /s)	Data	P (%)	Q max (m ³ /s)	Data	P (%)	Q max (m ³ /s)	Data	P (%)
Blidari	2.3	148	5/13/1970	2	79.3	12/21/1993	10	66.5	4/28/1995	12	106	3/5/2001	5	69.7	5/24/2005	11
Firiza	3.19	168	5/13/1970	3	100	12/21/1993	8	111	4/28/1995	7	150	3/5/2001	4	105	5/24/2005	8
Baraj Strâmători	4	199.9	5/13/1970	3	119	12/21/1993	8	132	4/28/1995	7	179	3/5/2001	4	124.9	5/24/2005	8

Baia Mare este situat într-un climat temperat continental, cu valorile medii anuale ale precipitațiilor în Depresiunea Baia-Mare de 892 mm; totuși, cantitatea anuală de precipitații poate ajunge la 1400 mm, în zonele montane înalte, unde versanții sunt expuși maselor de aer oceanic (Sabău et al. 2022).

Formele de relief montane din zonă reprezintă principalul factor care influențează distribuția parametrilor climatici în zona studiată. Elementele care favorizează producerea viiturilor, în special cele rapide, sunt legate de caracteristicile fizico-geografice și antropice ale bazinului și ale rețelei hidrografice. Cursurile de apă din bazinul Firiza au caracteristici specifice organismelor torențiale, precum pante medii foarte mari. Distribuția spațială a utilizării terenului în bazin este prezentată în Figura 3, acoperirea terenului fiind dominată de păduri (~ 85% din suprafața bazinului), pădurile jucând și ele un rol major în reglarea scurgerii în bazin. Zonele artificiale (urban, industrial, rural etc.) reprezintă ~ 3,38% din suprafața bazinului. Prezența Andisolurilor relevă faptul că regiunea aparține munților vulcanici (Rusu et al. 2006).

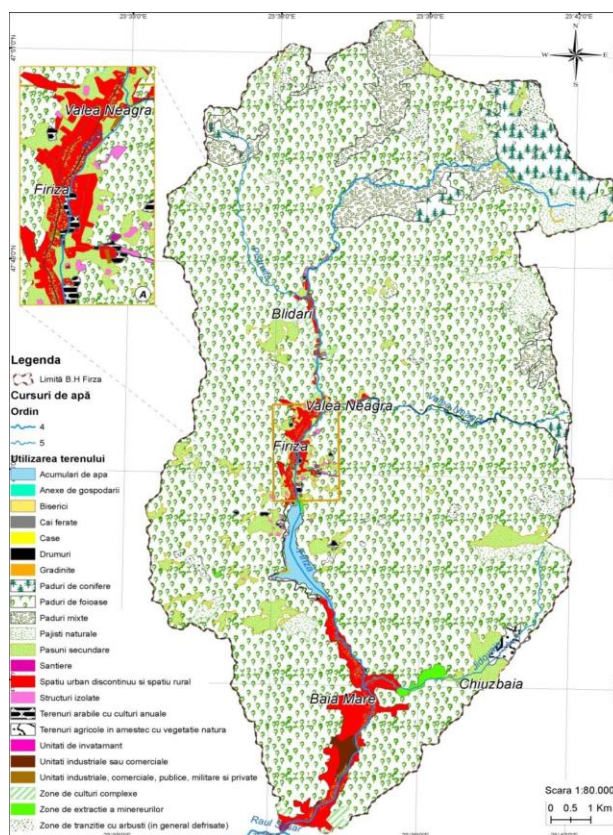


Figura 3. Acoperirea terenurilor (Sursa: Corine Land Cover, 2018), (EEA, 2018)

4. CONSTITUIREA BAZEI DE DATE

În România, disponibilitatea datelor privind caracteristicile bazinelor este limitată, cea mai mare parte a datelor fiind în format non-digital, nedisponibile publicului larg, și în multe cazuri depășite deoarece majoritatea datelor au fost produse în perioada regimului comunist. În anul 2000, I.N.H.G.A. a început elaborarea primei etape a S.I.M.I.N. (Anderson et al., 2004; Ioana et al., 2020; Sabău et al., 2022b) de modernizare a capacităților României de detectare, monitorizare și predicție meteorologică. Odată cu implementarea S.I.M.I.N. s-a încheiat tranziția rețelei de radare meteo din România de la sisteme operate exclusiv manual și învechite, la una dintre cele mai moderne și unice rețele de radare din Europa. În cadrul proiectului S.I.M.I.N au fost instalate sisteme radar Doppler în bandă S WSR-98D moderne, pentru a înlocui radarele meteorologice învechite din epoca anilor 1960 utilizate anterior și pentru a completa rețeaua națională (Ioana et al. 2020). Astfel, la nivel național a fost implementată tehnologia și algoritmi meteorologici dezvoltati de peste 30 de ani în rețeaua NEXRAD din SUA (Mătreacă et al., 2013; Ioana et al., 2020; Dumitrescu et al., 2020; Sabău et al. 2022b).

După inundațiile istorice înregistrate în martie 2001 la nivelul județului Maramureș, s-a văzut cât de vulnerabil este județul în activitatea de prevenire și combatere a efectelor viiturilor rapide. În 2004, la 1307 m deasupra nivelului mării, pe vârful Igniș, a fost instalat un radar de înaltă performanță în bandă C de la Gematronik (tip METEOR 500C). Radarul METEOR 500C în bandă C a fost integrat în rețeaua națională de radare SIMIN. Datele de la radarul în bandă C sunt convertite în formatele 88D/98D, pentru a facilita integrarea cu toate aplicațiile din sistem. În ultimii ani, radarul de pe vârful Igniș a trecut printr-un proces de modernizare a sistemului, cu trecerea la sistemul de dublă polarizare.

O actualizare și reînnoire majoră a rețelei de monitorizare a cursurilor din bazine deschide calea unui sistem de avertizare bazat pe prognoza hidrologică (Tabelul 2). Seturile de date privind debitul râului și precipitațiile au fost obținute de la Administrația Bazinală de Apă „Somes-Tisa”, Cluj (STWBA) și Administrația Națională de Meteorologie (ANM) pentru perioada 2012–2020.

Datele observate și statistice despre precipitații, temperatură, evapotranspirație (ET), strat de zăpadă și scurgere au fost procesate pentru o serie de evenimente de calibrare. Datele necesare pentru prognoza viiturilor au inclus condițiile meteorologice viitoare, precipitațiile

(QPF) și temperatura, așa cum se arată în Tabelul 2, 3. O gamă rezonabilă de parametri ai modelului a fost obținută prin calibrarea modelului.

Tabelul 2. Detalii privind stațiile hidrometeorologice (după A.B.A.S.T)

Nume stație	Administrator	Altitudine (m)	Frecvența datelor	Anii de funcționare
Stații hidrometrice				
Blidari	A.B.A.S.T	419.7	10 minute	1965-2023
Firiza	A.B.A.S.T	403.8	10 minute	1962-2023
Stații pluviometrice și nivometrice				
Baraj Firiza	A.B.A.S.T	435	12 ore	1964-2023
Vârful Igniș	A.B.A.S.T	1307	10 minute	2015-2023
Stații meteorologice				
Baia-Mare	A.N.M	186	1 ora	1871-2023
Radare meteorologice				
Igriș	A.B.A.S.T	1306.6	10 minute	2004-2023

Tabelul 3. Informații despre seturile de date utilizate

Setul de date	Sursă	An	Rezoluție	Tip de date
Utilizarea terenului	Copernicus Land Monitoring Service	2020	100 m	Satelit
Model digital al terenului (DTM)	Proiect PPPDI- LiDAR	2016	3 m	Grid
Ortofotoplanuri	A.N.C.P.I	2018	Scara 1:2000	Imagini raster (TIFF)
Scurgerea râurilor și precipitații	A.B.A.S.T și A.N.M	2012–2020	10 min / 1h / 12 h	Serie temporală
Soluri	Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Pedologie, Agrochimie și Protecția Mediului – ICPA	1964–1998	100 m	Grid
Adâncimea solului	Serviciul Mondial de Informare a Solului (WoSIS)	2020	100 m	Grid
Profile transversal și relevee la poduri și baraje	Proiect PPPDI	2012		DWG
Imagini radar	A.B.A.S.T și A.N.M-C.M.R.T.N	2017-2020	1 km	Grid
Prognoză numerică (NWP)	ECMWF IFS-HRES	2020	9 km	Grid

5. METODOLOGIA CERCETĂRII

Specificațiile de control au fost definite pe baza datelor disponibile privind precipitațiile și debitele înregistrate la stațiile automate în intervalul 2012-2020. De asemenea, a fost selectată rezoluția temporală a modelului. Pentru bazinul hidrografic Firiza a fost selectat un interval de timp de 10 minute, în cazul evenimentelor fără zăpadă, și 1 oră în cazul celor cu zăpadă.

O diagramă schematică a proceselor de scurgere la scară de bazin, în concordanță cu scara utilizată în modelul HEC-HMS, este prezentată în Figura 4. Produsele modelului Sistemul integrat de prognoză (ECMWF - IFS) de înaltă rezoluție (HRES) sunt descărcate mai întâi de pe site-ul web al ECMWF. Împreună cu produsele radar Igniș, aceste informații oferă condițiile de intrare și limită pentru modelul hidrologic HEC-HMS. Aceste condiții la limită sunt ulterior utilizate pentru a produce previziuni de diferență de timp de 2–240 h' ale adâncimii precipitațiilor pe un grid ce acoperă bazinul Firiza, care va fi folosită și în modelul HEC-HMS.

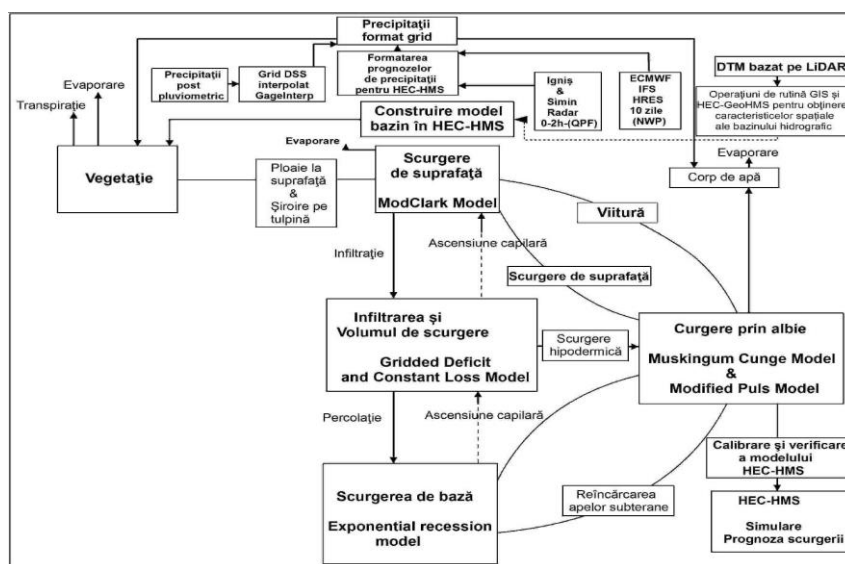


Figura 4. Diagrama schematică duală a procesului de scurgere din bazin în simetria fluxului între module la o scară care este în concordanță cu scara modelată în HEC-HMS (adaptare după Sabău et al., 2022b)

Programul GageInterp (USACE, 2016) a fost utilizat pentru a crea înregistrări de precipitații sub formă de grid, cu scopul de a fi utilizate în HEC-HMS prin interpolarea precipitațiilor punctuale din seriile temporale înregistrate la stațiile pluviometrice. Produsele GageInterp sunt griduri de precipitații în coordonatele UTM salvate în fișierul DSS.

