

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Inginerie Civilă

Ing. Constantin CERNEAGĂ

MODELAREA NUMERICĂ A TERENULUI PENTRU COMBATEREA
INUNDAȚIILOR DIN ZONA DOBROGEI DE NORD

REZUMAT

Conducător științific

Prof.habil.dr.ing.Carmen Elena MAFTEI

BRAȘOV, 2025

Cuprins

	Pag. teză
CAPITOLUL I INTRODUCERE	5 <u>16</u>
CONTEXT	5 <u>16</u>
JUSTIFICAREA TEMEI	6 <u>23</u>
OBIECTIVE	7 <u>23</u>
CONȚINUTUL TEZEI	7 <u>24</u>
CAPITOLUL II MANAGEMENTUL RISCULUI LA INUNDAȚII	9 <u>25</u>
2.1. MANAGEMENTUL RISCULUI LA INUNDAȚII ÎN EUROPA	9 <u>25</u>
2.2. MANAGEMENTUL RISCULUI LA INUNDAȚII ÎN ROMÂNIA	9 <u>26</u>
2.2.2. Cadrul legislativ și instituțional	9 <u>26</u>
2.2.2. PMRI - CICLUL I de implementare a DIRECTIVEI INUNDAȚII	10 <u>28</u>
2.2.3. PMRI - CICLUL II de implementare a DIRECTIVEI INUNDAȚII	11 <u>31</u>
CAPITOLUL III MATERIALE ȘI METODE DE CERCETARE	13 <u>41</u>
3.1. METODE DE CALCUL A DEBITELOR PENTRU DIFERITE PROBABILITĂȚI DE DEPĂȘIRE.	13 <u>42</u>
3.1.1. Analiza frecvențială	13 <u>42</u>
3.1.2. Analiza regională	14 <u>53</u>
3.1.3. Modelarea hidrologică	14 <u>53</u>
3.2. MODELUL NUMERIC AL TERENULUI	14 <u>55</u>
3.3. HĂRȚILE DE HAZARD LA INUNDAȚII	15 <u>61</u>
3.4. METODOLOGIA PROPUȘĂ	17 <u>70</u>
CAPITOLUL IV CARACTERIZAREA AREALULUI STUDIAT	19 <u>72</u>
4.1. PREZENTAREA GENERALĂ A REGIUNII DOBROGEA	19 <u>72</u>
4.2. BAZINUL HIDROGRAFIC CASIMCEA	23 <u>80</u>
CAPITOLUL V REALIZAREA MODELULUI DIGITAL AL TERENULUI.....	27 <u>89</u>
5.1. MĂSURĂTORI TERESTRE	27 <u>89</u>
5.1.1. Echipamente utilizate și modul de operare.....	27 <u>89</u>
5.2. PROCESAREA ȘI REPREZENTAREA MODELULUI DIGITAL AL TERENULUI	29 <u>96</u>
CAPITOLUL VI MODELAREA INUNDAȚIILOR CU HEC-RAS	32 <u>103</u>
6.1. MODELAREA MATEMATICĂ CU PROGRAMUL HEC-RAS	32 <u>103</u>
6.2. MODELAREA UNIDIMENSIONALĂ	32 <u>104</u>
6.3. MODELAREA BIDIMENSIONALĂ	36 <u>109</u>

CAPITOLUL VII REZULTATE	39	113
7.1. REZULTATELE ANALIZEI FRECVENȚIALE	39	113
7.1.2. Analiza debitelor anuale maxime	39	113
7.1.2. Rezultatele analizei frecvențiale	40	114
7.2. REZULTATELE MODELĂRII 1D	47	125
7.3. REZULTATELE MODELĂRII 2D	51	131
CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI PERSPECTIVE VIITOARE	53	135
<i>Rezultatele cercetării</i>	53	135
<i>Contribuții personale</i>	54	140
<i>Perspective viitoare</i>	55	142
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	57	150

Mulțumiri

Înainte de toate, doresc să adresez cele mai sincere mulțumiri conducătorului meu de doctorat, doamnei Prof. Habil. Dr. Ing. Carmen Elena MAFTEI, pentru îndrumarea valoroasă, sprijinul constant și încrederea acordată de-a lungul întregului parcurs doctoral. Profesionalismul, exigența științifică și deschiderea sa au avut o contribuție esențială la formarea mea ca cercetător.

Mulțumesc, de asemenea, membrilor Comisiei de îndrumare pentru observațiile pertinente, sugestiile constructive și suportul oferit în dezvoltarea acestei teze. Apreciez implicarea și timpul dedicat, care au contribuit în mod semnificativ la clarificarea și aprofundarea temei de cercetare.

Exprim recunoștință față de cadrele didactice ale Facultății de Construcții din cadrul Universității „Ovidius” din Constanța, pentru formarea mea profesională și pentru sprijinul oferit de-a lungul anilor de studiu. În mod deosebit, îi mulțumesc domnului Conf. Univ. Dr. Ing. Constantin BUTA pentru generozitatea cu care și-a împărtășit cunoștințele și pentru încurajarea constantă.

Mulțumiri speciale adresez colegilor de la Administrația Bazinală de Apă Dobrogea-Litoral pentru colaborarea profesională, sprijinul logistic și disponibilitatea în furnizarea datelor necesare realizării acestei lucrări.

Familiei mele îi sunt profund recunoscător pentru răbdare, înțelegere și încurajare necondiționată. Sprijinul lor moral a fost fundamental în depășirea tuturor provocărilor întâmpinate pe parcursul acestei etape.

Dedic această lucrare, cu respect și recunoștință, tuturor celor care au crezut în mine, m-au încurajat și mi-au fost alături în momentele dificile. Fiecare contribuție, indiferent de dimensiune, a avut un rol important în finalizarea acestui proiect de suflet.

CAPITOLUL I INTRODUCERE

Context

Inundațiile reprezintă unele dintre cele mai distructive fenomene naturale, având un potențial ridicat de a genera pagube semnificative. Acestea constituie un fenomen natural distructiv [84] nu doar prin pierderile de vieți omenești și pagubele economice asociate, ci și prin impactul semnificativ asupra mediului înconjurător, manifestat prin modificarea morfologiei albiilor minore și majore ale râurilor, precum și prin reconfigurarea microreliefului în regiunile afectate [106]. În contextul actual al schimbărilor climatice și al intensificării intervențiilor antropice asupra mediului [85], atât frecvența, cât și extinderea acestora sunt în creștere.

Termenul ”inundație” este definit în Directiva 2007/60/CE privind ”evaluarea și gestionarea riscului la inundații”(DI) astfel: „acoperirea temporară cu apă a unui teren care nu este acoperit cu apă în mod obișnuit. Aceasta include inundații cauzate de râuri, torenți de munte, cursuri de apă intermitente de tip mediteraneean și inundații produse de mare în zonele costiere și nu include inundațiile produse de sistemele de canalizare” [87]. În acest termen se regăsesc și terenurile din zona de câmpie [106] care, datorită creșterii nivelului freatic până când acesta iese ”la zi”, sunt inundate temporar, fenomen care generează stagnarea prelungită a apei la nivelul solului.

Impactul inundațiilor este cel mai frecvent evaluat în termeni economici, sociali și ecologici.

România – o țară predispusă la INUNDAȚII

România se numără printre statele europene cel mai vulnerabile la riscurile generate de inundații. Cea mai devastatoare inundație produsă pe teritoriul României începând cu anul 1900 a avut loc în anul 1926 [92], soldându-se cu aproximativ 1.000 de decese. Precizăm și că intervalul 1960–2010 a fost marcat de o frecvență ridicată a fenomenelor hidrologice extreme, fiind raportate peste 400 de inundații majore [59]. Printre cele mai semnificative episoade se numără: inundațiile din mai 1970 (215 decese), iulie 1975 (60 de decese), iulie 1991 (108 decese) și august 2005 (33 de decese) [29], fiecare contribuind în mod semnificativ la evidențierea vulnerabilității hidrologice a țării.

Potrivit unei evaluări naționale de risc realizate în România [59], inundațiile se numără printre cele mai devastatoare tipuri de hazard, fiind caracterizate de un impact mediu asupra componentelor fizice, economice și socio-psihologice, precum și de o frecvență medie de apariție.

Pe fondul schimbărilor climatice [16], se estimează o creștere a frecvenței inundațiilor în numeroase bazine hidrografice (BH), în special în sezoanele de iarnă și primăvară. Totuși, proiecțiile privind frecvența și magnitudinea acestor evenimente extreme rămân marcate de un anumit grad de incertitudine.

În plus, în cadrul bazinului Dunării, România este identificată ca fiind statul cel mai expus impactului acestor schimbări climatice [14].

Regiunea Dobrogea-Litoral este o zonă foarte saracă în resurse de apă de suprafață, cele mai însemnate cantități de apă provin din precipitații, ceea ce generează, împreună cu

permeabilitatea relativ scăzută a solului, scurgeri importante de suprafață care dau naștere unor inundații frecvente.

Zonele cele mai afectate de inundațiile istorice, din spațiul hidrografic Dobrogea-Litoral, sunt râurile Topolog, Taița și Cartal (afluent al râului Casimcea). Pentru perioada 2010-2016, în Planul de Management al Riscului la Inundații (PMRI) – Ciclul II [116], sunt prezentate inclusiv principalele pagube generate de inundații în spațiul hidrografic Dobrogea-Litoral pe categorii de consecințe, acestea fiind prezentate în **Figura 1**.

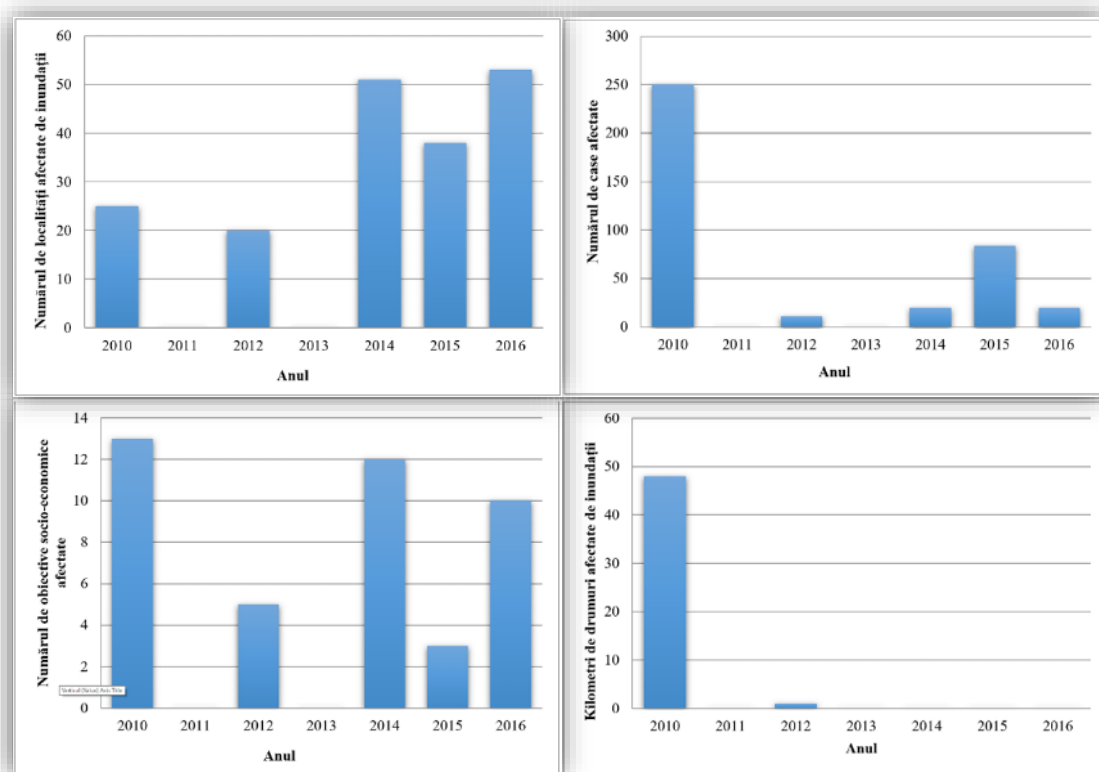


Figura 1 Pagubele generate de inundații în perioada 2010-2016 în spațiul hidrografic Dobrogea-Litoral [116]

Justificarea temei

Tema propusă își găsește relevanța în contextul necesității tot mai stringente de a îmbunătăți evaluarea hazardului la inundații în zone vulnerabile, cu accent pe utilizarea unor metode moderne de analiză spațială și modelare hidraulică. Localitățile Nistorești și Războieni, situate în BH Casimcea, reprezintă zone expuse inundațiilor, iar caracteristicile geomorfologice și climatice ale regiunii amplifică potențialul de producere a acestor fenomene extreme.

În pofida importanței acestor teritorii, actualele produse cartografice privind hazardul la inundații sunt fie insuficient detaliate, fie depășite tehnologic. În acest sens, utilizarea unui model digital de teren (MDT) de înaltă rezoluție – obținut prin tehnici moderne precum LiDAR (Light detection and ranging) – și integrarea sa în procese de simulare hidraulică unidimensională (1D)

și bidimensională (2D) contribuie la crearea unor hărți precise și utile pentru decidenți și autoritățile implicate în managementul riscului.

Lucrarea se aliniază direcțiilor strategice actuale privind adaptarea la schimbările climatice și consolidarea rezilienței în fața dezastrelor naturale, răspunzând cerințelor europene de actualizare și îmbunătățire a Hărților de Hazard și Risc la Inundații (HHRI). Rezultatele obținute pot constitui o bază solidă pentru acțiuni concrete de prevenire, planificare și intervenție în situații de urgență, precum și un model metodologic replicabil în alte bazine cu caracteristici similare.

Prin abordarea sa tehnică și științifică, tema contribuie la dezvoltarea cunoașterii în domeniul hidrologiei aplicate și susține necesitatea corelării datelor topografice detaliate cu procesele hidraulice simulate, în vederea protejării comunităților și a infrastructurii expuse la inundații.

Obiective

Obiectivul general

Lucrarea are ca scop determinarea limitelor de inundabilitate pentru localitățile Nistorești și Războieni, situate în BH Casimcea, prin utilizarea modelării hidraulice pe baza unui model digital de teren de înaltă rezoluție. Rezultatele obținute sunt analizate în raport cu hărțile de hazard la inundații existente în cadrul PMRI aferent spațiului hidrografic Dobrogea-Litoral, în vederea evaluării gradului de concordanță și completare a acestora.

Obiective specifice

Analiza rolului și relevanței utilizării unui model digital de teren cu rezoluție ridicată (LiDAR) în simulările hidraulice aplicate zonelor studiate;

Generarea hărților de hazard la inundații pentru sectoarele analizate, pe baza modelării 1D și 2D;

Identificarea posibilelor disfuncționalități între rezultatele obținute și datele oficiale existente, în scopul fundamentării unor recomandări privind măsurile de prevenție și intervenție în cazul producerii unor evenimente hidrologice similare.

Conținutul tezei

Prezenta teză este organizată în șapte capitole, fiecare abordând aspecte esențiale pentru atingerea obiectivelor generale și specifice ale cercetării:

Capitolul I este dedicat cadrului teoretic general privind fenomenul de inundație. Sunt prezentate tipurile de inundații și o analiză a principalelor evenimente hidrologice semnificative produse în perioada recentă, atât la nivel european și național, cât și la nivel local, în zonele studiate.

Capitolul II tratează în detaliu conceptul de management al riscului la inundații, cu accent pe cadrul legislativ european și național. Totodată, este descris modul de elaborare și implementare a Planurilor de Management al Riscului la Inundații la nivelul României.

Capitolul III oferă o trecere în revistă a metodele utilizate în cercetare și datele necesare realizării studiului. Sunt prezentate metodele de analiză frecvențiale de determinare a debitului cu diferite probabilități de depășire, necesare pentru cartarea inundațiilor. În final este prezentată metodologia propusă.

Capitolul IV cuprinde analiza caracteristicilor geomorfologice ale spațiului hidrografic Dobrogea-Litoral, precum și o descriere detaliată a bazinului hidrografic Casimcea. De asemenea, sunt prezentate datele disponibile despre stațiile hidrometrice existente pe cursul de apă Casimcea și afluenții acestuia.

Capitolul V prezintă etapele de realizare a măsurătorilor terestre efectuate în zonele analizate, având ca scop obținerea unor modele digitale de teren cu acuratețe ridicată. Activitățile au inclus zboruri aeriene și măsurători la sol, urmate de procesarea și validarea datelor. Modelele generate reflectă fidel morfologia terenului și stau la baza analizelor hidrologice ulterioare..

Capitolul VI este structurat în jurul procesului de modelare hidraulică unidimensională și bidimensională, realizată cu ajutorul programului HEC-RAS. Sunt prezentate etapele de construire a geometriei, definirea condițiilor de margine și configurarea parametrilor necesari simulării curgerii în regim permanent și nepermanent.