Estimările sunt generate la intervale regulate de timp pentru celulele din grid prin citirea valorilor din seriile de timp stocate în fișierele bazei de date HEC-DSS. Pașii pentru procesarea datelor privind precipitațiile punctuale sunt prezentați schematic în Figura 5.

Adaptarea precipitațiilor radar sub formă de grid pentru HEC-HMS necesită colectarea datelor de precipitații bazate pe radar, reformatarea datelor și apoi conversia datelor într-o înregistrare DSS pe care HEC-HMS o poate utiliza. Datele radar din sistemul S.I.M.I.N.

(Ioana et al., 2020) și de la radarul Igniș, sunt în sistemul de proiecție național Stereografic 1970, ori nu includ referințe geografice sau proiecție. Datele, așa cum sunt descărcate din software-urile radarelor, sunt în format grid cu o rezoluție spațială a celulei de 1000 m. Înainte ca datele de precipitații radar să poată fi utilizate de HEC-HMS, au fost urmați pașii următori: 1) Conversia din formatul de fișier ASCII într-un raster ESRI, 2) Georeferențiere dacă nu includ referințe geografice sau proiecție, 3) Fișierele raster trebuie să fie reproiectate în zona UTM 34N și rezoluția spațială trebuie să fie redimensionată la o dimensiune de celulă de 2000 de metri și 4) fișierele raster trebuie convertite înapoi la formatul de fișier ASCII. Instrumentul ModelBuilder din ArcMap este utilizat pentru procesarea automată a mai multor fișiere. Pasul final pentru procesarea fișierelor ASCII de la pasul 4 la înregistrările în formatul grid din DSS se bazează pe utilizarea programului de utilitate ASC2DSSGrid. Programul ASC2DSSGrid este un program bazat pe DOS care necesită informații de intrare pentru a converti un fișier ASCII într-o înregistrare DSS. Acești cinci pași pentru procesarea datelor radar sunt prezentați schematic în Figura 5.

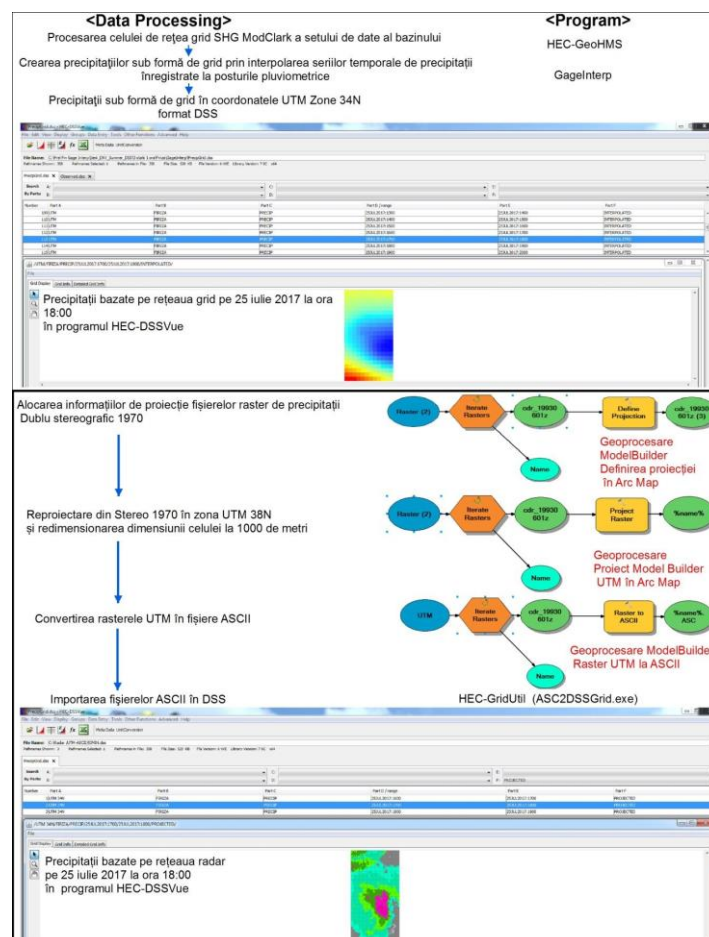


Figura 5. Diagrama schematică a procesării datelor privind precipitațiile punctiforme de la posturile pluviometrice și cele de la radar (adaptare după Sabău et al., 2022b)

În multe zone din România este un fapt că mai mult de 50% din precipitații se întorc în atmosferă prin evaporare și transpirația plantelor (Neculau et al., 2016). Aceste două procese sunt esențiale pentru simulări hidrologice precise pe termen lung.

Metoda mediei lunare a fost utilizată pentru a reprezenta ratele de evapotranspirație (ET) în bazinul hidrografic. Prin prelucrarea datelor din proiectul CARPATCLIM (Antolovic et al., 2013), au fost determinate ratele medii lunare ale evapotranspirației conform Tabelului 4. Odată determinate, valorile ET au fost încorporate în modelul HEC-HMS.

Tabelul 4. Evapotranspirația potențială medie lunară la nivelul bazinului hidrografic Firiza 1961-2010 (adaptare după Sabău et al., 2022b)

Luna	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Rata (mm/lună)	0.75	2.94	18.69	53.95	77.43	121.5	131.1	117.03	78.06	47.77	14.17	1.24

Metoda indicelui de temperatură utilizează o gamă largă de parametri pentru a defini componentele zăpezii, ploaia pe zăpadă și topirea zăpezii în cadrul procesului hidrologic. Parametrii reprezentativi sunt rezumați în Tabelul 5. Mai mult, parametrii finali de topire a zăpezii au fost stabiliți pentru fiecare subbazin după evaluarea parametrilor existenți și consultarea ghidurilor tehnice HEC (HEC 1956, 1998). Valorile inițiale ale gridului cu echivalentul în apă a stratului de zăpadă au fost dezvoltate folosind procesarea GIS.

Benzile de altitudine, introduse în modelul meteorologic pentru a ține cont de diferențele dintre căderile de zăpadă și stratul de zăpadă pe întreaga gamă de cote în fiecare subbazin, au fost dezvoltate de asemenea folosind DTM-ul. Relațiile altitudine-suprafață au fost determinate din DTM folosind instrumentele ArcGIS pentru a lua felii de zonă pe întreaga gamă de altitudini, pentru fiecare subbazin.

Aceste relații de altitudine-suprafață au fost segmentate la punctele naturale de rupere/inflexiune ale suprafeței topografice pentru a defini altitudinea benzi pentru fiecare subbazin. Pentru fiecare bandă de altitudine definită, parametrii inițiali ai stratului de zăpadă au fost calculați pentru a evalua orice strat de zăpadă care poate fi prezent la începutul simulării modelului hidrologic.

Tabelul 5. Parametrii generali ai topirii zăpezi pentru întreg modelul (adaptare după Sabău et al., 2022b)

Parametru	Valoare	Descriere parametru
PX Temp (C°)	-1	Face deosebire între ploaie și zăpadă pe baza temperaturii aerului
Temperatura de bază (C°)	0	Folosit pentru a determina dacă apare topirea. Dacă temperatura aerului este mai mică decât temperatura de bază, atunci nu se produce topire.
Rata de topire umedă (mm/C°-zi)	7.2	Describe viteza de topire a zăpezii în cazul ploi peste stratul de zăpadă. Funcționează atunci când apar ploi și când intensitatea ploii este mai mare decât limita intensității ploii.
Limita ratei ploii (mm/zi)	1	Face deosebire între topirea uscată și cea umedă. Se aplică topirea umedă în cazul în care intensitatea ploii > limita intensității ploii. În caz contrar, viteza de topire se calculează ca și cum nu s-ar produce nici o precipitație.
Coefficientul ratei de topire ATI	0.98	Se utilizează atunci când nu se produce topirea umedă. Coeficientul este utilizat pentru a actualiza indicele de topire a antecedentului de la un interval de timp la altul.
Funcția ratei de topire ATI F _{xn}	Funcție	Utilizat pentru calcularea vitezei de topire pe baza indicelui de temperatură antecedentă.
Limită la rece (mm/zi)	15	Contabilizează schimbările rapide de temperatură pe care zăpada le suportă în timpul ratelor ridicate de precipitații.
Coefficientul ratei de răcire ATI	0.4	Utilizat pentru a actualiza indicele de conținut rece antecedent de la un pas de timp la altul.
Capacitatea apei (%)	3	Definește cantitatea de apă topită care trebuie să se acumuleze înainte de a putea fi disponibilă prin infiltrare sau scurgere. Această valoare este un procent din echivalentul în apă al stratului de zăpadă.
Metoda dezghețării solului	Valoare constantă	Describe metoda utilizată pentru a ține cont de zăpadă pe un sol parțial înghețat sau complet dezghețat.
Rata dezghețării solului (mm/zi)	0.05	Fie o rată constantă, fie o rată anuală cu model

Orice stocare inițială de apă în bazinul hidrografic a fost contabilizată prin utilizarea parametrului inițial al deficitului de apă în metoda pierderii de apă în sol. Rata cu care capacitatea de reținere a vegetației se reîncarcă depinde de rata ET. Valorile inițiale estimate ale capacității maxime de reținere la nivelul coronamentului și în depresiunile superficiale sunt prezentate în Figura 6a și, respectiv, 6b. Estimările variază foarte mult în funcție de pantă, textura solului, utilizarea terenului, vegetație și alți factori (RSSC, 1980).

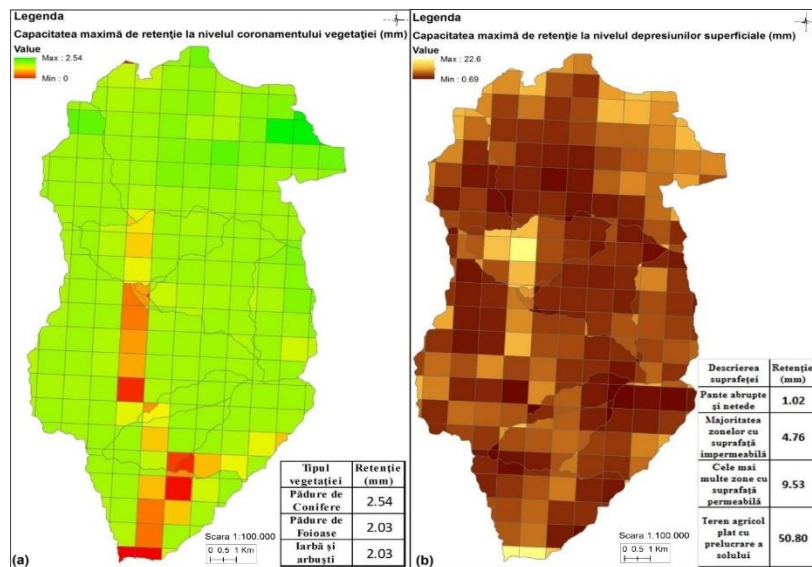


Figura 6. Capacitatea maximă de retenție la nivelul coronamentului (a), Capacitatea maximă de retenție la nivelul depresiunilor superficiale (b) (adaptare după Sabău et al., 2022b)

Un instrument de „Statisticile Zonale” din ArcGIS a fost folosit pentru a estima parametrii de infiltrare folosind date în format GIS. Parametrii necesari metodei deficitului și pierderii constante, au fost estimați pe baza texturii solului și a valorilor din literatură, în special tabelele. Valorile estimate ale caracteristicilor apei pentru clasele de textură, estimările clasei de textură, proprietățile hidrologice ale solului după textura solului din publicațiile (Skaggs & Khaleel, 1982; USACE, 1994; Saxton & Rawls, 2006).

Metoda deficitului și pierderii constante este una dintre cele două metode de pierdere care sunt adecvate pentru simularea continuă. Metoda include patru parametri: deficitul inițial, deficitul maxim, rata constantă și procentul de impermeabilitate (USACE, 1994; USACE, 2000). Trei dintre aceștia (deficitul maxim, rata de pierderi constantă și procentul de impermeabilitate) pot fi estimați utilizând date GIS (Figura 7).