Capitolul VII include rezultatele obținute în urma analizei frecvențiale aplicate seriilor de date, precum și limitele suprafețelor potențial afectate de inundații în condițiile unor evenimente hidrologice similare celor studiate. În final, sunt evidențiate concluziile generale ale cercetării, alături de contribuțiile personale și direcțiile posibile pentru dezvoltări viitoare.

CAPITOLUL II MANAGEMENTUL RISCULUI LA INUNDAȚII

Managementul riscului la inundații reprezintă un proces complex și integrat, compus dintr-un set de măsuri și acțiuni menite să prevină, să diminueze și să gestioneze efectele negative ale acestor fenomene asupra populației, infrastructurii și mediului natural. Scopul principal al acestui demers este protejarea vieții umane, conservarea patrimoniului și asigurarea unei dezvoltări durabile în zonele vulnerabile.

2.1. Managementul riscului la inundații în Europa

Inundațiile constituie unul dintre cele mai frecvente și costisitoare tipuri de dezastre naturale care afectează Europa, generând consecințe semnificative asupra populației, infrastructurii și economiei. În acest context, gestionarea eficientă a riscului la inundații devine esențială pentru protejarea comunităților vulnerabile și pentru diminuarea impactului socio-economic al acestor fenomene. Uniunea Europeană (UE) a adoptat o serie de măsuri legislative și strategice menite să sprijine statele membre în eforturile lor de prevenire și adaptare. Un exemplu relevant este Directiva 2007/60/CE privind evaluarea și gestionarea riscului la inundații (DI), care impune elaborarea Hărților de Hazard și Risc la Inundații (HHRI), precum și întocmirea Planurilor de Management al Riscului la Inundații (PMRI), la nivelul fiecărui BH [03]. De asemenea, Strategia UE pentru adaptarea la schimbările climatice pune accent pe îmbunătățirea rezilienței infrastructurii și a sistemelor de protecție împotriva inundațiilor [04].

2.2. Managementul riscului la inundații în România

Managementul riscului la inundații în România reprezintă un proces complex și esențial pentru protejarea vieții populației, a mediului înconjurător, a patrimoniului cultural și a activităților economice. Acest proces implică implementarea unui ansamblu de măsuri și strategii destinate atât prevenirii producerii inundațiilor, cât și diminuării efectelor lor negative asupra comunităților și infrastructurii.

2.2.2. Cadrul legislativ și instituțional

Aderarea României la UE impune, printre altele, alinierea politicii naționale în domeniul gestionării resurselor de apă la strategiile și reglementările europene pe termen mediu și lung. În acest context, pentru a completa prevederile Directivei Cadru Apă (2000/60/CE), în anul 2007 a fost adoptată Directiva 2007/60/CE, cunoscută drept Directiva Inundații. Aceasta obligă statele membre să realizeze evaluarea și cartografierea pericolelor și riscurilor de inundații, precum și să elaboreze și implementeze planuri de gestionare a riscurilor de inundații (PMRI), cu scopul reducerii impactului acestora asupra populației, mediului și patrimoniului.

Instrumentul de implementare al DI, PMRI, prevede, conform cerințelor Directivei, parcurgerea a trei etape: (i) evaluarea preliminară a riscului la inundații (EPRI), (ii) elaborarea

HHRI precum și (iii) elaborarea PMRI (**Figura 2**). Procesul este unul ciclic, iar la fiecare 6 ani rezultatele etapelor parcurse sunt reevaluate, completate și actualizate.



Figura 2 Etapele procesului de implementare a DI [110]

Ca stat membru al UE, România a transpus această directivă în legislația națională prin Ordonanța de Urgență nr. 3/2010, care modifică și completează Legea Apelor nr. 107/1996, precum și prin Hotărârea Guvernului nr. 846/2010, ce aprobă Strategia Națională de Management al Riscului la Inundații (SNMRI) pe termen mediu și lung. Strategia a fost recent actualizată prin Hotărârea Guvernului nr. 1566/2024, reflectând adaptarea permanentă a politicilor naționale la cerințele și evoluțiile în domeniul gestionării riscului la inundații..

2.2.2. PMRI - CICLUL I de implementare a DIRECTIVEI INUNDAȚII

- A.** Conform articolului 4 din DI, EPRI impune statelor membre realizarea unei analize preliminare care să cuprindă descrierea evenimentelor istorice semnificative de inundații, precum și identificarea zonelor cu risc potențial semnificativ. Această analiză trebuie să abordeze atât perspectiva hazardului, evaluând frecvența și severitatea inundațiilor, cât și impactul acestora, prin evaluarea pagubelor și consecințelor produse asupra populației, infrastructurii și mediului.
- B.** HHRI, au fost elaborate, la nivelul României, pentru zonele desemnate ca având risc potențial semnificativ la inundații, în cadrul primei etape de implementare a DI - EPRI.
- C.** Conform cerințelor DI, până la data de 22 decembrie 2015, toate statele membre aveau obligația de a elabora PMRI-urile (cu raportare la CE – 22 martie 2016), pentru toate APSFR-urile, identificate conform Articolului 5 al Directivei și raportate CE în martie 2012. Pentru aceste zone, au fost elaborate inclusiv HHRI-urile, în conformitate cu Articolul 6, hărți ce au fost transmise CE în martie 2014.

2.2.3. PMRI - CICLUL II de implementare a DIRECTIVEI INUNDAȚII

România a finalizat primul ciclu de implementare a DI în anul 2016, respectând toate etapele impuse de această reglementare europeană. Procesul a cuprins realizarea EPRI, elaborarea HHRI, precum și adoptarea PMRI pentru fiecare Administrație Bazinală de Apă și Fluviul Dunărea. Cel de-al doilea ciclu al DI s-a încheiat prin **Hotărârea nr. 886 din 20 septembrie 2023 pentru actualizarea planurilor de management al riscului la inundații aferente celor 11 Administrații Bazinale de Apă și Fluviului Dunărea de pe teritoriul României, aprobate prin Hotărârea Guvernului nr. 972/2016**, etapa 1 fiind implementată între 2018-2019 și raportată către CE în septembrie 2019, iar celelalte 2 etape potrivit calendarului prezentat în **Figura 3**.

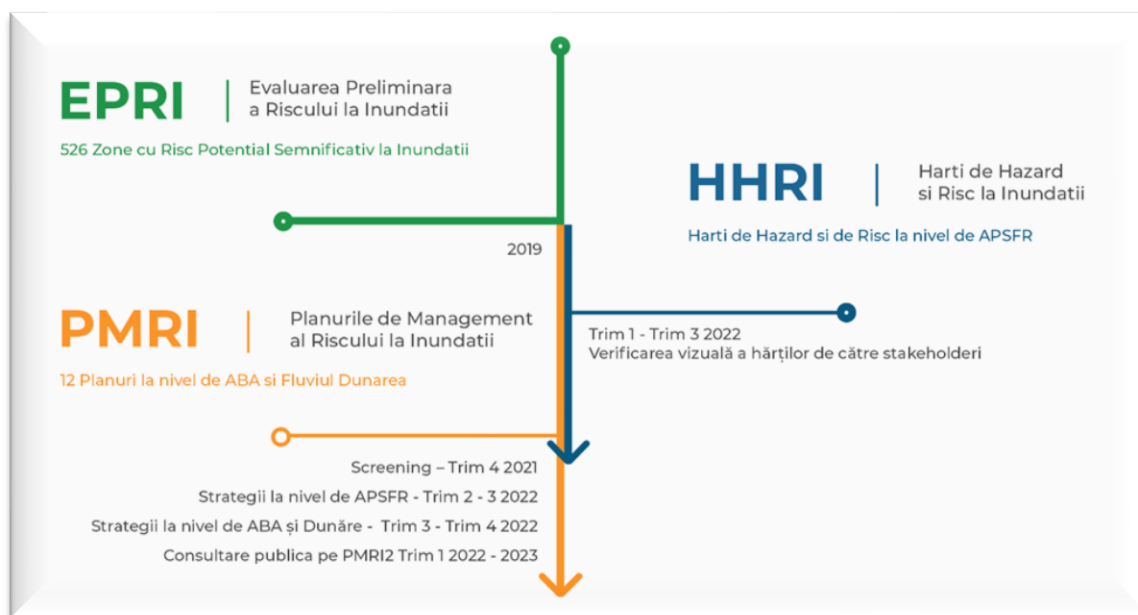


Figura 3 Calendarul privind implementarea ciclului II a DI [110]

Implementarea ultimelor două etape ale ciclului II s-a realizat cu fonduri europene puse la dispoziția României prin intermediul Programului Operațional Capacitate Administrativă (POCA) 2014-2020, *Sprijin pentru acțiuni de consolidare a capacității autorităților și instituțiilor publice centrale* Obiectivul Specific 1.1 *Dezvoltarea și introducerea de sisteme și standarde comune în administrația publică ce optimizează procesele decizionale orientate către cetățeni și mediul de afaceri în concordanță cu SCAP* prin proiectul *Întărirea capacității autorității publice centrale în domeniul apelor în scopul implementării etapelor a 2-a și a 3-a ale Ciclului II al Directivei Inundații – RO-FLOODS*. [115].

Spre deosebire de ciclul I de implementare a DI, când au fost analizate inundații istorice petrecute într-o perioadă mai îndelungată, pentru care nu au fost disponibile informații detaliate privind consecințele negative generate, datele din Ciclul II de implementare, aferente intervalului 2010–2016, au oferit un grad mult mai ridicat de documentare. Această îmbunătățire a calității informațiilor a permis realizarea unei analize mai riguroase și mai precise asupra impactului negativ semnificativ al inundațiilor istorice.

În plus, în cadrul celui de-al doilea ciclu de implementare a DI, prin proiectul RO-FLOODS, au fost elaborate metodologii noi pentru elaborarea HHRI la nivelul României. Acestea

au fost întocmite luând în considerare raportul CE privind HHRI [33], PMRI și auditul UE privind implementarea DI în România [37] și cele mai bune practici din Europa.

Pentru a concluziona, implementarea Directivei Europene privind gestionarea riscului la inundații în România a presupus nu doar adaptarea cadrului instituțional și legislativ, ci și adoptarea unor noi abordări în evaluarea și cartarea riscului la inundații. Această tranziție a implicat multiple provocări, în special în ceea ce privește actualizarea metodologiilor utilizate pentru determinarea hazardului și realizarea hărților de risc.

Cu toate acestea, aplicarea noii metodologii nu a fost uniformă la nivel național. În regiuni precum Dobrogea, nu au fost propuse râuri sau sectoare de râu pentru remodelare hidraulică în Ciclul II, deși au fost constatate deficiențe precum discontinuitatea limitelor de inundabilitate în zonele localităților traversate de râuri sau în extravilan.

CAPITOLUL III MATERIALE ȘI METODE DE CERCETARE

În vederea atingerii obiectivelor stabilite, studiul de față a presupus aplicarea unei metodologii de cercetare mixte, care a îmbinat metode cantitative și calitative. Această abordare a fost utilizată pentru o analiză aprofundată a fenomenelor de inundație produse în BH Casimcea, pe raza localităților Războieni și Nistorești, cât și pentru cartografierea extinderii inundațiilor în aceste zone.

Cercetarea cantitativă furnizează date numerice și statistici obiective, care permit măsurarea și analiza riguroasă a variabilelor implicate, în timp ce cercetarea calitativă urmărește explorarea în profunzime a perspectivelor, a motivațiilor și a experiențelor individuale sau colective. Prin combinarea acestor două abordări metodologice, se obține o triangulare a datelor care nu doar consolidează validitatea concluziilor formulate, ci oferă și o înțelegere mai complexă și mai nuanțată a relațiilor identificate în cadrul studiului.

Datele utilizate în cadrul acestui studiu sunt structurate în două categorii principale: (i) date hidrologice privind debitele râului Casimcea și ale afluenților săi și (ii) date topografice. Informațiile hidrologice, constând în serii de debite medii și maxime înregistrate la stațiile hidrometrice, sunt esențiale atât pentru caracterizarea regimului hidrologic al râului Casimcea și al afluenților săi, cât și pentru determinarea debitelor maxime cu o probabilitate de depășire de 1%, necesare în cadrul procesului de modelare hidraulică.

3.1. Metode de calcul a debitelor pentru diferite probabilități de depășire

Pentru determinarea debitelor corespunzătoare nivelurilor de hazard cerute prin DI se pot folosi următoarele trei metode [73,74]:

- Analiza frecvențială
- Analiza regională
- Modelarea hidrologică

3.1.1. Analiza frecvențială

Analiza frecvențială reprezintă o metodă statistică de predicție utilizată pentru interpretarea evenimentelor înregistrate în trecut, specifice unui proces dat (de natură hidrologică sau de altă natură), cu scopul de a estima probabilitatea de apariție a unor valori viitoare. Predicția implică definirea și aplicarea unui model frecvențial, exprimat printr-o ecuație matematică ce descrie comportamentul statistic al unei variabile aleatoare, prin funcția de distribuție a probabilității [79].

Aplicarea analizei frecvențiale presupune, în principal, parcurgerea unor etape rezumate grafic în **Figura 4**:

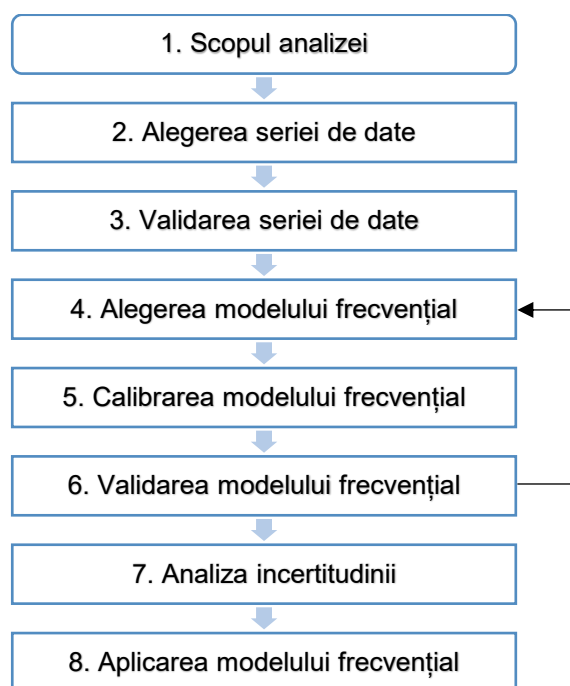


Figura 4 *Etapele analizei frecvențiale [78]*

3.1.2. Analiza regională

Analiza regională a frecvenței inundațiilor reprezintă o metodă utilizată pentru estimarea debitelor maxime în locații cu date hidrometrice insuficiente, prin transferul informației din regiuni omogene hidrologic. Această abordare presupune identificarea unor regiuni similare din punct de vedere climatic, morfologic și hidrologic, aplicarea unor modele statistice comune și estimarea indicatorilor de frecvență, cum ar fi debitele cu probabilitate de 1%, 2% sau 10% [77]. Una dintre cele mai frecvente metode folosite este cea a momentelor L (L-moments), care permite derivarea parametrilor distribuției extreme într-un mod robust și stabil [56]. În contextul aplicării DI, analiza regională este recomandată acolo unde seriile de observații sunt scurte sau lipsesc, contribuind astfel la o estimare coerentă a hazardului la inundații.

3.1.3. Modelarea hidrologică

Modelarea hidrologică este un proces esențial în evaluarea riscului la inundații, întrucât permite simularea scurgerii de suprafață în funcție de precipitații, morfologia bazinului hidrografic, caracteristicile solului și acoperirea terenului. Această modelare se realizează pe întreg BH și constă în calculul hidrografelor de viitură pentru subbazine, propagarea și compunerea acestora de-a lungul rețelei hidrografice.

3.2. Modelul numeric al terenului

Termenul de „model numeric al terenului”, utilizat pentru prima dată în 1958 de către Miller și Laflamme [103], a fost definit drept „o reprezentare statistică a suprafeței continue a terenului utilizând un număr mare de puncte a căror coordonate orizontale (x, y) împreună cu altitudinea (z) sunt cunoscute, reprezentare realizată într-un sistem de coordonate arbitrar”.

Reprezentare terenului se bazează în principal pe altitudine, ce poate reflecta relieful sau alte detalii topografice, motiv pentru care termenul general folosit este „teren”.

În cazul în care se consideră și componentele subterane ale terenului (structura solului și geologia), se obține o reprezentare tridimensională complexă, acoperind conceptual noțiunea de Model Numeric al Terenului (MNT). Totuși, deoarece în practică este utilizată preponderent suprafața terenului, termenul adecvat este de Model Numeric al Suprafeței Terenului (MNST).

Termenul complet în domeniul geomorfologiei pentru aceste reprezentări digitale ale altitudinii reliefului este Modelul Numeric al Altitudinii Suprafeței Terenului (MNAST). Variantele mai scurte, precum MDT sau MDE, reprezintă subcategorii ale MNT-ului, concentrându-se strict pe reprezentarea altitudinii terenului [90].

Astfel, un MDT sau MDE reprezintă o suprafață matematică ce aproximează digital suprafața topografică terestră, fiind utilizabil în multiple aplicații militare sau civile ce implică date topografice.

Achiziția datelor spațiale necesare pentru generarea MDT sau MDE se realizează prin tehnologii capabile să colecteze un volum mare de informații într-un timp scurt, cum ar fi LiDAR (senzor laser aeropurtat) [61], fotogrammetria aeriană sau sonarul, precum și LiDAR-ul pentru prospecțiuni batimetrice în zone acvatice.

În concluzie, procesul de generare a modelelor numerice de teren implică în principal două etape esențiale: (i) achiziția datelor spațiale și (ii) construcția modelului digital.

3.3. Hărțile de hazard la inundații

În procesul de elaborare a hărților referitoare la inundații, sunt esențiale patru componente fundamentale:

- i) determinarea nivelului de hazard sau pericol,
- ii) stabilirea scării adecvate pentru hărțile de hazard și risc la inundații,
- iii) aplicarea metodologiilor corecte pentru estimarea debitelor asociate diferitelor niveluri de hazard,
- iv) utilizarea tehnicilor de modelare a fenomenelor de inundație.

A. Hazardul la inundații

Hazardul reprezintă una dintre componentele fundamentale ale riscului, fiind definit ca probabilitatea apariției, într-un interval temporal specific, a unui fenomen cu potențial distructiv asupra populației și mediului înconjurător. Din perspectiva hidrologică, hazardul se exprimă prin probabilitatea de depășire a debitelor maxime și include fenomene precum seceta, inundațiile și procesele asociate, cum ar fi eroziunea solului. În prezenta lucrare, accentul se concentrează asupra hazardului generat de inundații.

În cazul României, în concordanță cu prevederile DI, sunt stabilite trei niveluri de calcul pentru hazard:

- evenimente frecvente, perioadă de revenire 10 ani;
- evenimente de probabilitate medie, perioadă de revenire 100 de ani;
- evenimente extreme, perioadă de revenire 1000 de ani.

Chiar dacă evenimentele hidrologice asociate claselor de hazard mediu și, în special, celor de hazard redus, se caracterizează prin perioade medii de depășire/ foarte mari (deci o probabilitate redusă de apariție), magnitudinea acestora și consecințele potențiale sunt de natură catastrofală. Din acest motiv, includerea acestor scenarii extreme în procesul de cartografiere a hazardului la inundații a devenit o necesitate.

B. Scara hărților de hazard/ risc la inundații

Determinarea scării HHRI depinde în mod direct de scopul pentru care acestea sunt elaborate. Atunci când hărțile sunt destinate creșterii gradului de conștientizare publică, ele trebuie să permită cetățenilor să identifice cu ușurință zonele expuse riscului de inundații în raport cu interesele personale, cum ar fi locuința sau locul de muncă [33]. În astfel de cazuri, se recomandă utilizarea unor scări cuprinse între 1:10.000 și 1:25.000, în contrast cu scările utilizate în planificarea națională sau regională, care variază între 1:100.000 și 1:500.000. Pe de altă parte, pentru analiza detaliată a parametrilor hidraulici, precum viteza de curgere a apei, este necesară o rezoluție cartografică superioară, corespunzătoare unor scări de 1:1.000 sau 1:5.000.

Conform ghidului de bune practici pentru cartografierea inundațiilor [42], alegerea scării cartografice trebuie corelată cu nivelul decizional și cu tipul de informații necesare. Sunt identificate patru categorii principale de utilizare a hărților de inundații: (1) strategie și planificare în managementul riscului la inundații, (2) gestionarea utilizării terenurilor, (3) planificarea și managementul situațiilor de urgență și (4) informarea și conștientizarea publicului, inclusiv sectorul asigurărilor. Pentru fiecare dintre aceste domenii, sunt propuse scări diferite, adaptate atât nivelului regional, cât și celui local.

C. Modelarea inundațiilor

Modelarea inundațiilor se realizează, în general, prin intermediul simulărilor hidraulice asistate de programe specializate. Aceste modele permit estimarea nivelurilor de apă asociate diverselor scenarii hidrologice, pe baza cărora pot fi trasate limitele de inundabilitate corespunzătoare unor diferite probabilități de depășire.

Modelarea matematică a curgerii în albie, cu accent pe procesele de formare și propagare a undelor de viitură, reprezintă un demers complex, dar deosebit de util în contextul managementului integrat al resurselor de apă și al planificării spațiale.

Modelele numerice utilizează diferite formulări matematice în funcție de regimul de curgere analizat. În cazul simulărilor de inundații, cele mai frecvent utilizate sunt modelele ce se bazează pe sistemul de ecuații al curgerii nepermanente în albie (ecuațiile Saint-Venant), în regim 1D sau 2D.

Modelul unidimensional - 1D

În regim de curgere nepermanentă, distribuția vitezei prezintă componente și în planul secțiunii transversale, motiv pentru care modelarea matematică presupune o serie de simplificări conceptuale. Acestea permit captarea caracteristicilor dominante ale proceselor hidrodinamice reale, eliminând totodată elementele cu influență secundară. Descrierea matematică a curgerii neuniforme în regim unidimensional se bazează pe sistemul de ecuații Saint-Venant.

Modelul bidimensional - 2D

Modelarea curgerii în regim bidimensional este recomandată în cazul cursurilor de apă cu albie largi, adâncimi reduse în raport cu lăţimea ($B \gg h_B$ şi $h_B \gg h$), şi o geometrie neregulată, cu variaţii pronunţate ale reliefului şi fluxului. Aceste condiţii hidromorfologice permit introducerea componentelor de viteză mediate pe adâncime pentru fiecare punct al domeniului de calcul. Astfel, în cadrul modelării bidimensionale, viteza curgerii este exprimată prin componentele $u(x, y, t)$ şi $v(x, y, t)$, corespunzătoare direcţiilor longitudinală şi transversală, determinate ca valori medii pe verticală.

În practica europeană, programele cele mai frecvent utilizate pentru modelarea curgerii în albie sunt **MIKE** şi **HEC-RAS**, acestea oferind capacităţi avansate de analiză în regimuri unidimensionale şi bidimensionale, contribuind astfel la îmbunătăţirea proceselor decizionale în managementul riscului la inundaţii.

3.4. Metodologia propusă

În urma analizei critice a metodelor existente privind determinarea parametrilor topografici şi hidrologici necesari elaborării hărţilor de hazard la inundaţii, metodologia propusă în cadrul acestui studiu constă într-o abordare integrată, structurată în următoarele etape:

- [1] Elaborarea unui MDT de înaltă rezoluţie, care să permită o reprezentare detaliată a morfologiei terenului, esenţială pentru cartografierea precisă a extinderii inundaţiilor. Acest MDT urmăreşte să corecteze limitările identificate în cadrul hărţilor de hazard elaborate în PMRI – Ciclul I de implementare al DI, conform concluziilor formulate în **Capitolul II**.
- [2] Estimarea debitelor caracteristice pentru diferite probabilităţi de depăşire (corespunzătoare timpilor de revenire). Deoarece BH analizat este monitorizat hidrometric, estimarea debitelor se va realiza prin analiză frecvenţială, în conformitate cu pragurile de cartografiere stabilite la nivel naţional în aplicarea DI.
- [3] Determinarea parametrilor hidraulici ai inundaţiei – limitele extinderii, adâncimea şi viteza de curgere – utilizând simulări numerice în HEC-RAS, atât în regim 1D, cât şi 2D, pentru debitele caracteristice identificate în etapa anterioară.
- [4] Cartografierea zonelor potenţial inundabile, prin combinarea rezultatelor hidraulice (nivelul suprafeţei libere a apei) cu MDT-ul, în scopul elaborării hărţilor de hazard la inundaţii corespunzătoare scenariilor analizate.
- [5] Compararea şi validarea rezultatelor obţinute în raport cu hărţile de hazard existente în cadrul PMRI pentru arealele studiate, în vederea evidenţierii diferenţelor şi formulării de propuneri pentru actualizarea şi îmbunătăţirea acestor produse cartografice.

Pentru realizarea primei etape a metodologiei propuse, s-a utilizat un MDT cu rezoluţie ridicată, obţinut prin integrarea mai multor surse de date: ortofotoplanuri, măsurători topogeodezice şi tehnologia LiDAR. Datele au fost prelucrate cu ajutorul programelor DJI Terra şi HEC-RAS, în vederea obţinerii unei reprezentări detaliate a morfologiei terenului.

În ceea ce priveşte etapa a doua, au fost analizate şiruri de date hidrologice disponibile pentru râul Casimcea, constând în debite medii şi maxime. Debitele medii au fost utilizate pentru caracterizarea regimului hidrologic general, în timp ce debitele maxime au fost utilizate pentru

determinarea debitelor cu probabilități de depășire de 10%, 1% și 0,1% – praguri relevante în contextul DI. Estimările s-au realizat prin analiză frecvențială utilizând programul Hydrognomon¹, fiind testate mai multe legi de distribuție a probabilității, în vederea selecției celei mai potrivite pentru datele disponibile.

Pentru estimarea principalilor parametri de inundație – respectiv extinderea spațială a inundației, adâncimea apei și viteza de curgere – au fost realizate simulări hidraulice în cadrul programului HEC-RAS, care integrează un model hidrodinamic robust. Acest instrument oferă două opțiuni de modelare, în funcție de complexitatea terenului și de obiectivele analizei:

- Modelarea 1D, care utilizează soluția unidimensională a ecuației lui Saint-Venant. Aceasta presupune definirea unor secțiuni transversale perpendiculare pe axul râului, între care se calculează parametri precum adâncimea medie a apei și viteza curgerii. Între malurile secțiunii și limita zonei inundabile, valorile sunt interpolate. Modelul 1D presupune o ipoteză de curgere unidirecțională, valabilă în general pentru văile înguste, bine conturate, unde curgerea are o direcție dominantă spre aval. În aceste condiții, curgerea laterală este neglijată, considerându-se că propagarea inundației are loc instantaneu în plan transversal. Totuși, această ipoteză nu mai este valabilă în cazul văilor largi, cu pante reduse, al conurilor aluvionare sau al zonelor deltaice, unde distribuția curgerii devine complexă.
- Modelarea 2D nu presupune o direcție predefinită a curgerii, ci calculează distribuția vitezei și adâncimii pe ambele direcții spațiale (x și y), rezolvând forma bidimensională a ecuației Saint-Venant. Această abordare este mai potrivită pentru zonele cu topografie complexă, unde curgerea poate devia semnificativ de la direcția principală, și permite o reprezentare mai realistă a propagării inundației.

Aplicarea ambelor tipuri de modelare în cadrul studiului de față are la bază următoarele considerente:

- i. Inundațiile din regiunea Dobrogea apar preponderent în zone cu pante mici sau în zone deltaice (ex. râul Taița), adesea caracterizate de un grad ridicat de urbanizare și o morfologie complexă;
- ii. Modelele 2D furnizează informații suplimentare esențiale pentru evaluarea riscului la inundații, în special în contextul dezvoltării teritoriale și al protecției infrastructurii.

În final, rezultatele obținute prin simulare oferă o imagine detaliată asupra zonelor studiate, în raport cu evenimentele istorice cunoscute, și sunt analizate comparativ cu informațiile și produsele cartografice disponibile la nivelul PMRI pentru a evalua potențialele îmbunătățiri ale acestora.

¹ <https://hydrognomon.openmeteo.org/>

CAPITOLUL IV CARACTERIZAREA AREALULUI STUDIAT

4.1. Prezentarea generală a regiunii Dobrogea

Regiunea Dobrogea, situată în sud-estul României, este alcătuită din județele Tulcea (în nord) și Constanța (în sud). Limitele sale naturale sunt bine definite: la vest, fluviul Dunărea în cursul său inferior înconjoară Podișul Moesic, iar la nord-vest se află Podișul Casimcei și Munții Măcinului; spre nord-est, granița este marcată de brațul Chilia al Deltei Dunării, iar la est de țărmul Mării Negre, care constituie limita litoralului românesc.

În ansamblu, Dobrogea este formată din două mari unități morfostructurale distincte, care diferă prin aspectul lor, altitudine, modul de formare și vârstă: Podișul Dobrogei, pe de o parte, și Lunca, Delta Dunării, câmpia și complexul lagunar Razelm-Sinoe, pe de altă parte. (**Figura 5**).

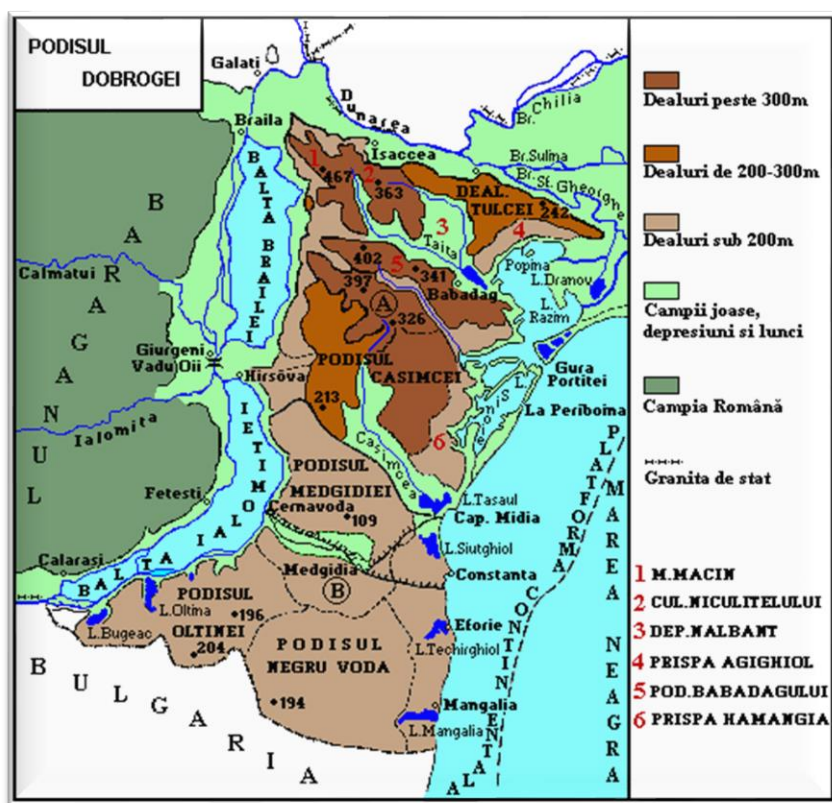


Figura 5 Podișul Dobrogei²

Relieful

Dobrogea se configurează ca un podiș relativ rigid, constituit din roci vechi (șisturi verzi, granite) și formațiuni sedimentare mezozoice și neozoice, supus unei erodări îndelungate cauzate de factorii externi de modelare. Relieful său este domol, ușor ondulat, cu altitudini moderate, cuprinse între 200 și 300 m. Partea nordică se evidențiază prin altitudini mai ridicate, ajungând local până la 350–400 m, atingând maximul de 467 m în vârful Pricopan, situat în Munții

² <https://www.oocities.org/dmarioara/index.htm>

Măcinului. În contrast, sectorul sudic prezintă altitudini sub 200 m, cu o valoare maximă de 204 m în zona Deliorman. Podișul Dobrogei Centrale reprezintă singura și cea mai veche unitate morfostructurală din România, caracterizată printr-un relief specific de podiș, format din platouri puțin fragmentate, rezultat al erodării avansate, aproape de nivelarea completă (peniplenizare) a unui orogen, cratonizat încă de la începutul Paleozoicului [01]. Limitele sale nordică și sudică sunt delimitate de importante sisteme de falii profunde, respectiv Peceneaga-Camena la nord și Capidava-Ovidiu la sud. (Figura 6) [58].