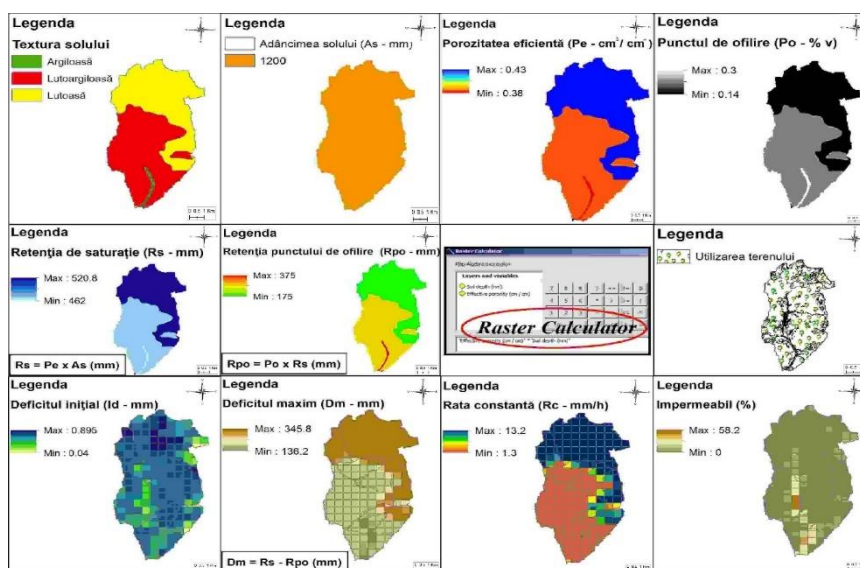


Figura 7. Diagrama procesului de estimare a parametrilor de intrare în metoda deficitului și pierderii constante (adaptare după Sabău et al., 2022b)

ModClark este un model cu parametri distribuiți în care variabilitatea spațială a caracteristicilor și proceselor este luată în considerare în mod explicit (Kull & Feldman 1998; Peters & Easton 1996; Feldman, 2000). Flexibilitatea metodologiei ModClark îi permite să fie adaptată la noile tehnologii, cum ar fi sistemele de informații geografice (Usul & Yilmaz 2002; Bhattacharya, 2012). Figura 8 prezintă diagrama de flux a metodologiei utilizate pentru estimarea parametrilor necesari pentru modelul ModClark.

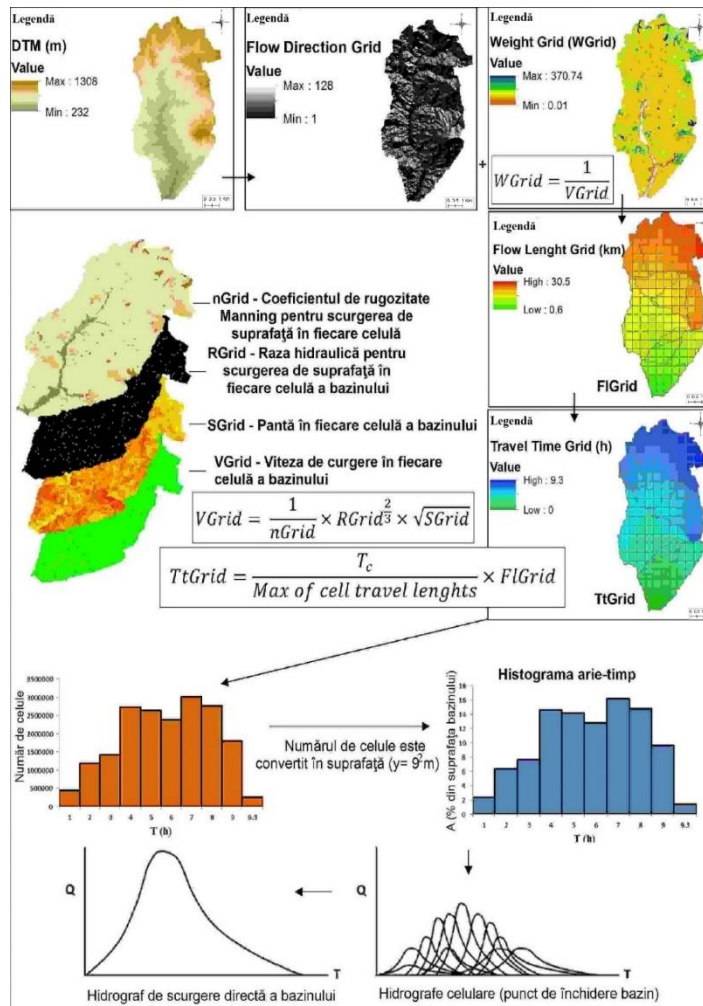


Figura 8. Diagrama de flux a metodologiei ModClark (adaptare după Sabău et al., 2022b)

Pentru a reprezenta cu acuratețe caracteristicile sectoarelor de râu existente în bazin (de exemplu, forme, pante și capacitatea de transport), au fost utilizate două metode de propagare. Metoda de propagare Muskingum-Cunge folosește parametri fizici cum ar fi lungimea, panta, coeficientul Manning și geometria în secțiune transversală pentru a estima translația și atenuarea hidrografelor de viitură pe fiecare albie. Lungimea și rugozitatea au fost estimate din hărți, fotografiile aeriene și studii de teren, iar panta a fost luată din modelul hidraulic HEC-RAS.

S-a dovedit că metoda se comportă bine pentru condiții de curgere nepermanentă într-o gamă largă de regimuri de curgere (Ponce, 1983). Metoda Muskingum-Cunge care se bazează pe o aproximare a diferenței finite a ecuației de continuitate cuplată cu o reprezentare empirică a ecuației de impuls (Miller & Cunge, 1975):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + cq_L \quad (1)$$

Unde:

c – celeritate undei de viitură;

μ - difuzivitate hidraulică;

q_L - aport afluent lateral;

Q - debit (m^3/s);

x - distanța de-a lungul albiei (m);

Pentru sectoarele de albie unde efectul de remuu are o influență semnificativă asupra hidrografului undei de viitură, a fost aleasă metoda de propagare Modified Puls, care se bazează pe o aproximare a diferenței finite a ecuației de continuitate cuplată cu o reprezentare empirică a ecuației de impuls. Metoda de rutare Modified Puls, se bazează pe o aproximare cu diferențe finite a ecuației de continuitate, cuplată cu o reprezentare empirică a ecuației de impuls (Chow, 1964; Henderson, 1966). Pentru metoda de propagare Modified Puls, ecuația de continuitate este scrisă ca (USACE, 2000):

$$\underline{I}_t - \underline{O}_t = \frac{\Delta S_t}{\Delta t} \quad (2)$$

Unde:

\underline{I}_t - debit mediu în amonte (debit afluent pe sector) pe parcursul unei perioade Δt ;

\underline{O}_t - debit mediu în aval (debitul defluent în aval de sector) în aceeași perioadă;

ΔS_t - schimbarea stocării pe sector în timpul perioadei.

Relația de stocare-ieșire, necesară pentru metoda de propagare Modified Puls, a fost determinată prin calcularea unor profile cu suprafața liberă a apei pentru fiecare sector de albie aflat sub influența efectului de remuu.

Profilurile suprafeței apei cu scurgere permanentă au fost determinate folosind programul HEC-RAS (USACE, 1982). Volumul stocat pentru fiecare sector de albie reprezintă volumul de apă de la capătul aval al sectorului de albie până la o anumită secțiune transversală din amonte. Stocarea pe sectorul de albie de interes a fost calculată ca diferența de volum acumulat față de secțiunea transversală amonte minus volumul acumulat la secțiune.

Metodele statistice sunt folosite pentru a cuantifica modul în care valorile simulate se compară cu valorile observate. Patru criterii de eficiență diferite au fost utilizate pentru a evalua cantitativ performanța modelului: coeficientul de determinare (R^2) - ecuația (3) (Willmott, 1981), eficiența Nash–Sutcliffe (NSE) - ecuația (4) (Nash & Sutcliffe, 1970; O’Connell et al., 1970), eroarea medie pătrată (RSR) - ecuația (5) (Legates & McCabe, 1999) și prejudecata procentuală (PBIAS) - ecuația (6) (Gupta et al., 1999):

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})(Y_i^{sim} - \bar{Y}^{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - \bar{Y}^{sim})^2}} \right]^2 \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - y^{medie})^2} \right] \quad (4)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{sim})^2} \right]} \quad (5)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \times 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (6)$$

Unde:

Y_i^{obs} - este a i -a observație pentru constituentul evaluat;

Y_i^{sim} - este a i -a valoare simulată pentru constituentul evaluat;

\bar{Y}^{obs} - este media datelor observate pentru constituentul evaluat;

\bar{Y}^{sim} - este media datelor simulate pentru constituentul evaluat;

n - este numărul total de observații.

Evaluarea performanței modelului include analiza sensibilității, calibrarea și validarea (Fanta & Feyissa, 2021). Analiza de sensibilitate a fost efectuată pentru a determina cei mai sensibili parametri pentru generarea scurgerii (Tabelul 6).

Tabelul 6. Evaluări de performanță pentru modelele calibrate (adaptare după Moriasi et al., 2007; Sabău et al., 2022b)

Clasă de performanță	R ²	NSE	RSR	PBIAS
Evaluări de performanță pentru valorile de evaluare pentru un interval de timp zilnic și săptămânal				
Faorte bun	$0.65 < R^2 \leq 1.00$	$0.65 < NSE \leq 1.00$	$0.00 < RSR \leq 0.60$	$PBIAS < \pm 15$
Evaluări de performanță pentru valorile de evaluare pentru un interval de timp lunar				
Bun	$0.65 < R^2 \leq 0.75$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$+10 \leq PBIAS < \pm 15$

Exploatarea lacurilor de acumulare conform prognozei modelului dezvoltat este condiționată de capacitatea de transport a albiei în aval de baraj, iar aceasta a fost determinată cu modelul hidraulic HEC-RAS după metodologia prezentată în Sabău & Șerban (2018a,b) și Sabău et al., (2020).

Timpul de rulare real pentru un model ModClark este relativ mic, în funcție de dimensiunea bazinului, lungimea simulării (Cho 2020; Kull et al. 1996). Un motiv major din spatele implementării ModClark este reprezentarea îmbunătățită a distribuțiilor spațiale și temporale ale precipitațiilor de către NEXRAD. Precipitațiile introduse de la radarul NEXRAD ar trebui să fie mai strâns aliniată cu realitatea datelor măsurate în bazin. Metoda ModClark are un potențial semnificativ pentru îmbunătățirea capacității de prognoză atunci când precipitațiile radar precise sunt utilizate în mod adecvat (Cho 2020; CEIWR-HEC 1996).

6. REZULTATELE CERCETĂRILOR ȘI DISCUȚII

6.1. Calibrarea modelului și verificarea lui prin modelarea unor viituri istorice

Calibrarea este necesară pentru a genera un model util și este adesea un proces iterativ (Yavuz et al., 2012; Uysal, 2012; Uysal et al., 2014, 2016, 2018; Che & Mays, 2015; Sensoy et al., 2018; Braud et al., 2018; Srinivas et al., 2018). Selectarea metodelor de modelare adecvate pentru studiu în timpul configurației inițiale a modelului sa bazat pe următoarele criterii: adecvarea metodelor pentru zona de studiu, tipul de teren și adecvarea metodelor bazate pe fizic pentru zonele cu date măsurate limitate; pasul de timp selectat (adică orar) ar trebui să captureze nivelul de detaliu al datelor observate. În timpul calibrării au fost ajustați

mai mulți parametri din cadrul metodelor: deficitul inițial și maxim, rata constantă etc. Calibrarea a arătat că metodele de modelare selectate au funcționat bine.

Pentru a dezvolta seturile de parametri pentru condițiile bazinului umed/tipic și uscat, modelul a fost calibrat la evenimente reprezentative pentru fiecare dintre condiții. S-a presupus că starea umedă/tipică reprezintă condiții medii ale bazinului, în timp ce starea uscată a fost considerată a reprezenta bazinul cu precipitații reduse sau deloc pentru o perioadă lungă de timp. Pentru calibrarea modelului au fost simulate un eveniment umed/tip, un eveniment umed/topire a zăpezii și un eveniment uscat. Detaliile fiecărui eveniment de calibrare sunt prezentate în Tabelul 7.

Tabelul 7. Evenimente de calibrare pentru diferite condiții din bazinul hidrografic (adaptare după Sabău et al., 2022b).

Condițiile din bazin	Data de început	Data de sfârșit	Descriere
Umed/tipic	7-Martie-2018	21-Martie-2018	Martie 2018 precipitații medii la nivel de bazin cu ploi persistente precipitațiile continuând până în aprilie
Umed/topirea zăpezii	7-Decembrie-2017	31 -Decembrie-2017	Zăpadă la sfârșitul lunii decembrie, urmată de o ploaie și furtună la începutul lunii ianuarie, în combinație cu temperaturile mai ridicate decât cele normale
Uscat	21-Iulie-2017	4-August-2017	Secetă semnificativă în vara anului 2017, ploile abundente aduse de ciclon au totalizat 81 mm de în 24 de ore

Modelul a fost calibrat pentru a se potrivi cu debitele de vârf, forma hidrografului și volumul hidrografului. Pentru Firiza, debitul de vârf și forma hidrografului au avut prioritate față de volumul total de scurgere. Figurile 9, 10, 11 prezintă hidrorafele calculate versus observate în secțiunea stației hidrometrice Firiza (Sabău et al., 2022b).

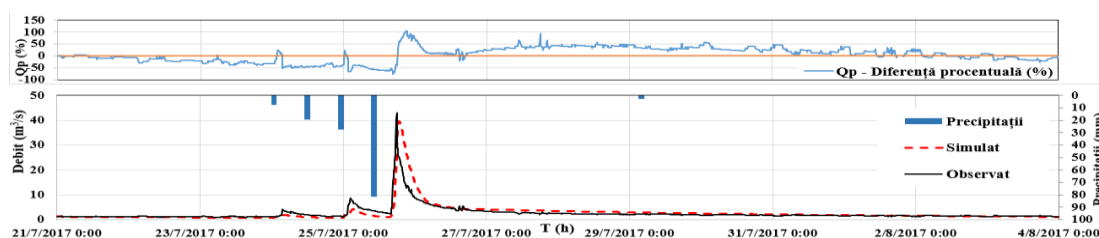


Figura 9. Hidrograful calibrat la stația hidrometrică Firiza, pentru condiții de bazin uscat (adaptare după Sabău et al., 2022b)

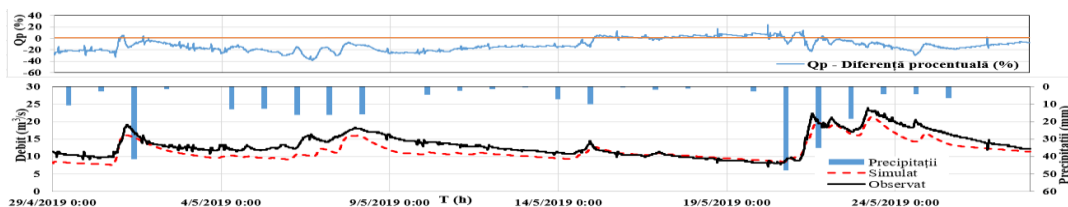


Figura 10. Hidrograful calibrat la stația hidrometrică Firiza, pentru condiții de bazin umed tipic (adaptare după Sabău et al., 2022b)

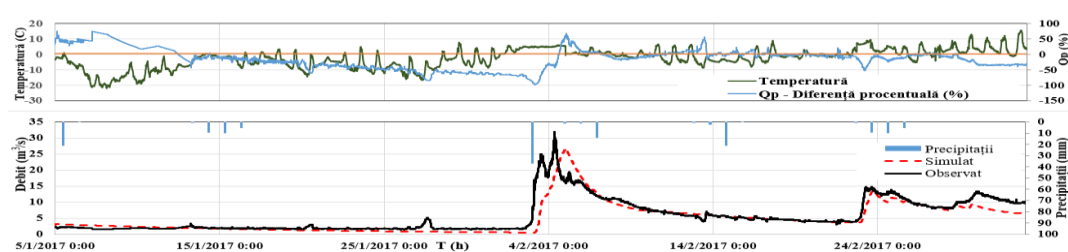


Figura 11. 2017 Hidrograful calibrat la stația hidrometrică Firiza, pentru condiții de bazin umed/topirea zăpezii (adaptare după Sabău et al., 2022b)

Figurile 9, 10, 11 și Tabelul 8 ilustrează calitatea calibrării, dar arată, de asemenea, că adaptarea modelului nu a fost constantă în perioada simulată, deoarece a variat în funcție de regimul de curgere (de exemplu, perioadele de debit ridicat și scăzut) și de locația în bazinul hidrografic. În cele mai multe cazuri, calitatea calibrării modelului a fost dependentă de acuratețea și disponibilitatea datelor despre precipitații. Pentru unele dintre evenimente (de exemplu, mai 2019), calibrarea acestuia nu a fost la fel de precisă pentru porțiunea superioară a bazinului; totuși, stația hidrometrică Firiza, situată în partea centrală a bazinului, prezintă o potrivire bună. În general, calitatea calibrării a fost ridicată pentru toate evenimentele evaluate pentru bazinul Firiza, ceea ce implică faptul că precipitațiile de la radar și ECMWF au fost nu doar mai precise pentru bazinul hidrografic Firiza, ci și că locația radarului Igniș și a stațiilor pluviometrice automate disponibile, a favorizat surprinderea mai bună a distribuției spațiale și temporale a evenimentelor de furtună (Sabău et al., 2022b).

Tabelul 8. Statisticile de performanță ale modelul HEC-HMS (adaptare după Sabău et al., 2022b)

Stație hidrometrică	Eveniment	R ²	NSE	RSR	PBIAS
Firiza	Martie-18	0.71	0.73	0.56	12
	Decembrie-17	0.65	0.67	0.53	14
	Iulie-17	0.78	0.86	0.37	7
	Iunie-20	0.67	0.82	0.45	13.5

6.2. Aplicație pentru prognoza viiturilor

Prognoza scurgerii include de obicei simularea condițiilor trecute și viitoare. Procesul începe cu selectarea timpului de prognoză. Timpul prognozei reprezintă ultimul timp disponibil pentru observațiile meteorologice ale precipitațiilor, temperaturii și altor variabile. Simularea este începută cu ore sau zile înainte de ora prognozată. Rezultatele calculate între ora de începere și cea de prognoză se numesc „perioada de retrospectivă”. Observațiile condițiilor actuale ale bazinului hidrografic au fost comparate cu rezultatele calculate din perioada de analizare în urmă pentru a face ajustări de calibrare care să îmbunătățească performanța modelului. După timpul de prognoză s-au folosit previziunile meteorologice ale valorilor viitoare. Prin urmare, prognoza cantitativă a precipitațiilor (QPF) de la radarul Igniș oferă o predicție meteorologică a grosimii viitorului strat precipitat. Previziuni similare au fost utilizate pentru alte variabile meteorologice, cum ar fi temperatura. Răspunsul viitor al bazinului este simulat pe baza condițiilor meteorologice prognozate. Această perioadă de timp în viitor poate fi numită „prognoză” (USACE, 2021a; Sabău et al., 2022b).

Alternativele de prognoză sunt una dintre componentele care pot calcula rezultatele. Fiecare alternativă este compusă dintr-un model de bazin, un model meteorologic și informații despre controlul timpului. Alternativa include, de asemenea, configurații de zonă pentru rata de pierdere, transformare, scurgere de bază și parametrii de propagare. Rezultatele sunt disponibile la fiecare element după finalizarea simulării (USACE, 2021a).

După crearea simulării de prognoză alternativă, modelul a fost configurat să utilizeze editori specifici prognozei alternative. Au fost efectuate ajustări necesare pentru modelul de bază, datorită condițiilor existente în perioada anterioară intervalului de prognoză în bazinul hidrografic și posibilelor erori în datele observate.

Timpul este esențial atunci când se efectuează prognoza debitului și tehnicile de modelare trebuie să ia în considerare acest fapt. Primul pas pentru configurarea alternativei de prognoză a fost configurarea zonelor și elementelor din fiecare zonă pentru ajustarea parametrilor. Zonele de subbazin ale bazinului Firiza au fost împărțite în două zone de configurație: zone după locațiile stațiilor hidrometrice, denumite configurație „gauge”, și zone pe tipuri de sol, denumite configurație „sol”. Prima face posibilă gruparea subbazinelor după poziție; acest lucru facilitează o comparație rapidă a ajustărilor parametrilor cu debitele

monitorizate (USACE, 2021a). Configurația solului este compusă din două zone reprezentând zone cu tipuri diferite de sol.

Pentru Firiza nu a fost elaborată o configurație de albie, deoarece s-a stabilit că elementele de propagare a albiei nu vor fi modificate în timpul simulărilor de prognoză în timp real.

Condiția de bazin umed/tipic a fost selectată pentru modelul de prognoză Firiza, deoarece condițiile naturale din acest bazin hidrografic au fost mai asemănătoare cu parametrii din același tip de model de bazin hidrografic.

Modelul meteorologic reprezintă precipitațiile observate și viitoare prognozate pentru alternativă. Pe baza datelor existente și pentru a identifica debitul maxim din hidrograf, a fost ales un pas de timp de o oră (USACE, 2021a).

Ora a fost selectată împreună cu data prognozei pentru a fi aproape de data ultimelor date observate disponibile. Ora de începere a simulării a fost cu nouă zile înainte de ora de începere a prognozei, iar ora de încheiere a fost selectată la nouă zile după ora de începere a prognozei, pentru o simulare totală a celor optsprezece (USACE, 2021a).

Perioada retrospectivă a fost utilizată la compararea rezultatelor observate și calculate pentru a sprijini calibrarea (Figura 12).

Condițiile de limită din bazinul hidrografic Firiza sunt reprezentate de precipitații și evapotranspirație, ambele evidențiate în modelul meteorologic. Debitul observat este, de asemenea, o condiție de prag (Sabău et al., 2022b).

Inițializarea scurgerii de bază setează starea scurgerii pentru subbazine la începutul unei simulări de prognoză. Pe baza debitului observat, a fost calculată starea inițială a debitului de bază. Raporturile au fost ajustate până când valorile debitului de bază inițial, observate și calculate au fost similare. Dezvoltarea unor raporturi sau intervale adecvate, poate fi finalizată la calibrarea modelului sau înainte de a rula modelul într-un modul de prognoză a inundațiilor (USACE, 2021a; Sabău et al., 2022b).

Inițializarea acumulărilor stabilește volumul inițial de apă acumulat pe baza informațiilor cu privire la cota nivelului apei în lac și a curbei volumetrică. În editorul de prognoză pentru acumulări, a fost selectată stația de nivel pentru fiecare dintre acumulări la ora de pornire și la ora de prognoză (Figura 12). Figura 12 arată inițializarea acumulării Firiza la începutul simulării (USACE, 2021a; Sabău et al., 2022b).