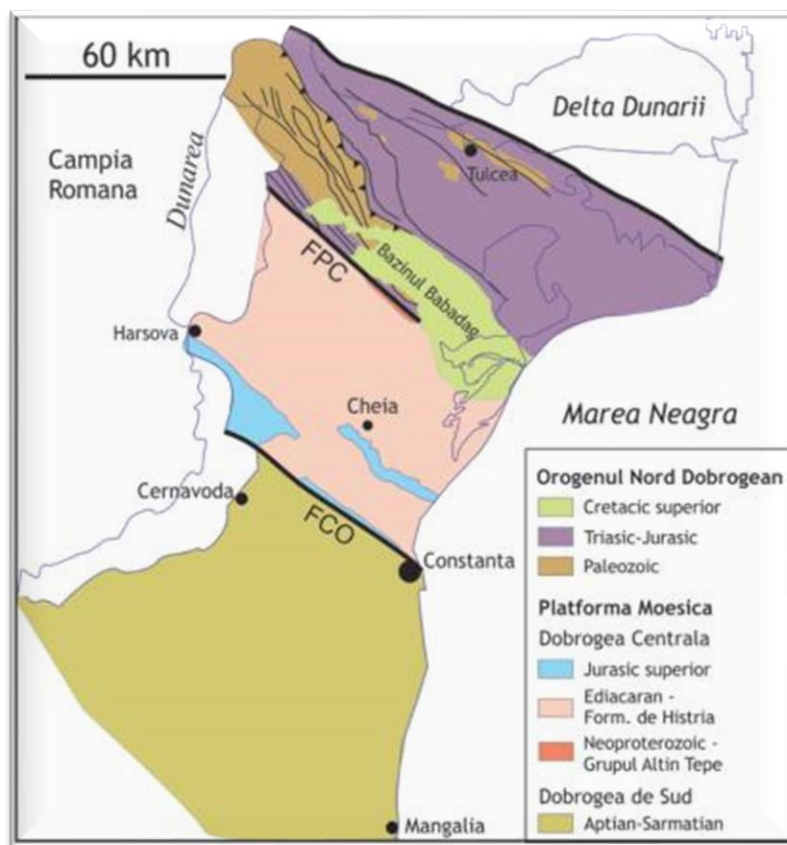


Figura 6 Harta geologică simplificată a Dobrogei [97]

Solul

Relieful, roca de solificare, clima, apele și vegetația, prin caracteristicile lor regionale și manifestările locale, influențează direct apariția diferitelor tipuri de soluri. Aceste componente prezintă particularități specifice, în funcție de poziția geografică a zonei și de interferența condițiilor naturale tipice zonelor de stepă est-europene. Pe acest fond cu trăsături fizico-geografice de tranziție, intervin o serie de factori care diversifică tipologia solurilor. Loessul și depozitele loessoide au cea mai extinsă răspândire, acoperind aproape în totalitate Podișul Dobrogean, conferind astfel, din perspectiva materialului parental, un grad ridicat de omogenitate a învelișului de sol, reprezentând un factor esențial în caracterizarea zonală.

Geologia

Din perspectiva geomorfologică și evoluției teritoriale, Dobrogea reprezintă o zonă de tranziție complexă, unde se întâlnesc atât forme de relief foarte vechi, precum Munții Măcin — relicve ale orogenezei hercinice — cât și forme recente, generate de procese aluviale active, exemplificate de Delta Dunării. Regiunea este structurată în trei mari blocuri morfostructurale

distincte: Dobrogea de Nord, Dobrogea Centrală și Dobrogea de Sud, fiecare manifestând caracteristici specifice atât în ceea ce privește compoziția litologică, cât și dinamica geologică și geomorfologică.

Clima

Climatul Dobrogei este modelat de influențele climatului continental excesiv, ale climatului submediteranean și ale Mării Negre, acestea manifestându-se de-a lungul fâșiei litoralului. Majoritatea regiunii prezintă un climat caracterizat prin ariditate, cu temperaturi medii anuale situate între 10 și 11°C, temperaturi estivale ridicate, în jur de 22-23°C, precipitații reduse, aproximativ 400 mm/an, precum și frecvența zilelor tropicale și a secetelor. O particularitate distinctivă a Dobrogei o constituie faptul că zona litorală, alături de Delta Dunării, reprezintă cea mai secetoasă regiune a țării, cu precipitații medii anuale ce depășesc rar 400 mm, situându-se sub valorile înregistrate în interiorul podișului. Totodată, climatul temperat continental al Dobrogei, deși marcat de ariditate, se distinge printr-o torențialitate accentuată a precipitațiilor.

Un aspect climatic deosebit de relevant în Dobrogea de Nord, cu impact semnificativ în special asupra zonei Deltei Dunării, îl reprezintă regimul vânturilor. Acesta se caracterizează printr-o frecvență și intensitate crescute în special în lunile de toamnă și iarnă, perioadă în care influența anticlonilor continentali devine dominantă. Aceste sisteme atmosferice favorizează manifestarea unor vânturi puternice, cu viteze ce pot depăși frecvent pragul de 20 m/s, generând fenomene de eroziune eoliană accentuată, influențe asupra microclimatului local și impact asupra hidrodinamicii fluviului și a zonelor umede adiacente.

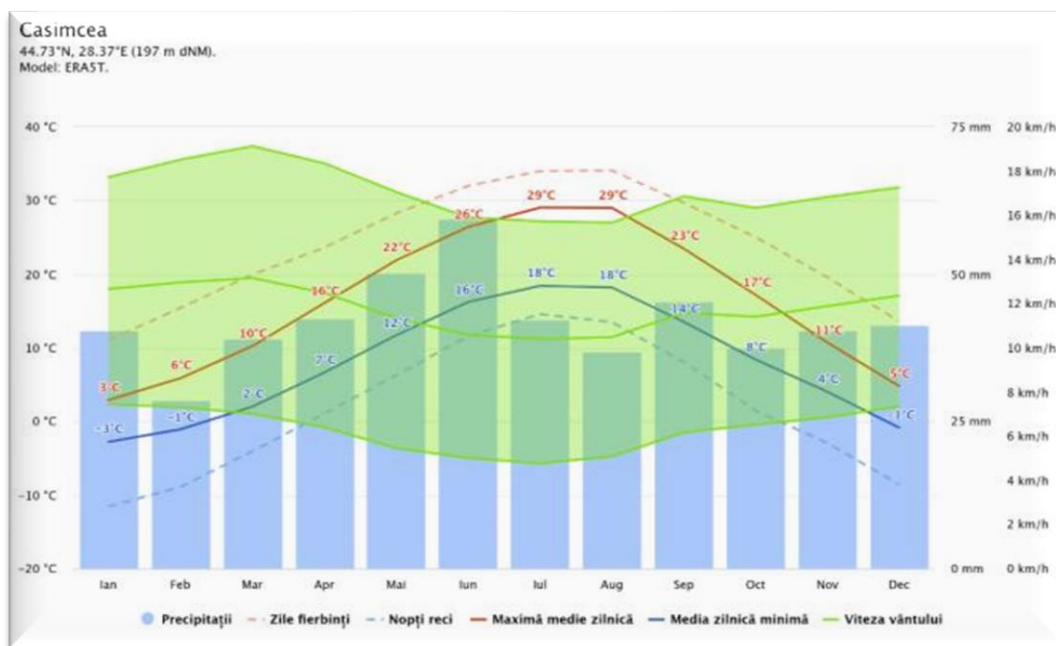


Figura 7 Temperatura și precipitațiile medii - Casimcea³

Linia roșie continuă reprezintă temperatura maximă medie zilnică, adică valoarea medie a temperaturilor maxime înregistrate în cursul unei zile, pentru fiecare lună a anului, în stația meteorologică Casimcea. În mod similar, linia albastră continuă indică temperatura minimă medie zilnică, reflectând media temperaturilor minime înregistrate zilnic pe parcursul fiecărei luni.

³ https://www.meteoblue.com/ro/vreme/historyclimate/climatemodelled/casimcea_rom%3a2nia_682606

Totodată, liniile punctate, roșie și albastră, evidențiază media temperaturii celei mai calde zile, respectiv a celei mai reci nopți, calculate pe un interval de 30 de ani, subliniind astfel valorile extreme mediate lunar.

Hidrografia

Rețeaua hidrografică aferentă spațiului hidrografic Dobrogea-Litoral include 16 cursuri de apă permanente (**Figura 8**), cu o lungime totală cumulată de 572 km. Din punct de vedere al repartiției pe bazine hidrografice, 71% din această lungime revine bazinului Litoral, iar 29% bazinului Dunării. La nivel regional, se constată că 90% din lungimea totală a acestor cursuri este localizată în Dobrogea de Nord, în timp ce Dobrogea de Sud deține doar 10%, reflectând astfel o distribuție neuniformă a rețelei hidrografice.

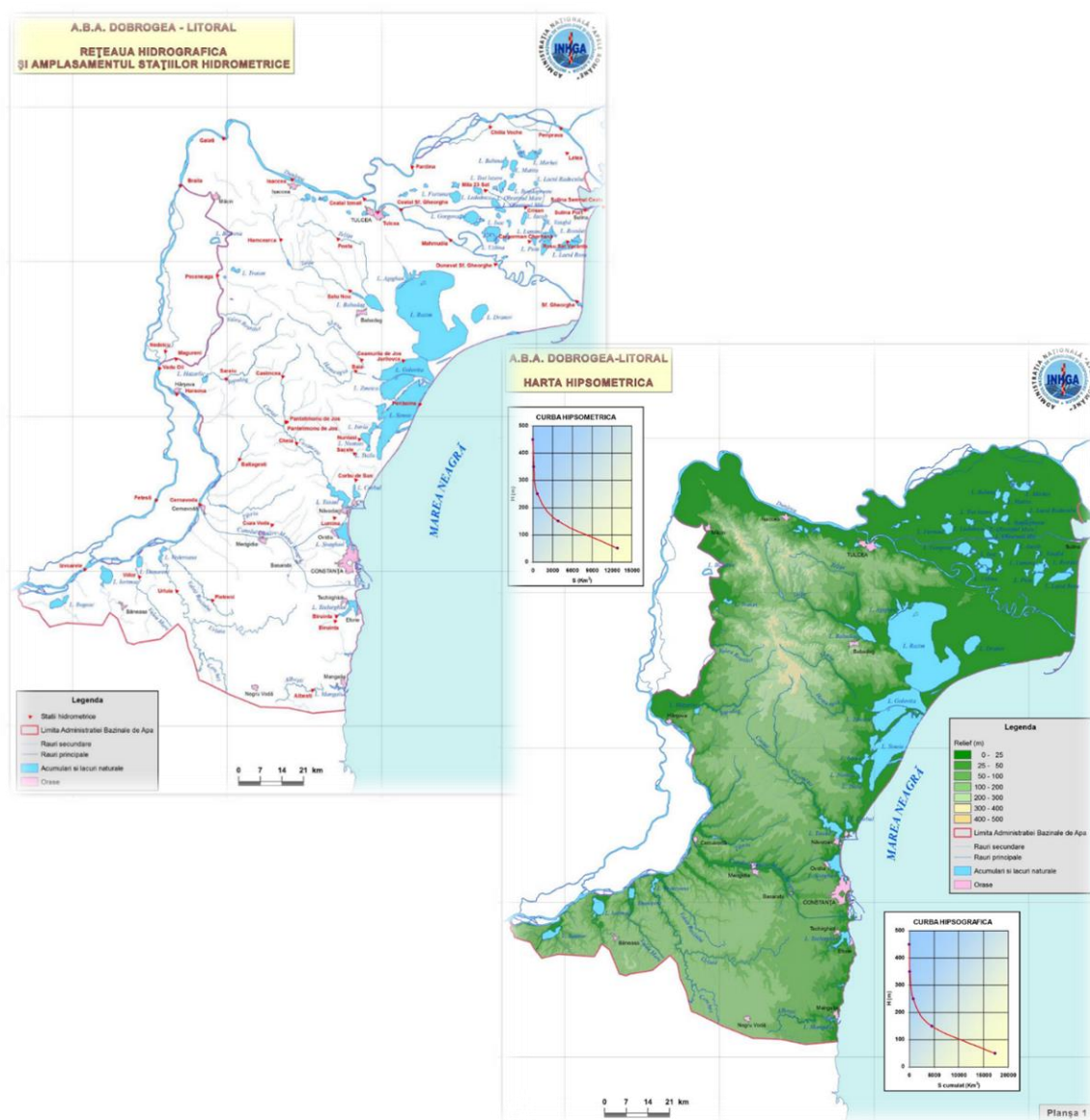


Figura 8 Rețeaua hidrografică și Harta hipsometrică [114]

Râurile interioare principale sunt: Taița și Telița, care se varsă în lacul Babadag; Slava, care se varsă în lacul Golovița; Casimcea, cel mai important râu al regiunii, care se varsă în lacul

Taşaul; și Topolog. În sudul Dobrogei se află cursuri de apă nepermanente, care se varsă în Dunăre prin limanele fluviale dintre Ostrov și Cernavodă.

4.2. Bazinul hidrografic Casimcea

Prezentarea realizată în acest subcapitol are la bază articole [26,27,75] publicate în IOPscience⁴, Springer Nature Link⁵ and Hydrology⁶.

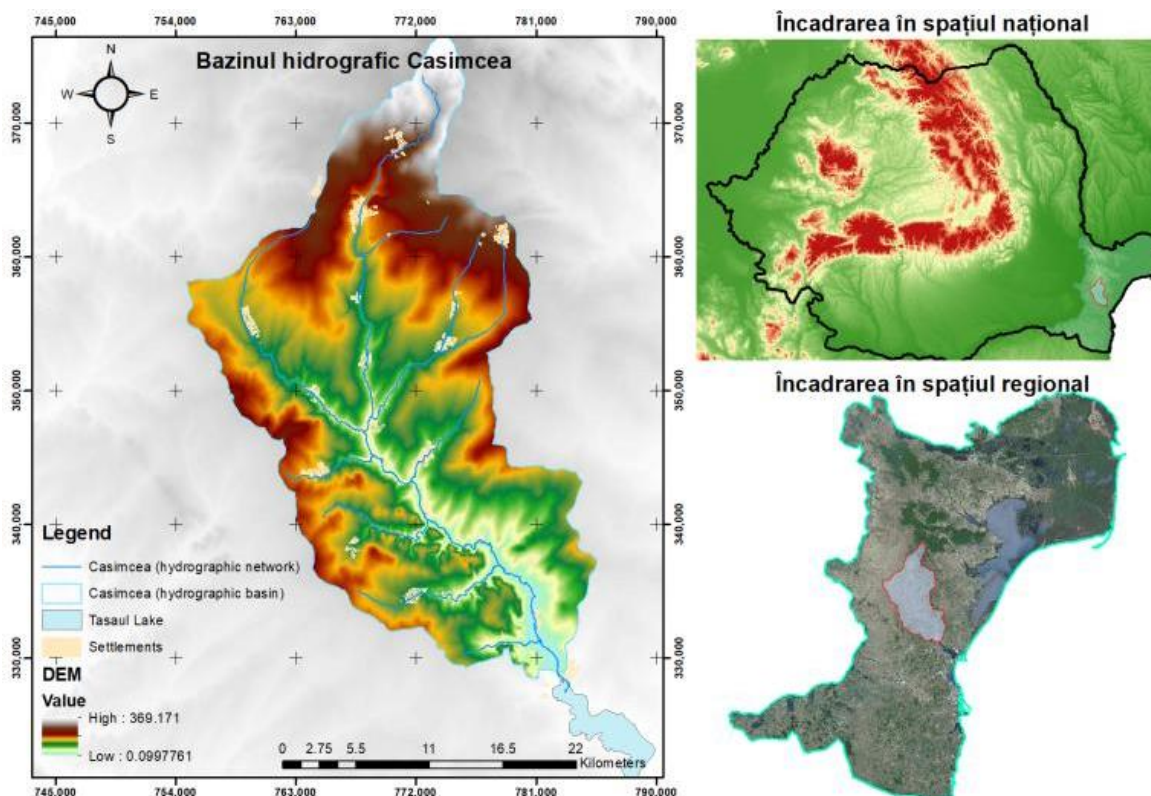


Figura 9 Localizarea și reprezentarea BH Casimcea [27]

Cu o suprafață de 740 km² și o lungime a cursului principal de aproximativ 69 km, râul Casimcea formează cel mai întins BH din Dobrogea (**Figura 9**). Relieful acestuia prezintă o dispoziție în trepte descrescătoare, de la nord, unde se află Dealul Ciolpan (359,2 m altitudine), către sud, în zona Movila Samen (55 m altitudine) [43], până la punctul de vărsare în lacul Taşaul. Altitudinea medie a bazinului este de aproximativ 309 m, iar panta medie a terenului se situează în jurul valorii de 4%.), către lacul Taşaul.

Regimul hidrologic în BH Casimcea

În bazinul Casimcea sunt amplasate patru stații hidrometrice: două pe cursul principal al râului Casimcea, respectiv stațiile Casimcea și Cheia, și două pe afluenții principali ai acestuia, stațiile Pantelimon, situate pe cursurile de apă Cartal și Râmnic (**Figura 10**).