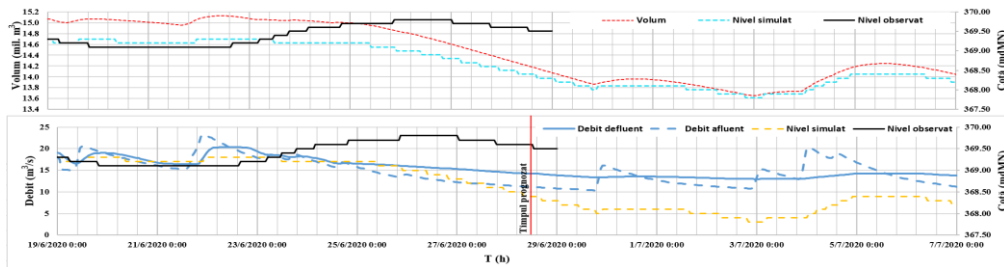


Figura 12. Inițializarea lacului de acumulare Firiza pentru prognoză (adaptare după Sabău et al., 2022b)

Figura 13 reprezintă rezultatele alternativei de prognoză. Acestea pot apoi să fie utilizate în operațiunile de exploatare a acumulărilor, sau importate în software-ul model suplimentar, cum ar fi HEC-ResSim sau HEC-RAS pentru optimizarea exploatării și cartografierea inundațiilor (USACE, 2021a; Sabău et al., 2022b).

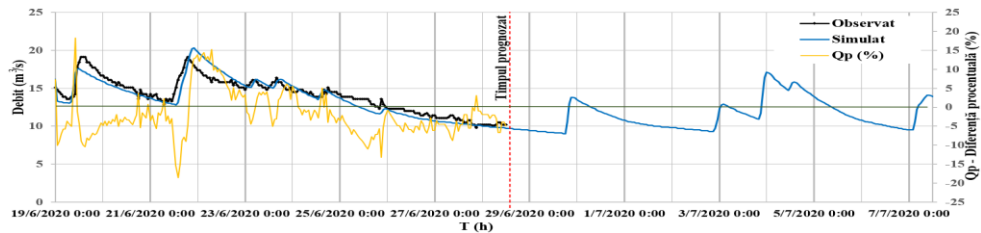


Figura 13. Hidrograful prognozat la stația hidrometrică Firiza (adaptare după Sabău et al., 2022b)

6.3. Discuții

Un factor important în luarea în considerare a amplitudinii pagubelor potențiale provocate de inundații este capacitatea insuficientă a podurilor. Conform modelului hidraulic construit (Sabău & Șerban, 2018a, 2018b; Sabău et al., 2022b) pentru bazinul Firiza (Figura 14), capacitatea de transport a albiei minore este de $60 \text{ m}^3/\text{s}$, iar în secțiunea podului cu cea mai mică capacitate de transport este limitată la $50 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 14).

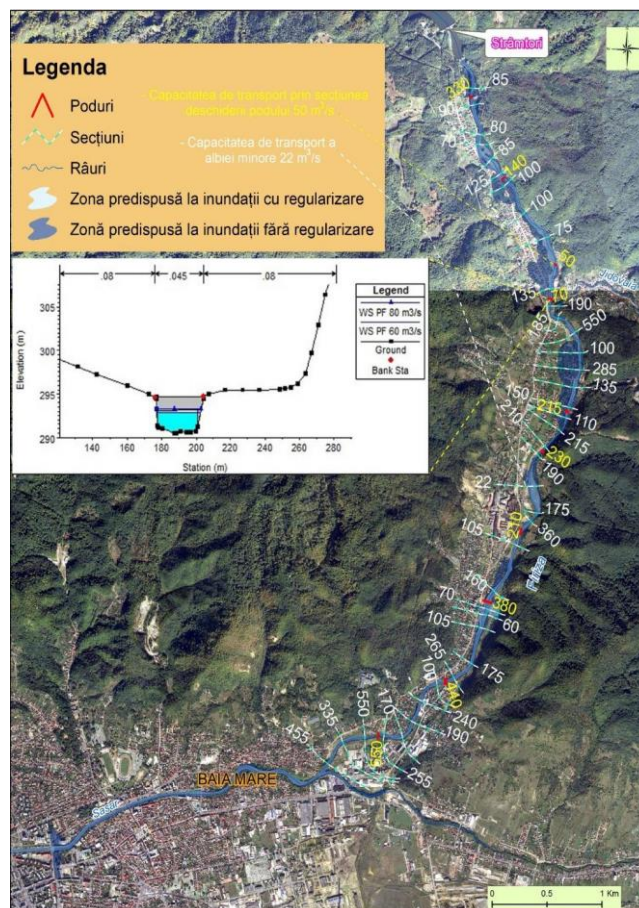


Figura 14. Harta extinderii zonei inundabile conform scenariului de simulare a evenimentelor fără regularizare și cu regularizare împreună cu capacitatea de transport a albiei minore și a secțiunilor de pod din aval de Barajul Strâmtori (adaptare după Sabău et al., 2022b)

În prima parte a analizei, hidrograful viiturii formate la ultimul eveniment istoric semnificativ de inundații înregistrat în martie 2001 a fost tranzitat prin lacul de acumulare Firiza. În a doua parte a acesteia, hidrograful sintetic a fost tranzitat pentru un eveniment de precipitații de 24 de ore, cu o perioadă de revenire de 100 de ani (Figura 15) (Sabău et al., 2022b).

Astfel, pentru o viitură semnificativă de primăvară, care are un timp de creștere prelungit, cu alimentare pluvio-nivală, modelul de prognoză hidrologică trebuie să producă cele mai precise simulări ale hidrografului iminent cu un timp de avertizare de cel puțin 30 h, pentru a se putea efectua manevre de pregolire la barajul Strâmtori în limitele debitului maxim admisibil (debit care poate fi transportat prin albia minoră fără revărsare) de $50 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabelul 9) (Sabău et al., 2022b).

Tabelul 9. Determinarea timpului de pregolire a acumulării Firiza de la NNR la muchia superioară a descărcătorului (adaptare după Sabău et al., 2022b)

Cota	Volum	Volum evacuat	Evacuarea prin descărcătorul de suprafață și UHE I	
			Q (m ³ /s)	T
mdMN	mil.m ³	mil.m ³		
370.0	16.609			
369.5	16.085	0.520	160	56'
369.0	15.572	0.510	115	77'
368.5	15.070	0.500	86	139'
368.0	14.579	0.490	40	3h 40'
367.5	14.098	0.480	20	8h
Timp total de golire				15h 5'

În cazul viiturilor rapide cu timp scurt de creștere (Figura 14), modelul de prognoză hidrologică trebuie să producă cele mai precise simulări ale hidrografului iminent cu un timp de avertizare de cel puțin 48 de ore (Sabău et al., 2022b). Astfel, tranzitarea viituri rapide prin acumulare are ca rezultat o creștere rapidă a nivelului apei în lac, datorită lipsei tranșei de atenuare și a capacității reduse de pre-evacuare a golirii de fund (Figura 14) (Sabău et al., 2022b).

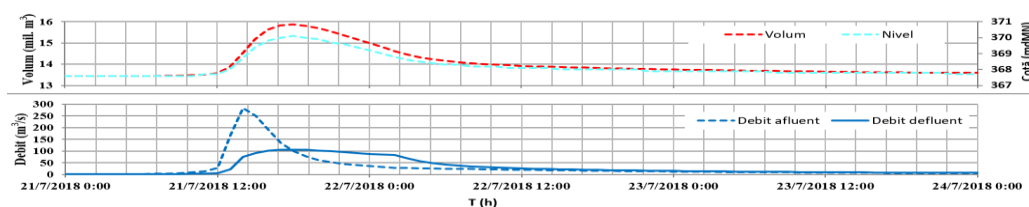


Figura 15. Ilustrarea impactului atenuării areale prin tranzitarea hidrografului de calcul prin acumularea Firiza (Sabău et al., 2022b)

Pentru a monitoriza mai bine evoluția viiturilor semnificative și impactul acestora asupra oamenilor și infrastructurii, Administrațiile Bazinale de Apă din România sunt obligate să dezvolte un Sistem Suport de Decizii Spațiale (SSDS) pentru gestionarea optimă a situațiilor de urgență generate de inundații. Deși au trecut mai bine de 10 ani de când Administrația Națională „Apele Române” (ANAR) a demarat proiectul pilot de dezvoltare a unui SSD pentru managementul inundațiilor în bazinul Argeșului, acesta nu a fost încă finalizat (Adler et al. 2006) Una dintre principalele probleme identificate în încercările anterioare de dezvoltare a unui SSD a fost expertiza și accesul limitat la pachete software comerciale complexe și baze de date în cadrul Administrației Naționale „Apele Române” (ANAR) (Adler et al., 2006; Popescu et al., 2012).

În perioada de iarnă, când apar evenimente care includ încălzirea bruscă și precipitații lichide, limitele ating valori critice în ceea ce privește erorile procentuale de volum. Pentru

anotimpurile fără îngheț și zăpadă, procesul de modelare este mai simplu, iar senzorii automatizați de la stațiile meteorologice și de măsurare a debitului funcționează mai precis, reducând astfel erorile (Şensoy et al. 2016; Sabău et al., 2022b).

Motivul pentru care există erori procentuale de volum relativ mai mari este că părțile de recesiune simulate sunt ușor diferite de debitele observate pe ramura de descreștere. Modelul hidrologic arată recesiuni abrupte, în timp ce observațiile arată o tendință mai moderată. Pentru perioada de toamnă, evenimentele sunt de scurtă durată; solul este nesaturat iar hidrografele au recesiuni ascuțite. Cu toate acestea, iarna și primăvara, evenimentele sunt de lungă durată și solul este saturat. Astfel, diferențele procentuale de volum iarna și primăvara sunt mai mari decât cele din perioadele de toamnă, ceea ce este în acord cu rezultatele altor studii (Sensoy et al., 2016; Sabău et al., 2022b).

Optimizarea exploatării este o măsură de gestionare a lacului de acumulare pe termen scurt, care urmărește evacuarea în avans a unei cantități de apă suficientă pentru a compensa volumul de apă transportat de o viitură viitoare (Figura 16). Termenul de realizare pentru prognoză nu poate fi mai mare de 12 ore, având în vedere caracterul rapid al inundațiilor din bazinul din amonte. La lacul de acumulare Firiza există o singură golire de fund cu un diametru de 1 m și o capacitate de descărcare la nivel normal de retenție (NNR) de $12 \text{ m}^3/\text{s}$ (Sabău et al., 2022b).

În modelul HEC-ResSim au fost luate în considerare următoarele scenarii de pregolire înainte de viitură: Dacă nivelul în lac la momentul emiterii prognozei este la NNR și ținând cont de un timp de 12 ore, aprox. 500.000 de metri cubi pot fi eliberați. Dacă se adaugă volumul dintre NNR și nivelul maxim extraordinar (NME) de 1,75 milioane m^3 , capacitatea totală disponibilă pentru atenuare crește la aproximativ 2,25 milioane m^3 (Figura 16).

Evacuarea ar putea avea loc și prin deversor, cu condiția ca nivelul apei să atingă creasta deversorului. Pentru viituri medii, debitul total trebuie menținut în limita capacității de transport a albiei minore, determinată în prezent la $50 \text{ m}^3/\text{s}$. În cazul unei inundații extraordinare, debitul total trebuie menținut în limita pragului până la care nu se produc pagube însemnate proprietarilor riverani, determinat în prezent la $110 \text{ m}^3/\text{s}$. Menținerea debitului în aceste limite poate fi realizată prin funcționarea corectă a stăvilor segment, ceea ce ar avea ca rezultat o încetinire a creșterii nivelului apei în lac deasupra crestei deversorului. Când se ajunge la o cotă apropiată de NME, stăvilor segment vor trebui să fie complet ridicate pentru a preveni creșterea nivelului deasupra NME (Sabău et al., 2022b).

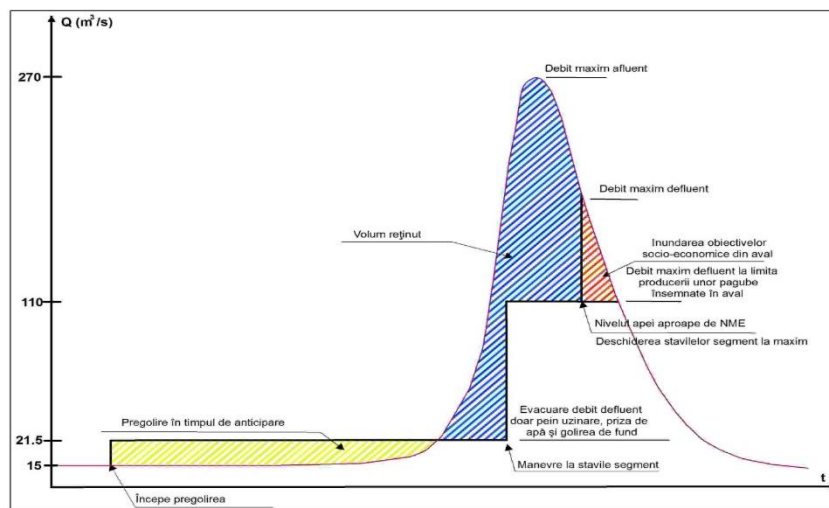


Figura 16. Hidrograful afluent cu probabilitate de depășire de 1% față de debitul defluent (adaptare după Sabău et al., 2022b)

Funcționarea stăvililor segment a fost studiată folosind HEC ResSim 3.3 (USACE, 2021e), atât din punct de vedere al siguranței în exploatare, cât și pentru o distribuție optimă a debitului în aval. Odată ce barajul Runcu va fi pus în funcțiune, surplusul de debit afluent care este derivat din bazinul râului Mara, o să fie mai ușor de controlat prin exploatarea viitorului lac de acumulare Runcu, în timp ce evacuarea apei din Strâmători-Firiza poate fi gestionată astfel încât cota NNR va fi scăzută și astfel, volumul disponibil pentru atenuare va crește (Figura 17).

Scopul simulărilor Hec-ResSim a fost de a optimiza exploatarea acumulării Firiza Strâmători astfel încât NME să nu fie niciodată atins sau să fie atins cât mai târziu posibil în timpul viiturii. Dacă se atinge NME, debitul evacuat crește peste capacitatea actuală de transport a albiei râului, iar măsura de apărare nestructurală împotriva inundațiilor trebuie completată cu alte măsuri structurale (Sabău et al., 2022b).

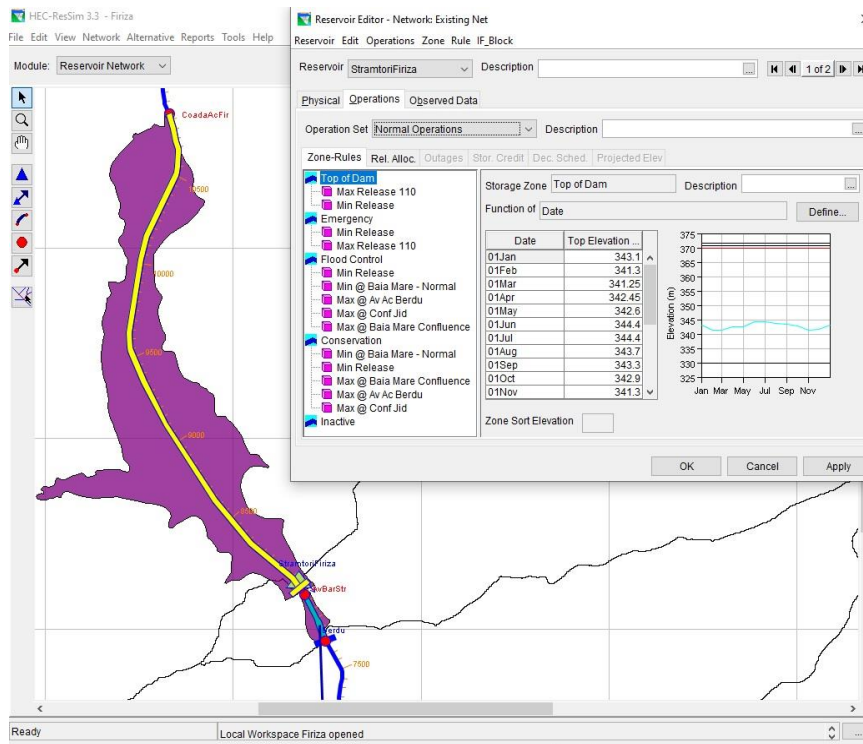


Figura 17. Modelul lacului de acumulare în programul de optimizare a exploatării HEC-ResSim (adaptare după Sabău et al., 2022b)

Strategia regulamentului anterior de exploatare a lacului de acumulare Firiza și curbele lunare planificate pot să fie înlocuite cu noua metodologie de exploatare, care operează cu prognoze ale debitului afluent și ale condițiilor meteorologice în timp real, iar acestea parte componentă în viitorul S.S.D.S dezvoltat. Indicatorii de performanță referitori la diminuarea riscului de inundație în aval, indicele de stocare la inundații, cota nivelului apei de stocare finală, combinați cu manevrele stavelor segment arată că metodologia propusă oferă performanțe mai mari comparativ cu strategia anterioară din regulamentul de exploatare în condiții de ape mari (Sabău et al., 2022b).

Utilizarea S.S.D.S ar putea conduce la evitarea conflictelor de interese frecvente ale diverselor utilizări, prin asigurarea unei prognoze precise a debitului afluent. În plus, nivelul acumulării ar putea să fie menținut la un ritm satisfăcător pentru asigurarea unei aprovizionări suficiente cu apă pentru alte utilizări. Modelul hidrologic este capabil să producă estimări și prognoze ale debitului afluentului, în special pentru topirea zăpezii. Diferența dintre valorile volumului total observate și simulate a fost de 17,5%, iar eficiența modelului Nash-Sutcliffe este de aproximativ 0,67.

Majoritatea serviciilor de prognoză de la nivelul Administrațiilor Bazinale din România utilizează foarte rar modele hidrologice calibrate și validate cu ajutorul datelor măsurate și transmise de la stațiile hidrometrice. Cu toate acestea, din cauza lipsei de arhive de date radar pe termen lung, a costului ridicat și a timpului necesar pentru recalibrarea modelelor existente, se recomandă actualizarea modelelor hidrologice existente folosind QPE-uri radar corectate pentru a simula procesul precipitației scurgere.

CONCLUZII

Pentru elaborarea lucrării de cercetare a fost avut în vedere obiectivul general: elaborarea unui model hidrologic complex, esențial în definirea unui S.S.D.S care integrează G.I.S. cu aplicații hidrologice și hidraulice.

Având în vedere controversese și contextul urbanistic existent în bazinul Firiza, corelarea timpului necesar evacuării preventive în condiții de siguranță pentru obiectivele din aval cu timpul de avertizare prevăzut de modelul de prognoză hidrologică, în vederea asigurării unei tranșe volumetrice de atenuare, a fost unul dintre obiectivele majore ale acestui studiu.

În activitatea de exploatare a lacului de acumulare Firiza există adesea un conflict de interese între diferitele utilizări. Cel mai important conflict, care poate fi rezolvat în general pe baza prognozei hidrologice, se regăsește între cerința de a menține nivelul apei în acumulare la cote scăzute, pentru protecție împotriva inundațiilor, și nevoia de exploatare intensivă a acestuia pentru a asigura un grad ridicat de securitate pentru alimentare cu apă și să producă cât mai multă energie. Investițiile suplimentare în lacuri de acumulare sunt mult mai puțin economice decât realizarea unui sistem de prognoză operațional (chiar dacă un astfel de sistem necesită observații în timp real, modele matematice precipitații-scurgere și calculatoare dedicate, și nu în ultimul rând, personal cu expertiză pentru prelucrarea și interpretarea imediată a datelor care să permită elaborarea prognozelor și deciziilor de exploatare a lacurilor).

Modelarea hidrologică avansată confirmă faptul că în cazul ploilor distribuite uniform pe bazinul râului Săsar, timpul de propagare de la confluența cu râul Firiza este mai scurt pentru Săsar decât pentru Firiza, având în vedere forma și dimensiunea bazinelor din amonte de confluență și prezența lacului de acumulare Firiza. Astfel, modelul dezvoltat poate oferi

suport decizional în timp real pentru decalarea vârfului undelor de viitură la confluența celor două cursuri de apă, și astfel să contribuie la diminuarea riscului de inundații în zona centrală a municipiului Baia-Mare.

De asemenea, viitoare proiectele de regularizare a albiei în aval de baraj, cum ar fi realizarea unui prag de strangulare și direcționare a curentului spre deversorul de admisie în acumularea nepermanentă laterală de vârf, ceea ce ar întârzia și mai mult propagarea undei de viitură pe acest curs de apă, deci o probabilitate mai mică de compunere a undelor la confluență în Baia-Mare.

Prin această lucrare propunem dezvoltarea unui Sistem Suport de Decizii Spațiale pentru managementul integrat al riscului de inundații în bazinul Firiza (SSDSBF). SSDSBF este un sistem de suport decizional în timp real care extinde și îmbunătățește datele și informațiile disponibile membrilor personalului de exploatare care trebuie să ia decizii privind funcționarea structurilor hidrotehnice. Datele și informațiile puse la dispoziție prin SSDSBF includ date și prognoze privind precipitațiile, precum și date și informații despre starea actuală a bazinelor hidrografice, starea viitoare probabilă a bazinelor hidrografice și consecințele acțiunilor de management. Datele și informațiile ajută managerii de apă să ia decizii operaționale informate.

În concluzie, un SSDS integrat este stabilit și testat pentru un lac de acumulare cu baraj situat într-un areal foarte delicat și vulnerabil, care susține luarea deciziilor de exploatare pe lângă faptul că poate să fie utilizat ca instrument de avertizare timpurie a viiturilor de către autoritățile locale.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. Abagiu, P., Munteanu, A., Munteanu, S., & Gaspar, R. (1973). Hydrological role of forests in small catchments. *Silvicultura*, 29, 353–392.
2. Adler MJ, Anderson GD, McKinney D (2006) Decision support system for integrated water management in Romania: recent developments and future plans. In: Proceedings of the conference Integrated water management of transboundary catchments: A contribution from Transcat, Venice, Italy, 24–26 March, 2006. https://www.researchgate.net/profile/Mary-Jeanne-Adler/publication/268403138_Decision_Support_System_for_Integrated_Water_Management_in_Romania_Recent_Development

s_and_Future_Plans/links/55cf028c08ae502646a91542/Decision-Support-System-for-Integrated-Water-Management-in-Romania-Recent-Developments-and-Future-Plans.pdf. Accessed 3 Feb 2021

3. Aksoy H, Kirca VSO, Burgan HI et al (2016) Hydrological and hydraulic models for determination of flood-prone and flood inundation areas. *Proc Int As Hydrol Sci* 373:137–141. <https://doi.org/10.5194/piahs-373-137-2016>
4. Alexakis DD, Grillakis MG, Koutroulis AG et al (2014) GIS and remote sensing techniques for the assessment of land use change impact on flood hydrology: the case study of Yialias basin in Cyprus. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 14:413–426. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-413-2014>
5. ANCPPI (2019) Romanian National Agency for Cadastre and Real Estate Advertising [Online]. <https://geoportal.ancpi.ro/geoportal/imobile/Harta.html>. Last accessed 2021/11/01
6. Anderson M, Chen ZQ, Kavvas M et al (2002) Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of basin runoff. *J Hydrol Eng*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2002\)7:4\(312\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:4(312))
7. Antolovic I, Mihajlović V, Rancic D et al (2013) Digital climate atlas of the Carpathian region. *Adv Sci Res* 10:107–111. <https://doi.org/10.5194/asr-10-107-2013>
8. Awol FS (2020) Identification of hydrologic models, inputs, and calibration approaches for enhanced flood forecasting. Ph.D. thesis, McMaster University, 255 pp. <http://hdl.handle.net/11375/25130>
9. Bartles M, Brauer T, Ho D et al (2022) Hydrologic modeling system HEC-HMS user's manual; Version 4.10; U.S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC), Davis, CA, USA, 2022; [Online]. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.10/report-documentation-page>. Last accessed 2022/04/06