⁴ <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1138/1/012014>

⁵ https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-72543-3_105

⁶ <https://www.mdpi.com/2306-5338/12/7/172>

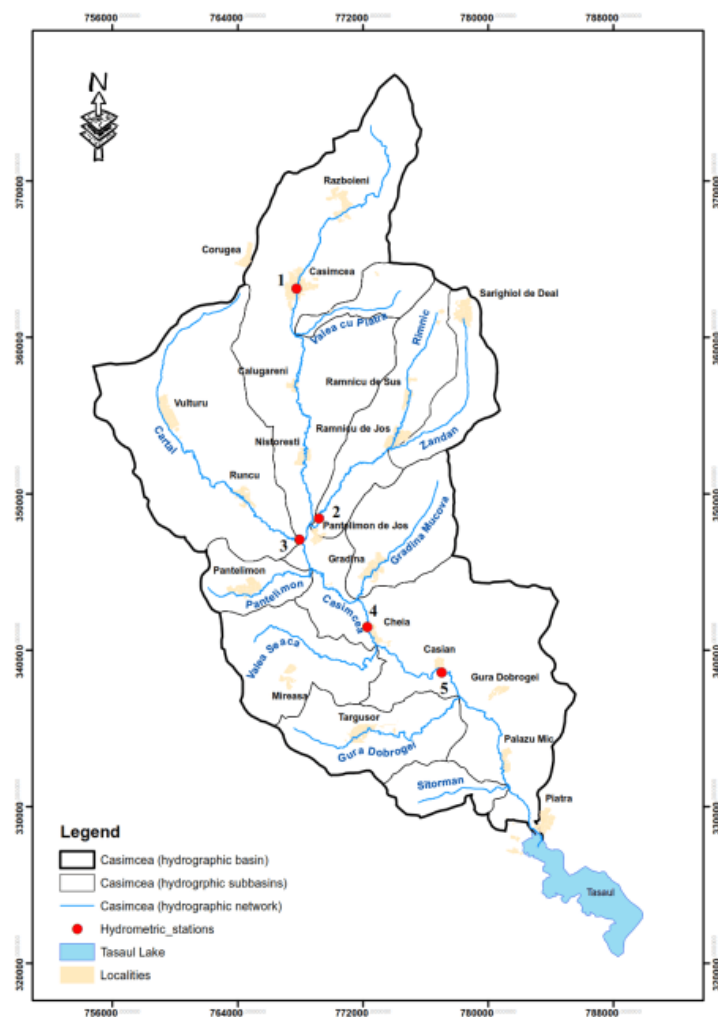


Figura 10 Stațiile hidrometrice - BH Casimcea [75]

Pentru stabilirea regimului hidrologic am utilizat seria de timp a debitelor medii. Au fost folosite debitele medii anuale ale râului Casimcea la stațiile: Casimcea, Râmnic, Cartal și Cheia. Datele obținute de la ABADL acoperă perioada între anii 1954 -2021.

În general debitele anuale au valori mici a căror medie este cuprinsă între $0,074 \text{ m}^3/\text{s}$, la Râmnic și $0,585 \text{ m}^3/\text{s}$, la Cheia (**Tabelul 1**).

Tabelul 1 Statistica descriptivă a celor 4 serii de timp

Statistica	Casimcea	Ramnic	Cartal	Cheia
Media	0.085	0.074	0.128	0.585
Eroarea standard	0.005	0.004	0.009	0.034
Mediana	0.071	0.068	0.115	0.567
Abaterea medie	0.042	0.029	0.070	0.279
Coeficient de aplatizare (Kurtosis)	0.846	-0.249	8.566	0.940
Coeficient de asimetrie (Skewness)	1.076	0.635	2.113	0.892
Minimum	0.028	0.031	0.000	0.219
Maximum	0.227	0.144	0.461	1.480
Nr. înregistrări	67	65	56	68

Analiza datelor statistice colectate de cele patru stații hidrometrice din bazinul Casimcea relevă variații notabile în parametrii mășurați. Stația Cheia se evidențiază cele mai ridicate valori medii (0,585) și maxime (1,480), indicând o intensitate superioară a fenomenului studiat în această zonă, probabil datorită particularităților hidrologice și morfologice locale. Urmează stațiile Cartal, cu o valoare medie de 0,128, Casimcea, cu 0,085, și Râmnic, cu 0,074, care prezintă valori medii mai reduse.

Cu privire la regimul hidrologic am determinat debitul mediu lunar multianual pentru toate cele 4 stații hidrometrice.

Stația hidrometrică Casimcea prezintă un regim hidrologic bimodal, cu două vârfuri anuale ale debitului. Primul maxim se înregistrează în februarie, cu $0,138 \text{ m}^3/\text{s}$, iar al doilea în iunie, cu un debit ușor mai mic, de $0,108 \text{ m}^3/\text{s}$, influențat de topirea zăpezilor și ploile de primăvară. După această perioadă, debitele scad sub media multianuală de $0,085 \text{ m}^3/\text{s}$, atingând valori minime în septembrie ($0,056 \text{ m}^3/\text{s}$) și noiembrie ($0,058 \text{ m}^3/\text{s}$), pe fondul evapotranspirației ridicate și al aportului hidric redus.

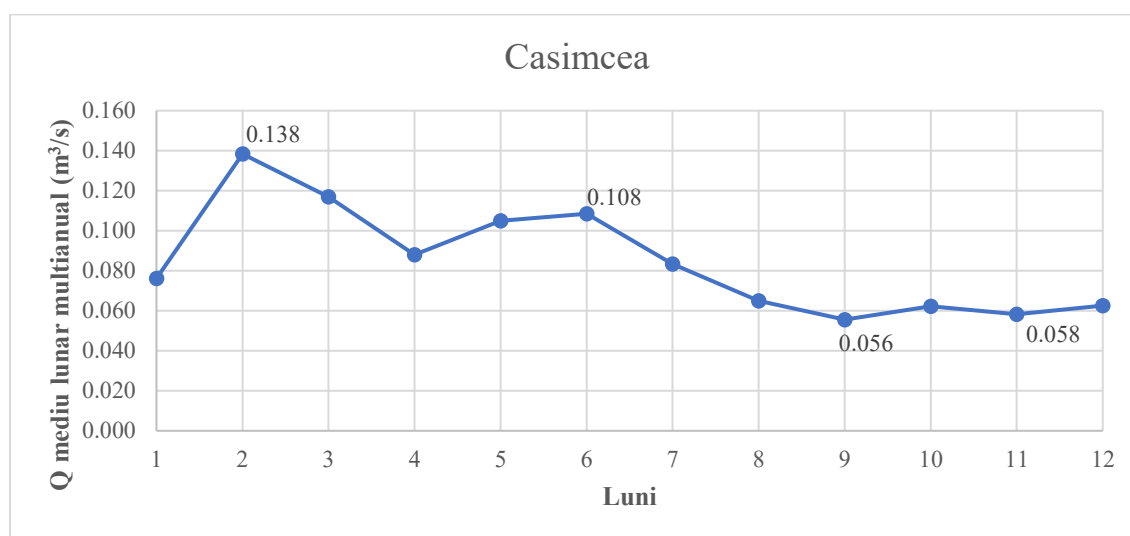


Figura 11 Regimul hidrologic lunar multianual (perioada 1955-2021) la stația Casimcea

Regimul hidrologic lunar al râului Casimcea și al afluenților săi prezintă un caracter bimodal, cu două maxime și două minime evidente pe parcursul anului.

De asemenea, natura geologică a bazinului, caracterizată prin prezența calcarelor, contribuie la infiltrarea apei în subteran, diminuând scurgerea de suprafață și influențând astfel regimul de curgere. Prin urmare, precipitațiile și caracteristicile litologice joacă un rol esențial în modelarea dinamicii debitelor din BH Casimcea.

Mai putem observa că, în platoul dobrogean, unde se află și râul Casimcea, inundațiile au un caracter preponderent local, fiind generate de unde singulare de viitură cu manifestare torențială sau cvasi-torențială pe majoritatea văilor.

În condiții de precipitații abundente, în bazinul hidrografic al râului Casimcea, acest fenomen este amplificat de aportul hidric provenit de pe cursurile de apă afluate – Pantelimon, Cartal, Râmnic și Mucova.

Ca urmare, în zona localității Casimcea, viiturile produse în perioada 2002–2013 au generat efecte distructive semnificative, ducând la distrugerea unor locuințe, gospodării și obiective social-economice precum școli, biserici, terenuri agricole, dar și infrastructură de interes public (șosele, poduri etc.).

Cele mai frecvente perioade de apariție a inundațiilor sunt lunile mai-iulie, fapt care subliniază caracterul sezonier al acestor fenomene, corelat cu instabilitatea atmosferică specifică perioadei estivale. Valori ridicate ale precipitațiilor zilnice (peste 70 mm) au declanșat cele mai distructive evenimente, confirmând vulnerabilitatea bazinului Casimcea la fenomene hidrometeorologice extreme.

Evenimentul cel mai extrem din ultima perioadă, cu cele mai însemnate pagube generate de inundații la nivelul BH Casimcea, înregistrat la stația hidrometrică Casimcea este cel din 30.05.2002 pentru care, pe baza datelor din PMRI-Ciclul I, prezentăm în continuare hidrograful viiturii (**Figura 12**):

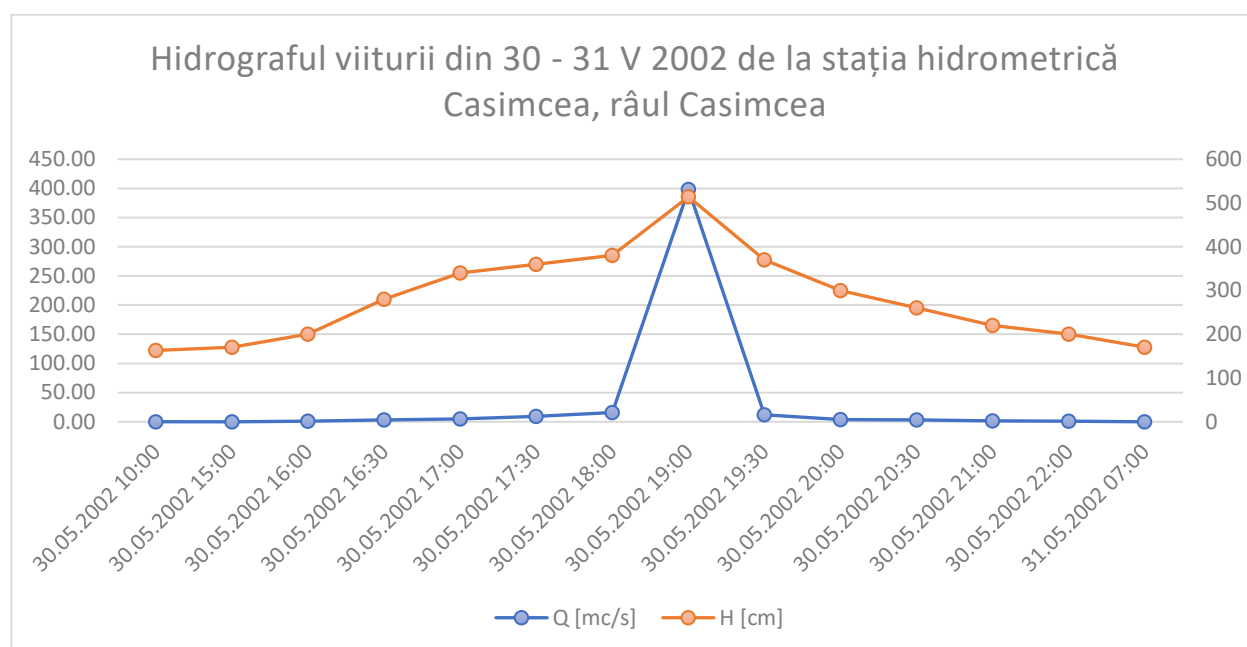


Figura 12 Hidrograful viiturii din 30-31 mai 2002 de la stația hidrometrică Casimcea [26]

Pe baza valorilor înregistrate în perioada 30–31 mai 2002, se poate observa clar o evoluție rapidă a debitelor și nivelurilor, culminând cu un vârf de debit de 398 m³/s la ora 19:00. Forma hidrografului indică o viitură de tip simplu (sau singular), caracterizată printr-un singur vârf bine definit și o perioadă scurtă de creștere și descreștere. Această configurație sugerează o generare rapidă a viiturii ca urmare a unui eveniment de mare intensitate, cu distribuție temporală concentrată. Caracterul torențial este confirmat de creșterea bruscă a debitului de la 0,79 m³/s la 398 m³/s într-un interval de doar trei ore, urmată de o descreștere rapidă sub 4 m³/s în următoarea oră. Aceste aspecte reflectă un timp de răspuns scurt, specific bazinelor mici și cu pante accentuate, iar durata totală a evenimentului se încadrează în categoria viiturilor rapide, de tip flash-flood.

CAPITOLUL V REALIZAREA MODELULUI DIGITAL AL TERENULUI

Obținerea unor modele digitale ale terenului implică un proces complex de colectare, procesare și analiză a datelor topografice, utilizând tehnologii avansate precum GNSS RTK (Real Time Kinematics), LiDAR, fotogrammetrie aeriană și/ sau stații totale, precum și programe specializate.

5.1. Măsurători terestre

Pornind de la planificarea măsurătorilor, unde se stabilește zona de studiu, se definesc obiectivele și se alege metoda adecvată de colectare a datelor, după care sunt configurate echipamentele și parametrii de măsurare pentru a asigura acuratețea informațiilor de colectat.

Colectarea datelor s-a realizat prin măsurători GNSS RTK (**Figura 13**), ce permit obținerea coordonatelor punctelor cu precizie dorită [69]. De asemenea, tehnologiile LiDAR și fotogrammetria aeriană au generat nori de puncte dense, oferind astfel o reprezentare detaliată a suprafeței terenului. Densitatea și acuratețea punctelor au depins în mare măsură de tehnologia utilizată, dar și de caracteristicile zonei măsurate și/ sau a parametrilor stabiliți la pasul anterior.

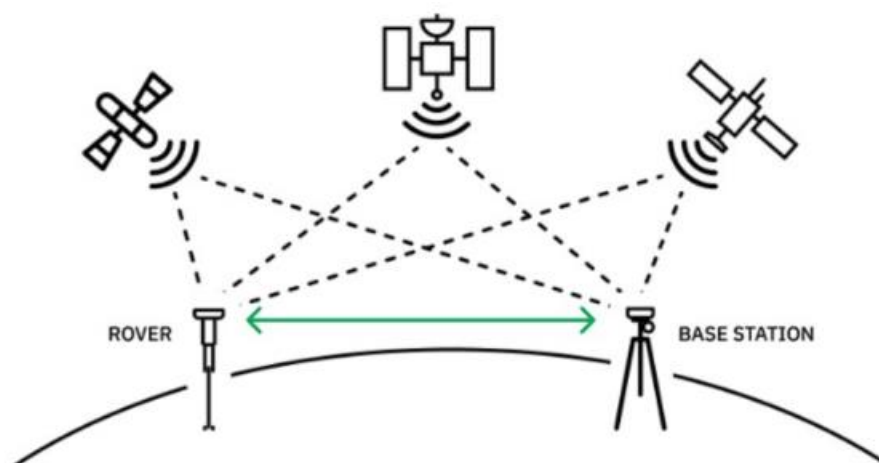


Figura 13 Transmiterea datelor în sistem RTK⁷

5.1.1. Echipamente utilizate și modul de operare

Receptor GNSS Trimble R780

Trimble R780 (**Figura 14** - stânga) este un receptor GNSS avansat, proiectat pentru a oferi poziționare de înaltă precizie în medii dificile. Permite măsurători de precizie ridicată prin tehnologia RTK (Real-Time Kinematic). În cazul de față acesta fiind utilizat împreună cu rețeaua

⁷ [RTK Corrections: What This Means & How It Works – pointonnav.com](https://pointonnav.com)

națională de stații permanente ROMPOS (Romanian Position Determination System), oferind astfel poziții corectate în timp real, cu o precizie de ordin centimetric.

Conectat la controler, TDC 600 (**Figura 14** - dreapta), se asigură că receptorul are acces la internet prin date mobile (rețea – Wi-Fi/ cartelă SIM/ hotspot).



Figura 14 *Receptor GNSS Trimble R780⁸ și controler TDC600⁹*

Dronă DJI Matrice 350 și senzor LiDAR Zenmuse P2

DJI Matrice 350 RTK (Figura 15) este una dintre cele mai avansate drone pentru cartografiere și topografie, datorită preciziei sale ridicate, autonomiei extinse și compatibilității cu echipamente specializate. Aceasta este utilizată pentru colectarea de date geospațiale precise, fiind ideală pentru crearea hărților 2D și 3D, modelelor digitale ale terenului și reconstrucțiilor fotogrammetrice. Drona este controlată de la distanță prin telecomanda DJI RC Plus, echipată cu un ecran tactil de 17.78cm, cu luminozitate ridicată, asigurând vizibilitate optimă în orice condiții de iluminare.



Figura 15 *Drona DJI Matrice 350 RTK cu telecomanda și accesoriile incluse¹⁰*

⁸ [R780 GNSS Smart Antenna | Trimble Civil Construction](#)

⁹ [Trimble TDC600 | Trimble Utilities](#)

¹⁰ [DJI Matrice 350 RTK](#)

Drona dispune de tehnologie RTK, care oferă o poziționare precisă la nivel centimetric, reducând necesitatea utilizării punctelor de control la sol.

Perimetrele stabilite, pentru fiecare zonă de interes, sunt încărcate în funcție de scopul misiunii. Pentru obținerea MDT-urilor am folosit senzorul LiDAR Zenmuse L2 de la DJI, fiind impusă o viteză de 10 m/s și o altitudine de 70 m raportată la suprafața solului.