10. Basawan S (1980) Role of hydrological forecasting in flood control operations: a case study. Hydrological forecasting Previsions hydrologiques (Proceedings of the Oxford symposium, April 1980; Actes du Colloque d'Oxford, avril 1980): IAHS-AISH Pub. no. 129
11. Bhattacharya A (2012) Modclark model: improvement and application. IOSR J Eng 02:100–118. [https:// doi.org/10.9790/3021-0271100118](https://doi.org/10.9790/3021-0271100118)
12. Braud I, Vincendon B, Anquetin S et al (2018) The challenges of flash flood forecasting. [https://doi.org/ 10.1016/B978-1-78548-289-2.50003-3](https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-289-2.50003-3)
13. Brunner GW (1989) Muskingum-Cunge channel routing: Lecture notes. Hydrologic Engineering Center U.S. Army Corps of Engineers, Davis
14. CEIWR-HEC (1996) ModClark Model Development for the Muskingum River Basin, OH. U.S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, pp 1–51
15. CEIWR-HEC (2009) HEC-DSSVue HEC data storage system visual utility engine user's manual Version 2.0. U.S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, pp 1–490
16. CEIWR-HEC (2016) GageInterp 16. User's manual Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis. [https:// www.hec.usace.army.mil/software/hec-rtts/documentation/GageInterp_UsersManual.pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-rtts/documentation/GageInterp_UsersManual.pdf). Accessed 7Oct 2021
17. Che D, Mays L (2015) Development of an optimization/simulation model for real-time flood-control operation of river-reservoirs systems. Water Resour Manag. [https://doi.org/10.1007/ s11269-015-1041-8](https://doi.org/10.1007/s11269-015-1041-8)
18. Chitu Z, Bogaard T, Busuioc A et al (2017) Identifying hydrological pre-conditions and rainfall triggers of slope failures at catchment scale for 2014 storm event in the Ialomita Subcarpathians, Romania. Landslides 14:419–434. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0740-4>

19. Cho Y (2020) Application of NEXRAD radar-based quantitative precipitation estimations for hydrologic simulation using ArcPy and HEC software. *Water* 12(1):273. <https://doi.org/10.3390/w12010273>

20. Cho Y, Engel BA (2017) NEXRAD quantitative precipitation estimations for hydrologic simulation using a hybrid hydrologic model. *J Hydrometeorol* 18:25–47. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0013.1>

21. Cho Y, Engel BA, Merwade VM (2018) A spatially distributed Clark’s unit hydrograph based hybrid hydrologic model (Distributed-Clark). *Hydrol Sci J* 63:1519–1539. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1516042>

22. Chow VT (1964) *Handbook of applied hydrology*. McGraw-Hill, New York Clark CO (1945) Storage and the unit hydrograph. *Trans ASCE* 110:1419–1446

23. Derakhshannia M, Dalvand S, Asakereh B, Ostad Ali Askari K (2020) Corrosion and deposition in Karoon River, Iran, based on hydrometric stations. *Ijhst* 10(4):334–345. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2020.10029520>

24. Devia GK, Ganasri BP, Dwarakish GS (2015) A review on hydrological models. *Aquat Procedia* 4:1001– 1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>

25. Fanta SS, Feyissa TA (2021) Performance evaluation of HEC-HMS model for continuous runoff simulation of Gilgel Gibe watershed, Southwest Ethiopia. *J Water Land Dev* 50:85–97. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.138185>

26. Feldman AD (2000) Hydrologic modelling system technical reference manual, hydrologic modelling system HEC-HMS technical reference manual, 138 p

27. Fleming M, Doan J (2013) HEC-GeoHMS geospatial hydrologic modelling extension: user’s manual version 10.2. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Centre, Davis

28. Ghavidelfar S, Alvankar SR, Razmkhah A (2011) Comparison of the lumped and quasi-distributed Clark runoff models in simulating flood hydrographs on a semi-arid watershed. *Water Resour Manag* 25:1775–1790. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9774-5>

29. Gupta HV, Sorooshian S, Yapo PO (1999) Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. *J Hydrol Eng* 4(2):135–143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\) 10840699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE) 10840699(1999)4:2(135))
30. Gyori MM, Humbert J, Haidu I (2013) Deriving flash floods in the case of simulated precipitations. *Geogr Napoc* 7(2):11–18
31. Haberlandt U (2010) From hydrological modelling to decision support. *Adv Geosci* 27:11–19. <https://doi.org/10.5194/adgeo-27-11-2010>
32. Haiden T, Janousek M, Vitart F, Ferranti L, Prates F (2019) Evaluation of ECMWF forecasts, including the 2019 upgrade. <https://doi.org/10.21957/mlvapkke>
33. HEC (1956) North Pacific Division, Snow Hydrology Center, Portland, OR
34. HEC (1982) HEC-1 training document No.15 U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California, USA HEC (1994) Flood-runoff analysis, EM 1110-2-1417. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC
35. HEC (1998) Engineer manual 1110-2-1406 runoff from snowmelt. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC
36. HEC (2021) HEC-HMS applications guide flood forecasting applications—current: case study: flood forecasting in the Kaskaskia Basin [Online]. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsag/flood-forecasting-applications/case-study-flood-forecasting-in-the-kaskaskia-basin>. Last accessed 2021/02/07
37. Henderson FM (1966) Open channel flow. MacMillan Publishing Co., Inc., New York
38. IGSU (2016) Country report 5.1 conditionality Romania. The general inspectorate for emergency situations [Online]. https://www.igsu.ro/documente/RO-RISK/Raport_Final_de_tara.pdf. Last accessed 2021/10/03
39. Ioana M, Ivanovici V, Cordoneanu E et al (2020) SIMIN—the integrated system for meteorological surveillance, forecast and alert in Romania.

<https://library.net/document/zx3je1nz-simin-integrated-meteorological-surveillance-forecast-alert-romania.html>. Last accessed 2021/05/05

40. Javadinejad S, Ostad-Ali-Askari K, Jafary F (2019) Using simulation model to determine the regulation and to optimize the quantity of chlorine injection in water distribution networks. *Model Earth Syst Environ* 5(3):1015–1023
41. Javadinejad S, Eslamian S, Ostad-Ali-Askari K (2021) The analysis of the most important climatic parameters affecting performance of crop variability in a changing climate. *Int J Hydrol Sci Technol* 11(1):1–25
42. Jonkman SN, Vrijling JK (2008) Loss of life due to floods. *J Flood Risk Manag* 1:43–56. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2008.00006.x>
43. Klipsch JD, Hurst MB (2021) HEC-ResSim: Reservoir system simulation 3.3 user's manual version 3.3.
44. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis. https://www.hec.usace.army.mil/software/hecressim/documentation/HECResSim_33_UsersManual.pdf. Last accessed 2021/05/09
45. Kull D, Feldman A (1998) Evolution of Clark's unit graph method to spatially distributed runoff. *J Hydrol Eng ASCE* 3(1):9–19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1998\)3:1\(9\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1998)3:1(9))
46. Kull D, Nicolini T, Peters J et al (1996) A pilot application of weather radar-based runoff forecasting, Salt River Basin, MO; U.S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, CA, USA, pp 1–32
47. Leach JM, Kornelsen KC, Coulibaly P (2018) Assimilation of near-real time data products into models of an urban basin. *J Hydrol* 563:51–64. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.064>
48. Legates DR, McCabe GJ (1999) Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydro-climatic model validation. *Water Resour Res* 35:233–241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>

49. Mătreacă S, Baciú O, Apostu D et al (2013) Evaluation of the Romanian flash flood forecasting system— case study in the Calnaú river basin. *Bodenkultur*. 64:67–72. https://diebodenkultur.boku.ac.at/vollt_exte/sondernummern/band-64/heft-3-4/matreatata.pdf. Last accessed 2021/06/06
50. Michaelides S (2019) Editorial for special issue “remote sensing of precipitation.” *Remote Sens* 2019(11):389. <https://doi.org/10.3390/rs11040389>
51. Miller WA, Cunge JA (1975) Chapter 5: Simplified equations of unsteady flow. In: Mahmood K, Yevjevich V (eds) *Unsteady flow in open channels*, vol I. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, pp 183–249
52. Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW et al (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in basin simulations. *Am Soc Agric Biol Eng*. 50(3):885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
53. Mustătea A (2005) *Exceptional floods on the Romanian territory*. Edit. Onesta, Bucharest
54. Nafchi RF, Samadi-Boroujeni H, Vanani HR (2021a) Laboratory investigation on erosion threshold shear stress of cohesive sediment in Karkheh Dam. *Environ Earth Sci* 80:681. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09984-x>
55. Nafchi RF, Yaghoobi P, Reaisi Vanani H, Ostad-Ali-Askari K, Nouri J, Maghsoudlou B (2021b) Eco-hydrologic stability zonation of dams and power plants using the combined models of SMCE and CEQUALW2. *Appl Water Sci* 11(7):1–7
56. Nafchi RF, Vanani HR, Noori Pashae K (2022) Investigation on the effect of inclined crest step pool on scouring protection in erodible river beds. *Nat Hazards* 110:1495–1505. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04999-w>
57. Nash JE, Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models: I. A discussion of principles. *J Hydrol* 10:282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

58. Neculau G, Stan I (2016) Evaporation and evapotranspiration in Romania. *Forum Geogr XV*:39–48. <https://doi.org/10.5775/fg.2016.058.s>
59. NOAA (2020a) (National Oceanic and Atmospheric Administration); NWS (National Weather Service); AHPS (Advanced Hydrologic prediction service). <https://water.weather.gov/precip/download.php>. Accessed 1 Jan 2020
60. NOAA (2020b) Next generation weather radar (NEXRAD) products. <https://catalog.data.gov/dataset/noaa-next-generation-radar-nexrad-products>. Accessed 1 Jan 2020
61. O’Connell PE, Nash JE, Farrell JP (1970) River flow forecasting through conceptual models part II—the Brosna catchment at Ferbane. *J Hydrol* 10:317–329
62. Ostad-Ali-Askari K, Shayan M (2021) Subsurface drain spacing in the unsteady conditions by HYDRUS-3D and artificial neural networks. *Arab J Geosci* 14(18):1–14
63. Ostad-Ali-Askari K, Shayannejad M (2021) Quantity and quality modelling of groundwater to manage water resources in Isfahan-Borkhar Aquifer. *Environ Dev Sustain* 23:15943–15959. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01323-1>
64. Ostad-Ali-Askari K, Shayannejad M, Ghorbanizadeh-Kharazi H (2017) Artificial neural network for modeling nitrate pollution of groundwater in marginal area of Zayandeh-rood River, Isfahan, Iran. *KSCE J Civ Eng* 21:134–140. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0572-8>
65. Pagano TC et al (2014) Challenges of operational river forecasting. *J Hydrometeorol* 15:1692–1707. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0188.1>
66. Pappenberger F, Buizza R (2009) The skill of ECMWF precipitation and temperature predictions in the Danube basin as forcings of hydrological models. *Weather Forecast.* <https://doi.org/10.1175/2008WAF2222120.1>
67. Paudel M, Nelson EJ, Downer CW et al (2011) Comparing the capability of distributed and lumped hydrologic models for analyzing the effects of land use change. *J Hydroinform* 13:461–473. <https://doi.org/10.2166/hydro.2010.100>

68. Peters J, Easton D (1996) Runoff simulation using radar rainfall data. *Water Resour Bull AWRA* 32(4):753–760. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1996.tb03472.x>
69. Pilon PJ (2002) Guidelines for reducing flood losses. United Nations International Strategy for Disaster Reduction Doc., p. 79. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/flood_guidelines.pdf. Accessed 7 Sept 2021
70. Ponce VM (1983) Development of physically based coefficients for the diffusion method of flood routing. Final Report to the USDA, Soil Conservation Service. Lanham, MD
71. Popescu I, Jonoski A, Bociort L (2012) Decision support systems for flood management in the Timis Bega catchment. *Environ Eng Manag J* 11:2305–2311. <https://doi.org/10.30638/eemj.2012a.284>
72. PPPDI (2014) The plan for the prevention, protection and attenuation of flood effects in the someș-Tisa River Basin S.C. AQUAPROIECT S.A
73. Ramos MH (2016) Flood forecasting systems around the world—Interview with Thomas Adams and Tom Pagano. HEPEX, <https://hepex.inrae.fr/flood-forecasting-systems-around-the-world-interview-with-thomas-adams-and-tom-pagano/>. Last accessed 2021/03/05
74. Rata M, Draghia A, Drobot R et al (2016) Decision support system for pro-active flood control on Jijia River (Romania). In: 6th international conference on IT convergence and security (ICITCS), 2016, pp 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICITCS.2016.7740322>
75. Reed SM, Maidment DR (1999) Coordinate transformation for using NEXRAD data in GIS-based hydrologic modeling. *J Hydrol Eng* 4:174–182. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(174\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(174))
76. Romanian National Institute for Pedology, Agrochemistry and Environmental Protection Soil (1964–1998) Map of Romania, 1:200000 (NIPAEP), Bucharest
77. RSSC (1980) Romanian system of soils classification, Conea A, Florea N, Puiu, ICPA, București, 173 p Rusu C, Stângă I, Niacșu L et al (2006) The pedogeographic cover of the

volcanic mountains in the Northern Part of the Eastern Carpathians. Scientific papers, Agronomy series, 49

78. Sabău D, Şerban Gh (2018a) Arch dam failure preliminary analysis using HEC-RAS and HEC-GEO RAS modelling. Case study Someşul Rece 1 reservoir. *Forum Geogr* XVII(1):44–55. <https://doi.org/10.5775/fg.2018.058.i>

79. Sabău D, Şerban G (2018b) Modelling in HEC-RAS and HEC-GEO RAS of the extraordinary flood from 1995, passed through the impoundment Someşul Rece 1. In: Bretcan P (edit, 2018), *Water resources and wetlands, 4th international conference water resources and wetlands*, 5–9 September 2018a, Tulcea (Romania), pp 95–107. https://www.limnology.ro/wrw2018/Proceedings/13_Sabau.pdf. Last accessed 2021/07/03

80. Sabău DA, Haidu I, Şerban G (2020) Key types of anthropic influence on surface waters, components of spatial decision support system for prevention and management of floods (Firiza Basin). In: 2020 “Air and water—components of the environ” conference proceedings, Cluj-Napoca, Romania, pp 177–190. https://doi.org/10.24193/AWC2020_17

81. Sabău DA, Şerban G, Tudose T et al (2022) Correlation between precipitation and orography—key element of the Spatial Decision Support System for Prevention and Management of Floods in the Firiza Basin (Northwest Romanian Carpathians). *Forum Geogr* XXI(1):5–17. <https://doi.org/10.5775/fg.2022.045.i>

82. Sabol GV (1988) Clark unit hydrograph and R-parameter estimation. *J Hydraul Eng* 114:103–111. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:1\(103\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:1(103))

83. Saleh F, Ramaswamy V, Georgas N et al (2016) A retrospective streamflow ensemble forecast for an extreme hydrologic event: a case study of Hurricane Irene and on the Hudson River basin. *Hydrol Earth Syst Sci* 20:2649–2667. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2649-2016>

84. Saleh F, Ramaswamy V, Georgas N et al (2018) Inter-comparison between retrospective ensemble stream-flow forecasts using meteorological inputs from ECMWF and NOAA/ESRL in the Hudson river sub-basins during hurricane irene (2011). *Hydrol Res*. <https://doi.org/10.2166/nh.2018.182>

85. Saxton KE, Rawls WJ (2006) Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydro-logic solutions. *Soil Sci Soc Am J* 70:1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>
86. Sensoy A, Uysal G, Sorman AA (2018) Developing a decision support framework for real-time flood management using integrated models. *J Flood Risk Manag* 11(2018):S866–S883. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12280>
87. Shakti PC, Nakatani T, Misumi R (2019) The role of the spatial distribution of radar rainfall on hydro-logical modeling for an urbanized river basin in Japan. *Water* 11:1703. <https://doi.org/10.3390/w11081703>
88. Shayannejad M, Ghobadi M, Ostad-Ali-Askari K (2022) Modeling of surface flow and infiltration during surface irrigation advance based on numerical solution of Saint-Venant equations using Preissmann's scheme. *Pure Appl Geophys* 179:1103–1113. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-02962-9>
- Skaggs RW, Khaleel R (1982) Hydrologic modelling of small watersheds. In: Haan CT, Johnson HP, Brakenstek DL (eds) *An ASAE monograph number 5 in a series*. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph
89. Srinivas R, Singh AP, Deshmukh A (2018) Development of a HEC-HMS-based watershed modelling system for identification, allocation, and optimization of reservoirs in a river basin. *Environ Monit Assess* 190:31. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6418-0>
90. Stancalie G, Antonescu B, Oprea C et al (2008) Representative flash flood events in Romania Case studies. In: Samuels P et al (eds) *Flood risk management: research and practice*, 1st edn. CRC Press, London, pp 1587–1596. <https://doi.org/10.1201/9780203883020>
91. Steissberg TE, McPherson MM (2011) HEC-GridUtil grid utility program managing gridded data with HEC-DSS user's manual; version 2.0. U.S. Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center (HEC), Davis, pp 1–124
92. Strapazan C, Petrut M (2017) Application of arc hydro and HEC-HMS model techniques for runoff simulation in the headwater areas of Covasna watershed (Romania). *Geogr Tech* 12(1):95–107. https://doi.org/10.21163/GT_2017.121.10

93. Talebmorad H, Ahmadnejad A, Eslamian S, Ostad-Ali-Askari K, Singh VP (2020) Evaluation of uncertainty in evapotranspiration values by FAO56-Penman-Monteith and Hargreaves-Samani methods. *Int J Hydrol Sci Technol* 10(2):135–147
94. Teal MJ, Allan R (2017) Creating a flood warning system for the San Diego River using HEC-RTS software. *World Environmental and Water Resources Congress 2017*, Sacramento, CA, American Society of Civil Engineers, pp 263–272. <https://doi.org/10.1061/9780784480601.023>
95. Thampapillai DJ, Musgrave WF (1985) Flood damage mitigation: a review of structural and nonstructural measures and alternative decision frameworks. *Water Resour Res* 21:411–424. <https://doi.org/10.1029/WR021i004p00411>
96. Tol RS (2016) The impacts of climate change according to the IPCC. *Clim Change Econ* 7:1640004. <https://doi.org/10.1142/S2010007816400042>
97. Unduche F, Tolossa H, Senbeta D et al (2018) Evaluation of four hydrological models for operational flood forecasting in a Canadian Prairie watershed. *Hydrol Sci J* 63:1133–1149. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1474219>
98. Usul N, Yilmaz M (2002) Estimation of instantaneous unit hydrograph with Clark's technique in GIS. 22nd international of ESRI user conference, ESRI on-line, San Diego, p 21. <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc02/pap1229/p1229.htm>. Last accessed 2021/12/04
99. Uysal G (2012) Developing a decision support system using HEC-ResSim model for operation of Yuvacik dam reservoir. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16386.17608>
100. Uysal G, Şensoy A, Şorman AA et al (2014) Evaluation of reservoir model integration with deterministic and probabilistic streamflow forecasts. *CUNY Academic Works*. https://academicworks.cuny.edu/cc_conf_hic/388. Last accessed 2021/12/08
101. Uysal G, Sensoy A, Sorman A et al (2016) Basin/reservoir system integration for real time reservoir operation. *Water Resour Manag* 30:1653–1668. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1242-9>

102. Uysal G, Schwanenberg D, Alvarado-Montero R et al (2018) Short term optimal operation of water supply reservoir under flood control stress using model predictive control. *Water Resour Manag* 32:583–597. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1828-x>
103. Vanani HR, Shayannejad M, Soltani Tudeshki AR et al (2017) Development of a new method for determination of infiltration coefficients in furrow irrigation with natural non-uniformity of slope. *Sustain Water Resour Manag* 3:163–169. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0091-x>
104. Wetterhall F, He Y, Cloke H et al (2011) Effects of temporal resolution of input precipitation on the performance of hydrological forecasting. *Adv Geosci* 29:21–25. <https://doi.org/10.5194/adgeo-29-21-2011>
105. Wijayarathne D, Coulibaly P (2020) Application of weather radar for operational hydrology in Canada— a review. *Can Water Resour J* 1:1. <https://doi.org/10.1080/07011784.2020.1854119>
106. Wijayarathne D, Coulibaly P, Boodoo S et al (2021) Use of radar quantitative precipitation estimates (QPEs) for improved hydrological model calibration and flood forecasting. *J Hydrometeorol* 22(8):2033–2053. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0267.1>
107. Willmott CJ (1981) On the validation of models. *Phys Geogr* 2:184–194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
108. World Bank (2018) World Bank’s “Romania water diagnostic report—moving toward EU compliance, inclusion, and water security.” World Bank, Washington, DC. [Online]. <http://documents.worldbank.org/curated/en/114311530025860150/pdf/127630-REVISED-W18010.pdf>. Last accessed 2021/01/09
109. Xie H, Zhou X, Vivoni ER et al (2005) GIS-based NEXRAD Stage III precipitation database: Automated approaches for data processing and visualization. *Comput Geosci* 31:65–76. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.09.009>

110. Xin Z, Shi Ke WuC et al (2019) Applicability of hydrological models for flash flood simulation in small catchments of hilly area in China. *Open Geosci* 11(1):1168–1181. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0089>
111. Yavuz O, Uysal G, Sensoy A et al (2012) Using HEC-HMS as a decision support system to minimize the downstream flooding risk in Yuvacık Dam basin. In: Proceedings, conference on water observation and information systems, Balwois, Ohrid, Macedonia
112. Ye J, He Y, Pappenberger F et al (2014) Evaluation of ECMWF medium-range ensemble forecasts of precipitation for river basins. *Q J R Meteorol Soc.* <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03160-0>
113. Yoo C, Ku J, Yoon J, Kim J (2016) Evaluation of error indices of radar rain rate targeting rainfall-runoff analysis. *J Hydrol Eng.* [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001393](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001393)
114. Yuan W, Liu M, Wan F (2019) Calculation of critical rainfall for small-basin flash floods based on the HEC-HMS hydrological model. *Water Resour Manag* 33:2555–2575. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02257-0>
115. Zhang Z, Koren V, Smith M et al (2004) Use of next generation weather radar data and basin disaggregation to improve continuous hydrograph simulations. *J Hydrol Eng* 9:103–115. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2004\)9:2\(103\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2004)9:2(103))
116. Zhang W, Villarini G, Vecchi GA et al (2018) Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by Hurricane Harvey in Houston. *Nature* 563:384–388. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0676-z>