Senzorul Zenmuse L2 este un sistem LiDAR aerian de înaltă precizie, integrând un LiDAR, un sistem IMU (Inertial Measure Unit) dezvoltat intern de înaltă acuratețe și o cameră de cartografiere RGB cu senzor CMOS (Complementary metal oxide semiconductor) de dimensiune 4/3. Acesta oferă platformelor de zbor DJI o achiziție de date geospațiale mai precisă, eficientă și fiabilă, iar atunci când este utilizat împreună cu programul DJI Terra, Zenmuse L2 furnizează o soluție completă pentru colectarea de date 3D și post-procesare de înaltă precizie.



Figura 16 *Senzorul LiDAR Zenmuse L2¹¹*

Acest sistem LiDAR avansat este ideal pentru aplicații precum cartografierea, topografia și alte domenii care necesită achiziții precise de date geospațiale.

Datele colectate prin senzorul utilizat, salvate în memoria externă a acestuia, sunt de tipul:

- fișiere LiDAR (.LID) – date brute ale norului de puncte
- fișiere RTK (.RTK) – pentru corecții GNSS
- imagini RGB – pentru colorizarea norului de puncte și ortofotoplanuri

Acestea sunt descărcate ulterior pentru procesare și analiză prin programe specializate, etape descrise în continuare.

5.2. Procesarea și reprezentarea modelului digital al terenului

După colectarea datelor din teren, etapa următoare este procesarea, etapă în care se corectează erorile, se filtrează datele brute și se realizează interpolarea punctelor măsurate pentru

¹¹ [DJI Zenmuse L2 - SkyGrid](#)

a genera o suprafață continuă. Această etapă presupune utilizarea de programe specializate ca DJI Terra, Pix4D Mapper, Global Mapper etc.

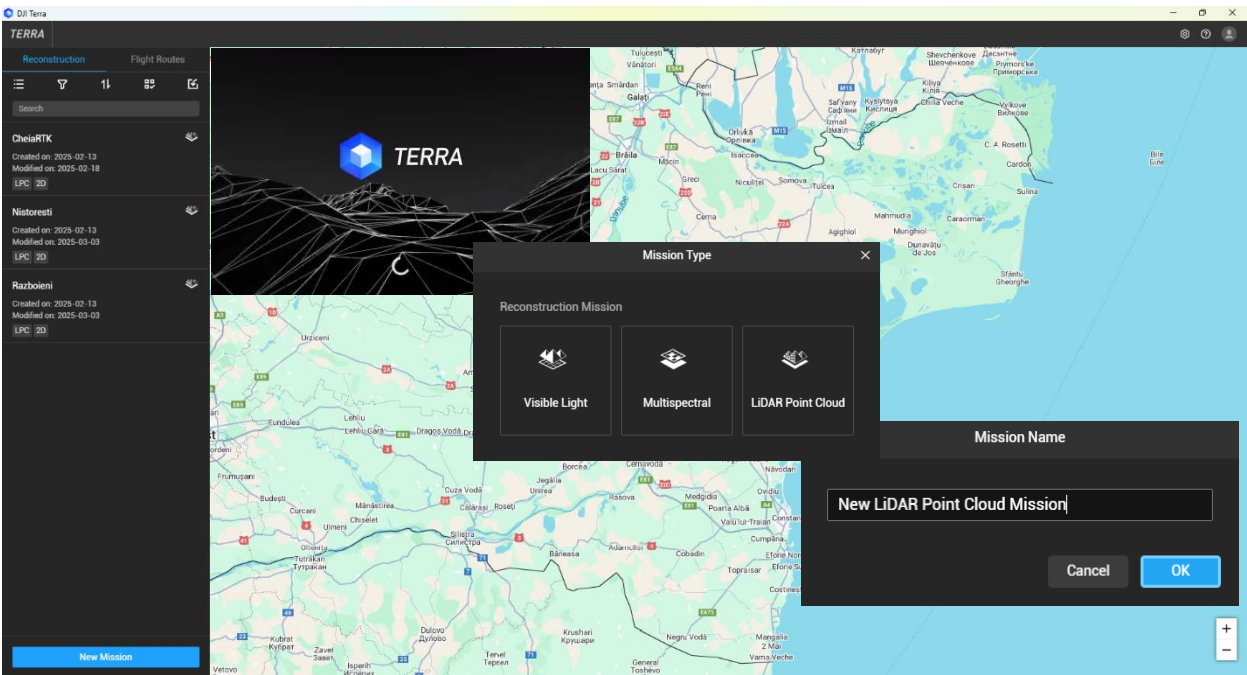


Figura 17 Interfața programului DJI Terra

Procesarea datelor colectate cu drona Matrice 350 RTK împreună cu senzorul Zenmuse L2 s-a realizat în programul DJI Terra (Figura 17).

Rezultatele obținute sunt atât de tip 2D, cât și de tip 3D (nor de puncte LiDAR de înaltă densitate), acestea putând fi ulterior integrate în aplicații GIS sau modele hidraulice pentru analiză spațială, simulări de inundații, estimări volumetrice sau planificare teritorială.

Având în vedere că modelul rezultat este utilizat ulterior pentru simularea inundațiilor, norul de puncte obținut este supus unei etape de post-procesare, în care sunt eliminate elementele artificiale. În urma acestui proces, se generează Modelul Digital al Elevației, care redă cât mai fidel morfologia reală a terenului și este adecvat pentru integrarea în modelele hidraulice propuse în continuare.

Programul utilizează automat datele obținute pentru a genera, la finalul procesării, un raport de calitate care include atât parametrii zborului, cât și o analiză statistică a preciziei modelului, comparativ cu punctele de control la sol definite anterior. Pe baza acestor informații, se poate aprecia acuratețea rezultatelor generate. O imagine de ansamblu comparativă asupra celor două rapoarte de calitate rezultate în urma procesării datelor este prezentată în tabelele următoare (Error! Reference source not found. și Error! Reference source not found.):

Tabelul 2 Informații generale despre zbor și procesare

Caracteristică	Războieni	Nistorești
Timp de zbor efectiv	27 min 21 s	25 min 23 s
Timp total de procesare	5 h 40 min	4 h 25 min
Suprafață cartată	0.485 km ²	0.504 km ²

GSD ortofotoplan (TDOM)	2.57 cm/pix	2.09 cm/pix
Densitate medie nor de puncte	612 puncte/m ²	584 puncte/m ²

Tabelul 3 *Precizia altitudinii (validare cu puncte de control)*

Parametru	Războieni	Nistorești
Altitudine medie de zbor	69.6 m	75.6 m
Viteză medie de zbor	8.2 m/s	8.61 m/s
Sistem de coordonate	Stereo70	Stereo70
Număr puncte de control	6	6
Eroare medie pe altitudine (Z)	-0.089 m	-0.107 m
Eroare absolută medie	0.089 m	0.107 m
RMSE altitudine (rădăcina pătrată a erorii)	0.0978 m	0.1181 m
Abatere standard	0.0893 m	0.1181 m
Eroare maximă	-0.102 m	-0.140 m

Ambele zboruri au produs rezultate de înaltă densitate și precizie, adecvate pentru generarea de MDE și ortofotoplanuri necesare modelării hidraulice. Zona Războieni, cu relief mai accidentat, a înregistrat o eroare ușor mai mică decât zona Nistorești, caracterizată prin topografie plană. Totuși, diferențele sunt minore (sub 2 cm), ceea ce indică un grad bun de acuratețe pentru ambele seturi de date.

Ultima etapă din fluxul de lucru constă în analiza și valorificarea modelelor de teren rezultate. Acestea reprezintă un suport esențial pentru evaluarea topografiei și pot fi utilizate în diverse scopuri, precum calcularea pantelor, modelarea scurgerii de suprafață, analiza rețelelor de drenaj sau identificarea zonelor cu potențial de acumulare a apei. De asemenea, MDT-urile sunt aplicabile în proiecte de infrastructură, urbanism, amenajarea teritoriului și gestionarea durabilă a resurselor naturale. Un model de teren cu precizie ridicată contribuie la îmbunătățirea calității deciziilor și la optimizarea proceselor de planificare, proiectare și intervenție în mediul construit și natural.

CAPITOLUL VI MODELAREA INUNDAȚIILOR CU HEC-RAS

6.1. Modelarea matematică cu programul HEC-RAS

Modelarea matematică în HEC-RAS reprezintă procesul de simulare a curgerii apei într-un sistem de cursuri de apă sau canale deschise, utilizând ecuații hidraulice fundamentale. Acest program (**Figura 18**), dezvoltat de USACE, permite a se crea modele 1D sau 2D ale curgerii apei, în scopul analizării comportamentului acestuia în diverse scenarii [49].

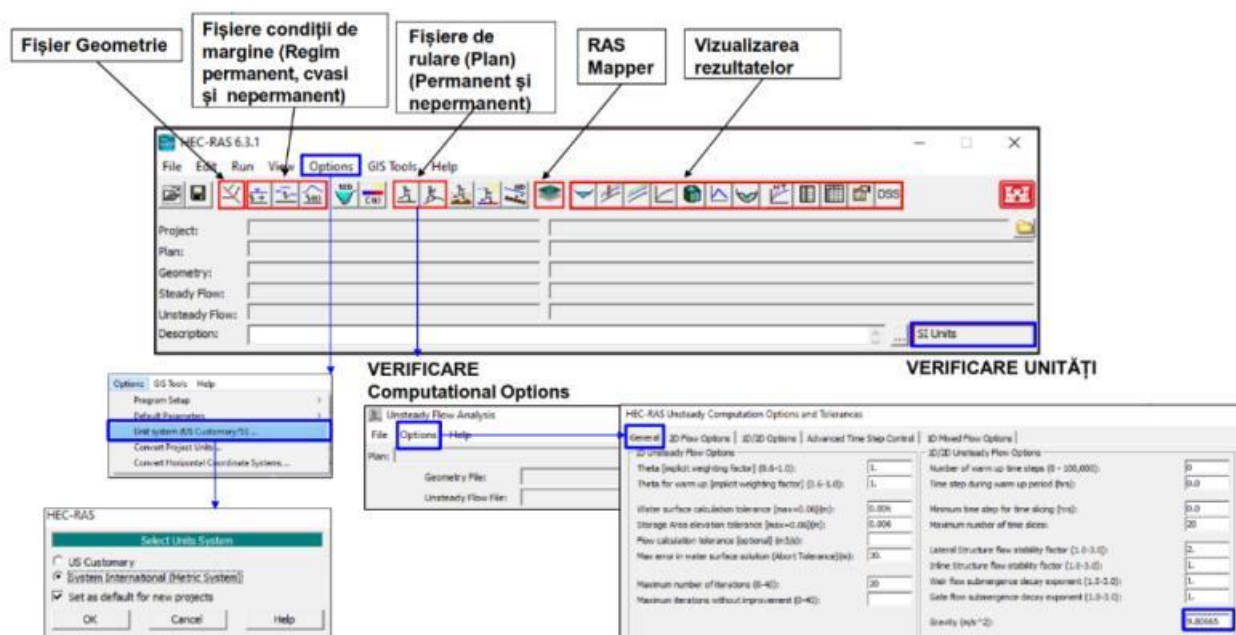


Figura 18 Interfața programului HEC-RAS

RAS Mapper, modulul grafic integrat al programului HEC-RAS, este utilizat atât pentru prelucrarea datelor spațiale, cât și pentru vizualizarea rezultatelor generate prin modelare hidraulică. În termeni simpli, acesta permite crearea, editarea și afișarea hărților și a straturilor GIS asociate modelării, facilitând astfel o interfață vizuală interactivă pentru configurarea și interpretarea datelor spațiale.

6.2. Modelarea unidimensională

Modelarea 1D în HEC-RAS presupune simularea curgerii apei într-un singur plan, de-a lungul direcției longitudinale a unui râu sau canal, considerând variațiile curgerii exclusiv de-a lungul axei cursului de apă, fără a lua în calcul distribuția transversală a parametrilor hidraulici.

După configurarea inițială a proiectului și importul modelului digital de teren, se realizează geometria modelului 1D, care reprezintă baza simulării hidraulice. Procesul începe prin trasarea axului albiei – o polilinie care urmează traseul principal al cursului de apă, definind astfel direcția

curgerii. Ulterior, sunt delimitate malurile și limitele albiei majore, esențiale pentru a diferenția albia minoră (activă) de zona de inundare potențială.

În pasul următor, se procedează la trasarea secțiunilor transversale perpendiculare pe axul albiei, la intervale regulate sau în puncte cheie (curburi, confluente, poduri etc.).

Fiecare secțiune este asociată cu parametri hidraulici importanți, precum coeficienții de rugozitate, ce reflectă rezistența la curgere a albiei și zonelor inundabile, precum și eventuale structuri hidrotehnice (poduri, diguri, praguri) care influențează curgerea.



Figura 19 RAS Mapper – Elementele geometriei 1D

După crearea și trasarea elementelor geometrice de bază (axa cursului de apă, maluri, secțiuni transversale), acestea sunt salvate și analizate ulterior în fereastra de date geometrice (Geometric Data Editor) din HEC-RAS. În această etapă, se realizează ajustări esențiale asupra secțiunilor transversale pentru a reflecta cât mai fidel realitatea morfologică a albiei.

În mod specific, se efectuează modificarea limitelor albiei minore, prin identificarea poziției malurilor stâng și drept, astfel încât modelul să poată distinge corect între albia activă (unde are loc curgerea frecventă) și zonele de luncă inundabile (albia majoră). Această delimitare influențează semnificativ calculul distribuției vitezei și al pierderilor de energie.

Totodată, în această fază se realizează definirea coeficienților de rugozitate Manning (n) pentru fiecare zonă a secțiunii – de regulă, se diferențiază valori pentru albia minoră și pentru albia majoră, în funcție de tipul substratului, vegetație, prezența construcțiilor sau a altor obstacole.

În cazul modelării 1D, s-a optat pentru atribuirea manuală a valorilor Manning, în funcție de morfologia fiecărei secțiuni și caracteristicile terenului identificate în teren și pe baza imaginilor satelitare. Coeficienții utilizați au fost selectați conform clasificării propuse de Chow (1959)¹² pentru cursuri de apă naturale, ținând cont de tipul substratului, vegetația de pe maluri, sinuoziata canalului și alte elemente relevante care influențează rezistența la curgere.

¹² [Manning's n Values](#)

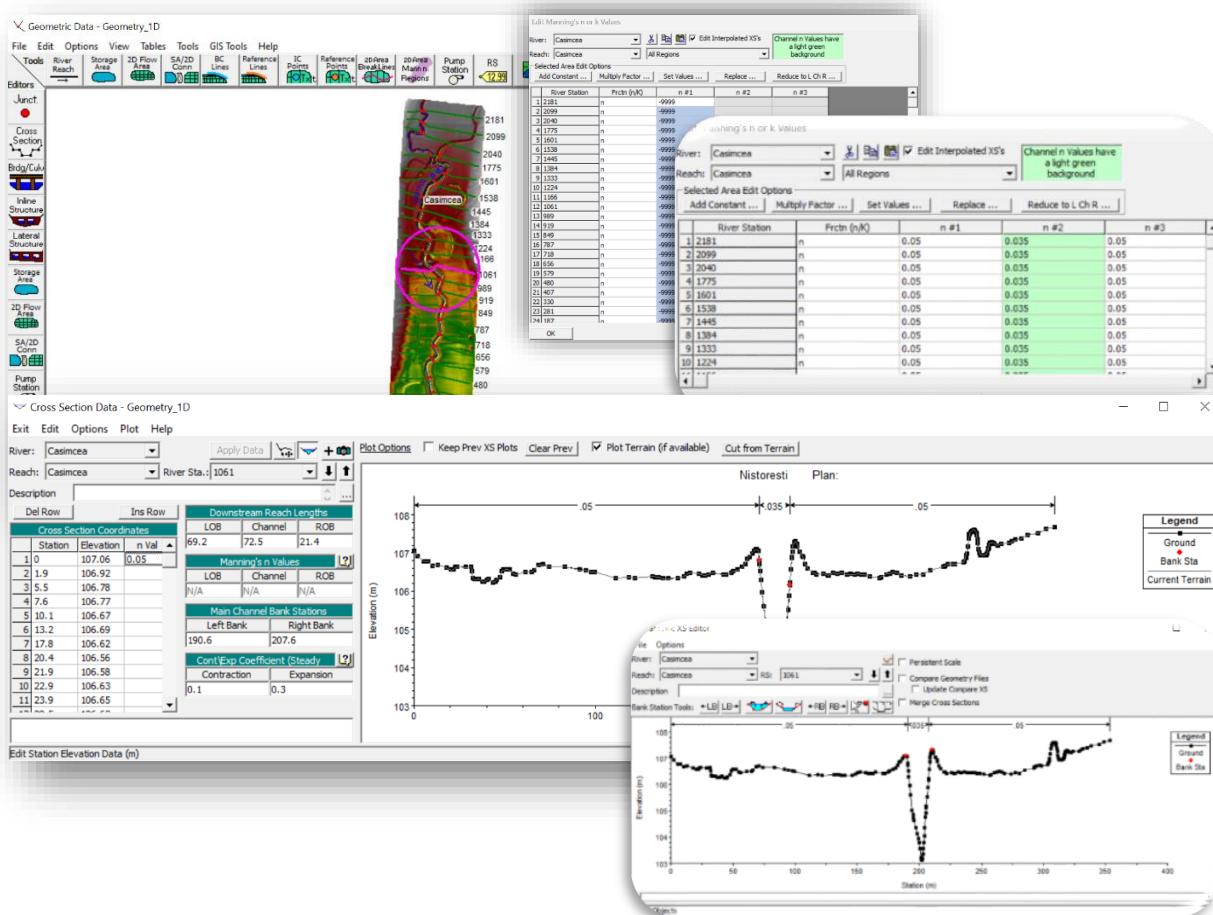


Figura 20 Analiza secțiunilor transversale și definirea coeficientului de rugozitate

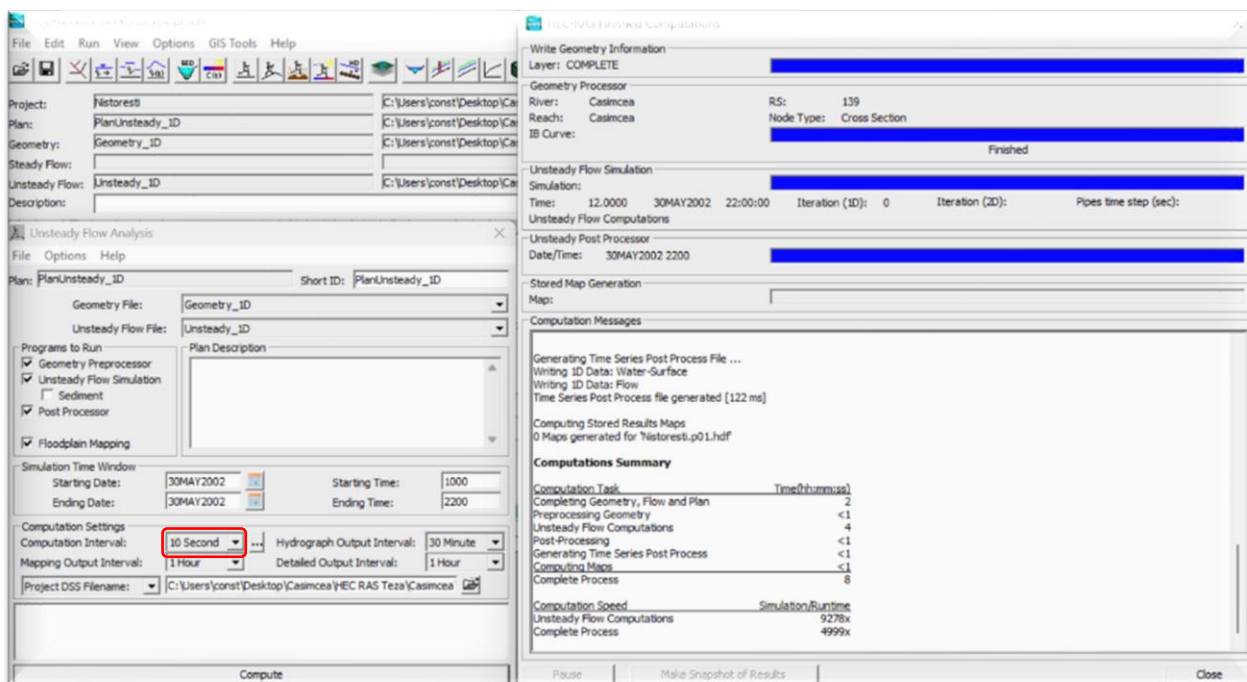


Figura 21 Rularea modelului 1D pentru sectorul Nistorești - regim nepermanent

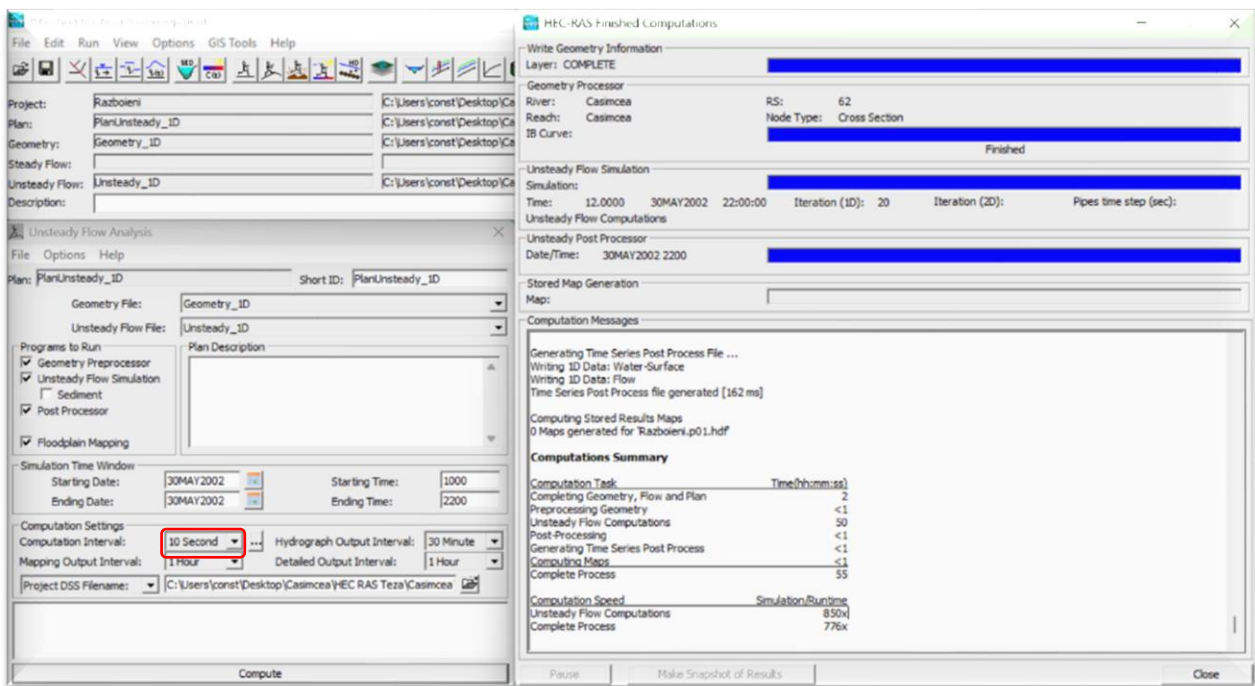


Figura 22 Rularea modelului 1D pentru sectorul Războieni - regim nepermanent

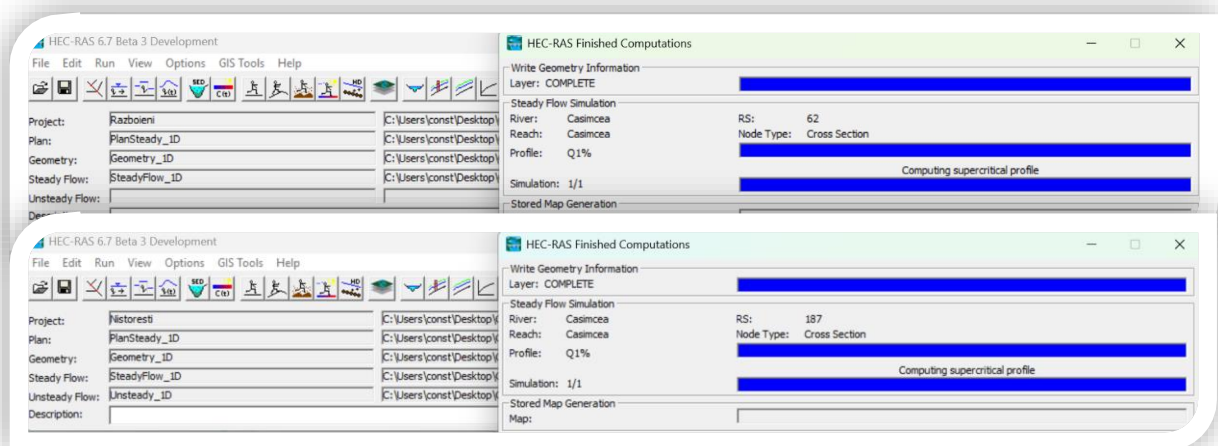


Figura 23 Rezultatele modelului 1D - regim permanent

Finalizarea modelării 1D permite utilizatorului să gestioneze în mod flexibil atât exportul, cât și importul de date relevante pentru interpretarea rezultatelor. Astfel, hărțile de inundație generate de program, împreună cu rezultatele sub formă de grafice sau tabele (viteze, debite, cote, suprafețe inundate etc.), pot fi exportate în diverse formate compatibile cu aplicații GIS și de prelucrare grafică. În paralel, este posibilă importarea de entități spațiale (puncte, linii, poligoane), cum ar fi limite administrative, infrastructuri sau puncte de referință, pentru a verifica concordanța acestora cu extinderea calculată a inundației.

6.3. Modelarea bidimensională

Modelarea 2D în HEC-RAS permite simularea curgerii apei în două direcții (pe lungime și lățime), oferind o reprezentare mai detaliată și realistă a inundațiilor în zone întinse sau cu topografie complexă. Aceasta utilizează un model digital al terenului (DEM) și o rețea de calcul (mesh) pentru a analiza distribuția adâncimii, vitezei și direcției curgerii. Modelarea 2D este ideală pentru zone urbane, lunci sau câmpii de inundare, unde curgerea nu urmează un singur traseu clar definit.

În prezenta lucrare pentru înțelegerea fenomenului de inundație raportat la evenimente trecute și analizat în raport cu limitele de inundabilitate extrase din PPPDEI s-a procedat la realizarea modelării 2D urmând pașii prezentați în continuare.

1. Folosindu-ne de terenul deja existent în RAS Mapper procedăm la crearea unei geometrii, de această dată 2D, unde realizăm un poligon în limitele modelului de teren astfel încât să putem încadra cel puțin limitele de inundabilitate obținute în cazul modelului 1D.
2. Urmează stabilirea dimensiunii celulelor de calcul care se face în raport cu suprafața totală analizată și în funcție de gradul de acuratețe dorit, am ales în cazul de față dimensiunea celului de 10x10m considerată a fi adecvată pentru studiul de față.
3. O etapă următoare este rafinarea modelului prin realizarea axului talvegului albiei în vederea alinierii celulelor în direcția de curgere. Astfel, pentru celulele din zona albiei minore stabilim o dimensiune mai mică decât cea stabilită inițial pentru ca în zona talvegului și a malurilor să existe o analiză mai detaliată. Etapa aceasta include și definirea structurilor ce există în teren, dar în cazul de față nu este necesar deoarece singura structură ar fi la Nistorești (podul ce supratraversează cursul de apă Casimcea), iar la o rulare preliminară a modelului limita de inundabilitate a ținut cont și de culeele podului, iar secțiunea de scurgere asigurată de acesta este considerabil mai mare față de cea necesară pentru asigurarea debitului de 1%. Rezultatul obținut după rafinarea modelului conține de cele mai multe ori mici erori, anume celule ce au mai mult de opt fețe. Aceste erori sunt remediate prin adăugarea de noi centre de greutate pentru celulele acestea până ce sunt remediate erorile (manual sau în mod automat prin funcția **Try to fix All Meshes**).
4. Ulterior acestor etape, coeficientul de rugozitate hidraulică este definit spațial, prin atribuirea valorilor corespunzătoare pe baza poligoanelor din baza de date Corine Land Cover. Fiecărei clase de utilizare a terenului i se asociază un coeficient Manning standard, adaptat caracteristicilor locale ale zonelor analizate în prezenta teză. Această etapă contribuie la o reprezentare mai realistă a curgerii apei.
5. Etapa finală înaintea realizării modelului este cea de definire a condițiilor de margine, care față de modelul 1D se definesc astfel:
 - pentru zona amonte este definită condiția ce conține hidrograful utilizat anterior și panta terenului pe zona amonte; condiția de margine fiind introdusă doar în zona de albie minoră astfel încât hidrograful utilizat să fie distribuit în secțiunea acesteia, având în vedere faptul că în cazul de față este analizat un sector izolat unde se urmărește inundația prin deversarea malurilor albiei minore.

- pentru zona aval se introduc trei condiții care sunt definite funcție de panta terenului pentru fiecare zonă: albie minoră, albie majoră stânga și albie majoră dreapta. Se va avea în vedere inclusiv ca aceste condiții să nu se intersecteze cu aceeași celulă și să fie definite doar în exteriorul poligonului analizat.

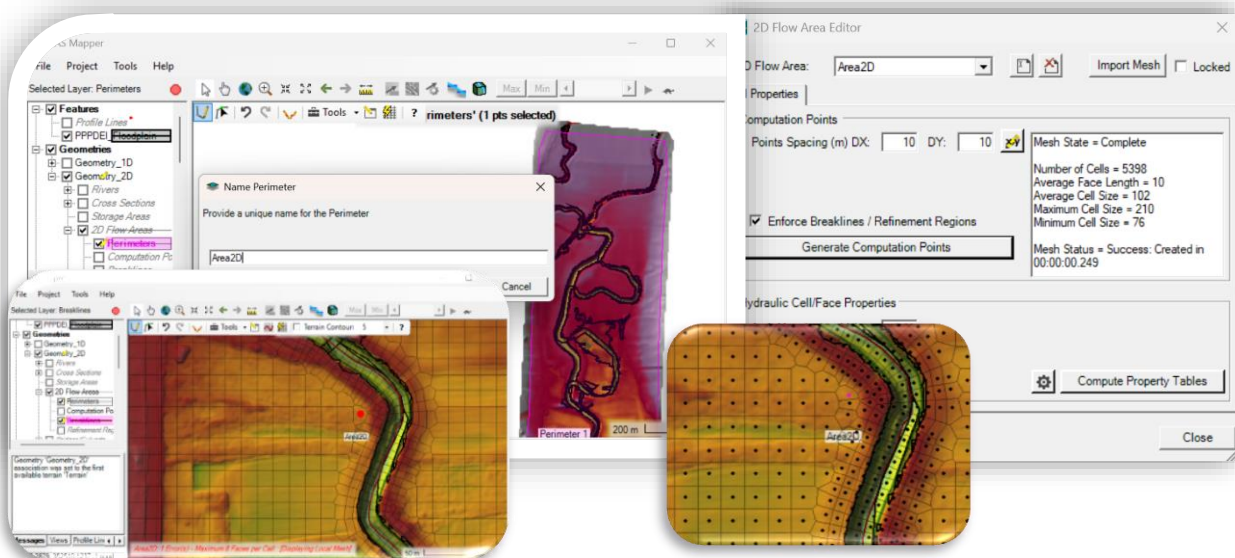


Figura 24 Crearea geometrie 2D și rafinarea suprafeței de calcul – zona Nistorești

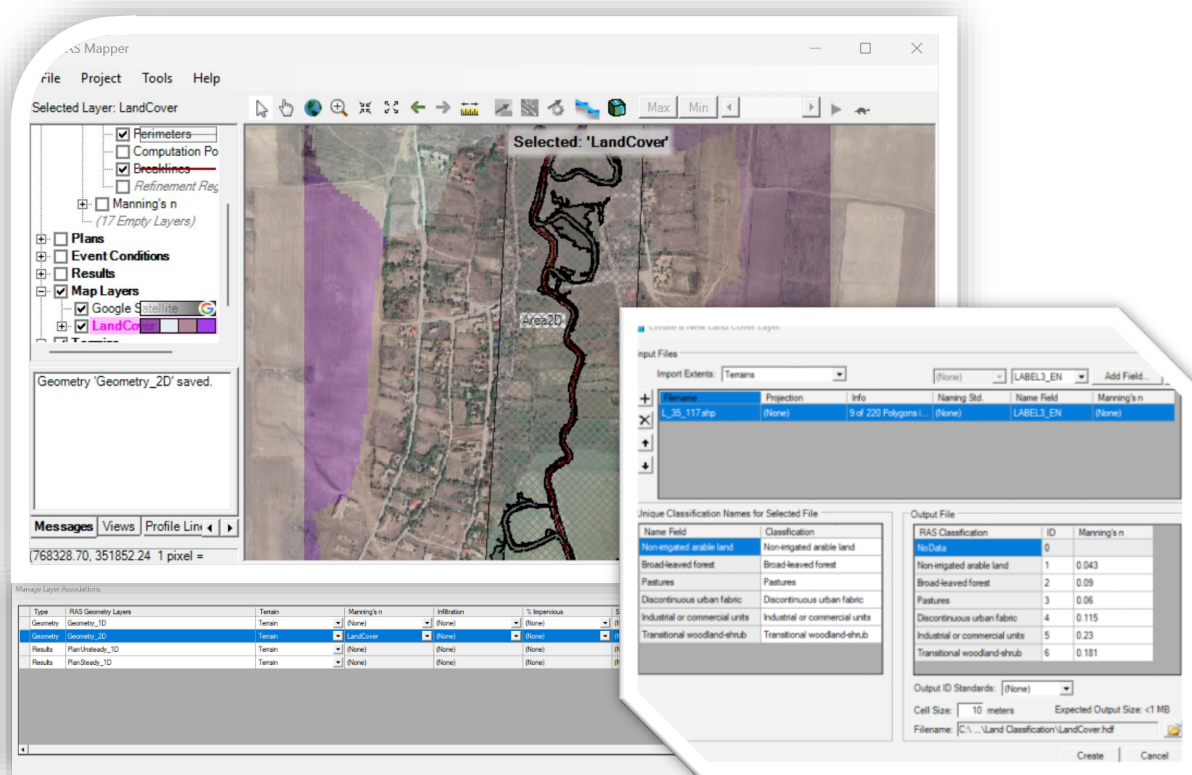


Figura 25 Atribuirea coeficientului de rugozitate în funcție de utilizarea terenului

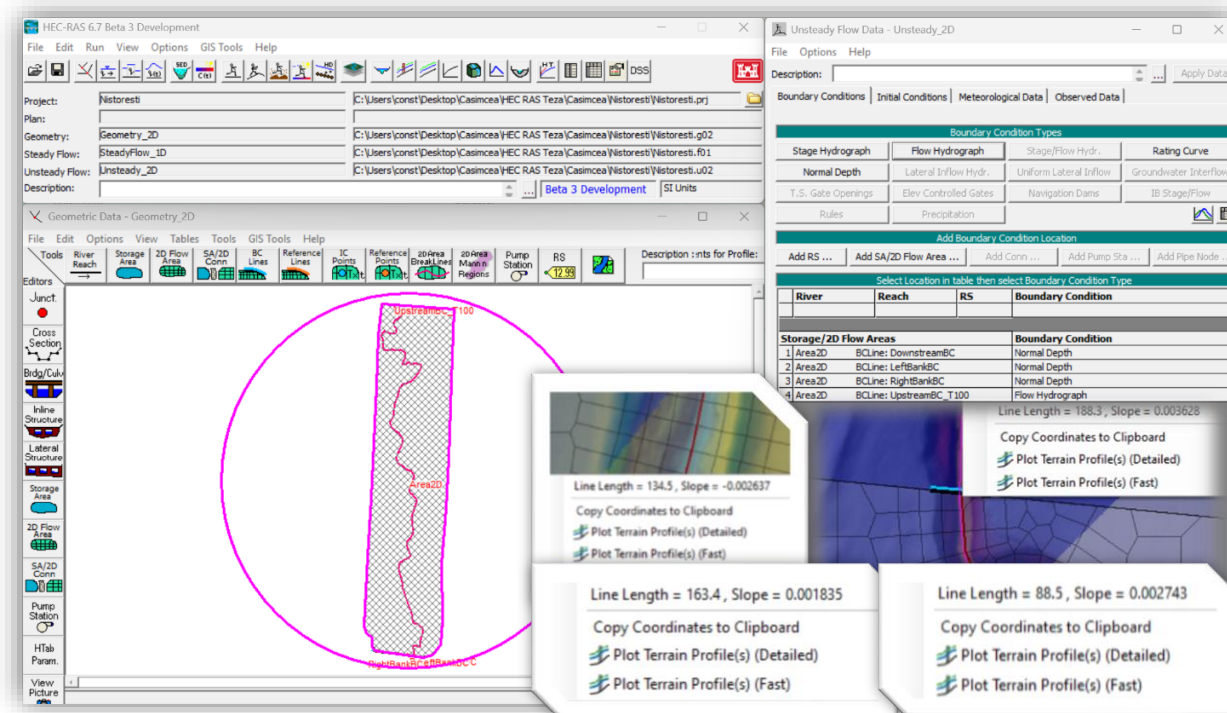


Figura 26 Definirea condițiilor de margine

Odată definite condițiile de margine se trece la rularea modelului 2D fiind stabilit și pasul de timp care este esențial pentru stabilitatea și acuratețea modelului.

CAPITOLUL VI REZULTATE

7.1. Rezultatele analizei frecvențiale

Rezultatele prezentate în acest capitol au fost publicate în lucrări științifice publicate de autor, și anume:

- Flood frequency analysis of Casimcea river. 2021 [27]
- Predictive Modeling of Flood Frequency Utilizing Analysis of Casimcea River in Romania. 2025 [75]

Reamintim că pentru această analiză am utilizat seria de debite anuale maxime pe o perioadă 1965-2021 pentru trei stații hidrometrice (Casimcea, Cartal și Râmnic) și 34 de ani pentru stația Cheia (1988-2021).

7.1.2. Analiza debitelor anuale maxime

Hidrograful debitelor maxime la cele 4 stații hidrometrice investigate sunt prezentate în figura următoare (**Figura 27**), iar **Tabelul 4** prezintă informații geografice și hidrologice.

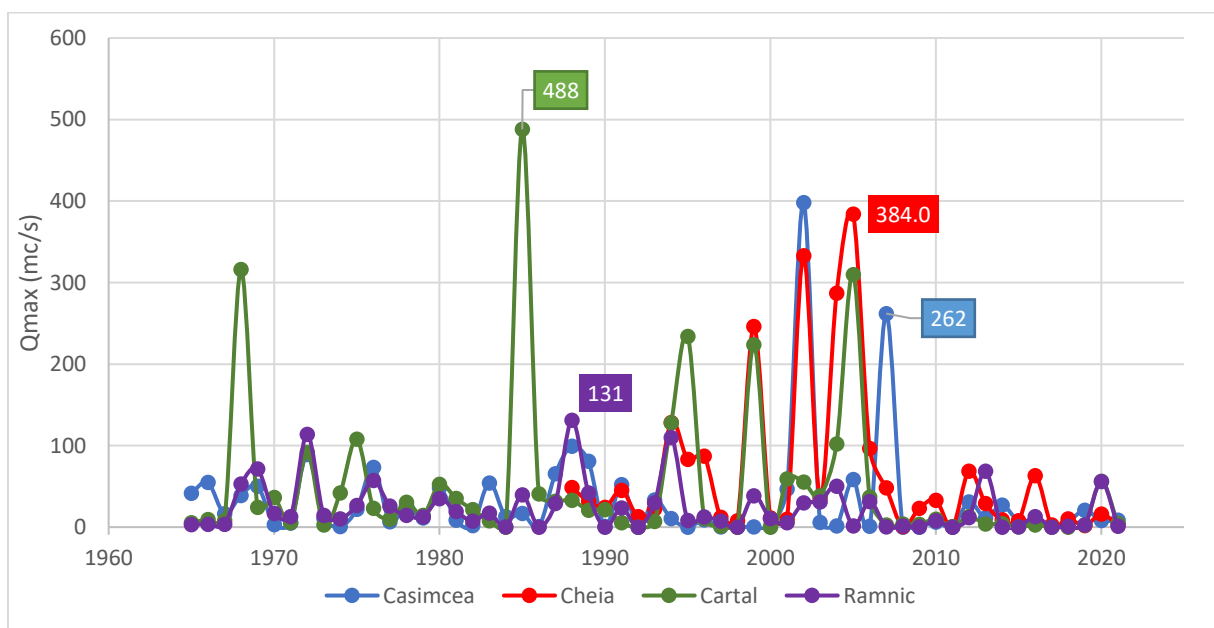


Figura 27 *Hidrograful debitelor maxime anuale*

Datele privind debitele au început să fie măsurate în 1965 (57 de ani) pentru stațiile hidrometrice Casimcea, Cartal și Râmnic și în 1988 (34 de ani), respectiv, pentru stația hidrometrică Cheia.

Cea mai mare valoare de debit observată este de 488 m³/s (**Figura 27**) la stația hidrometrică Cartal în 1985 (**Tabelul 4**).

La toate stațiile hidrometrice investigate, s-a observat că valoarea medie maximă a debitului a depășit între 1994 și 2007. Este de remarcat faptul că la stația Cartal, în 1968 și 1985, s-au înregistrat debite care au depășit valoarea medie de 6 ori, respectiv 9 ori. Evoluția datelor din seriile temporale are același comportament, cu unele excepții: în anii 1968 și 1985, la stațiile

hidrometrice Cartal s-au înregistrat două valori mari ale debitelor ($316 \text{ m}^3/\text{s}$ și, respectiv, $488 \text{ m}^3/\text{s}$), iar la toate celelalte râuri, valorile au fost sub $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Din păcate, în perioada 1965–1991, stația hidrometrică Cheia nu era încă instalată, așa că nu am putut compara valorile. A doua anomalie a fost în 2002 la stația hidrometrică Cheia, unde s-a înregistrat o valoare de $333 \text{ m}^3/\text{s}$, iar la celelalte valori înregistrate la toate celelalte stații hidrometrice, valorile debitelor sunt între 29 și $52 \text{ m}^3/\text{s}$. În anii 2005 și 2007, valorile debitelor înregistrate la stațiile hidrometrice Cartal și Casimcea au fost de $310 \text{ m}^3/\text{s}$, respectiv $262 \text{ m}^3/\text{s}$, iar la stația Cheia debitul a fost de $24 \text{ m}^3/\text{s}$ și $48,1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabelul 4 *Limite de debit înregistrate la stațiile hidrometrice*

Stația hidrometrică	Lungime serie	Q mediu (m^3/s)	Q max/data (m^3/s)	Q min (m^3/s)	Deviația standard	Coeficient de asimetrie	Suprafața de drenare (km^2)	Altitudine stație (m)
Casimcea	57	32.43	398/2002	0.048	64.54	4.27	78	263
Cheia	34	65.9	384/2005	0.5	99.70	2.18	500	158
Cartal	56	49.9	488/1985	0.1	92.86	3.06	128	150
Râmnic	56	23.5	131/1988	0.076	29.61	1.98	89	166

În continuare sunt prezentate rezultatele obținute în urma aplicării analizei seriilor de debite maxime ale râului Casimcea și afluenții săi.

7.1.2. Rezultatele analizei frecvențiale

Potrivit paragrafelor anterioare, pentru cartarea inundabilității este necesară determinarea probabilității de depășire a debitelor pe râul Casimcea. S-a aplicat analiza frecvențială cu scopul de a determina debitele cu probabilitățile de depășire de 10%, 1% și 0,1%.

Histograme rezultate în urma analizelor

Figurile următoare (**Figura 28**, **Figura 29**, **Figura 30** și **Figura 31**) prezintă histogramele pentru fiecare stație hidrometrică. Toate histogramele sunt asimetrice către dreapta (coada se extinde către dreapta, majoritatea datelor fiind concentrate în stânga); majoritatea evenimentelor apar în intervalul $0\text{--}20 \text{ m}^3/\text{s}$ (între 41% - stația Cheia și 61% - stația Râmnic). Evenimentele hidrologice cu debite foarte mari, care depășesc $100 \text{ m}^3/\text{s}$, variază de la stație la stație: la stațiile hidrometrice Casimcea și Râmnic există un singur astfel de eveniment, respectiv trei evenimente, reprezentând mai puțin de 5% din total. Cu toate acestea, la celelalte două stații (Cheia și Cartal), aceste evenimente reprezintă puțin peste 12% din total.

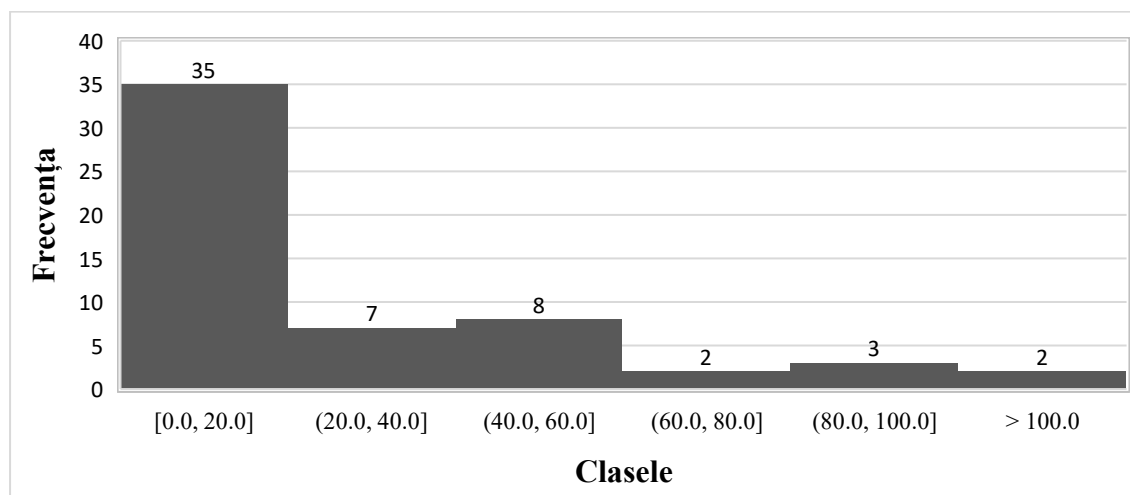


Figura 28 *Histograma debitelor maxime SH Casimcea (1965-2021)*

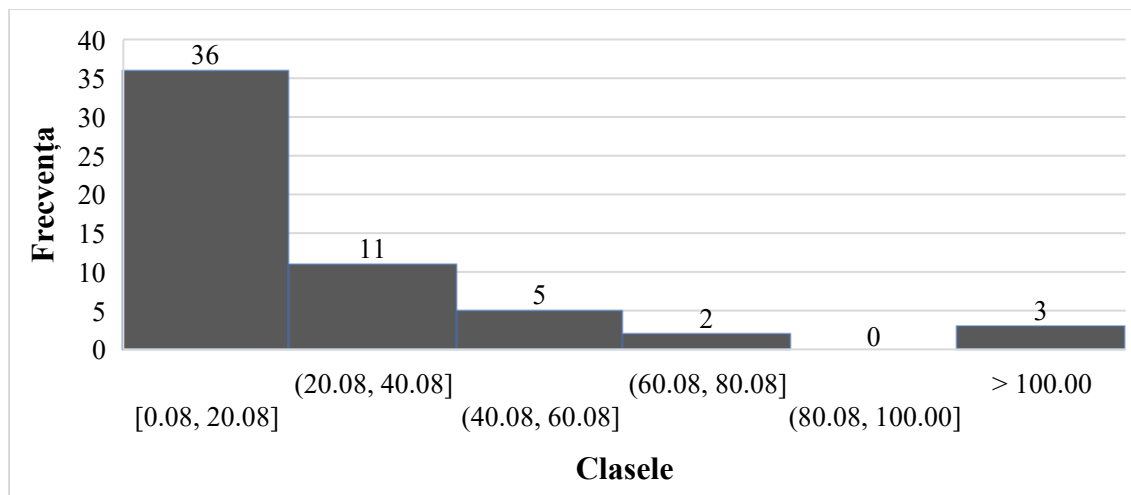


Figura 29 *Histograma debitelor maxime SH Pantelimon-Râmnic (1965-2021)*

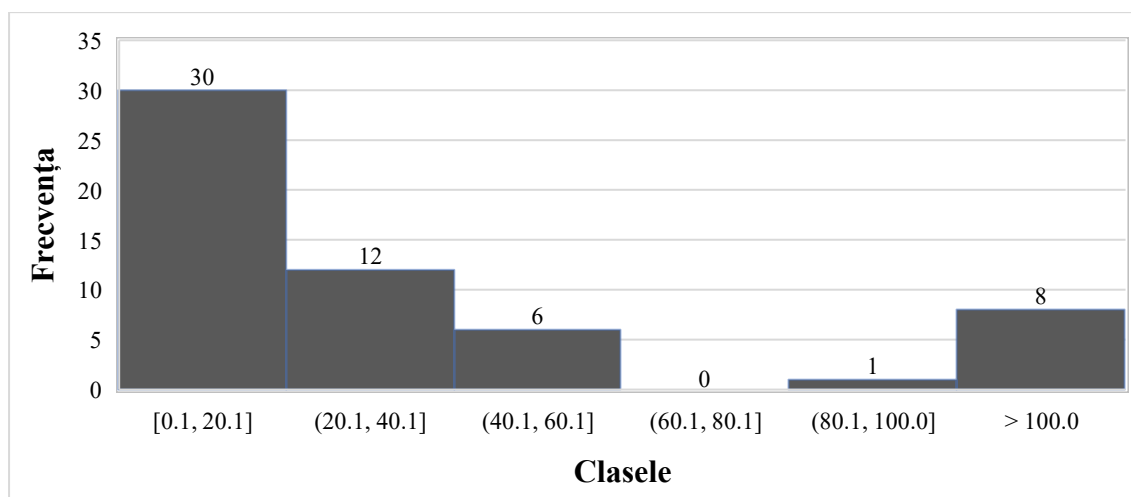


Figura 30 *Histograma debitelor maxime SH Pantelimon-Cartal (1965-2021)*

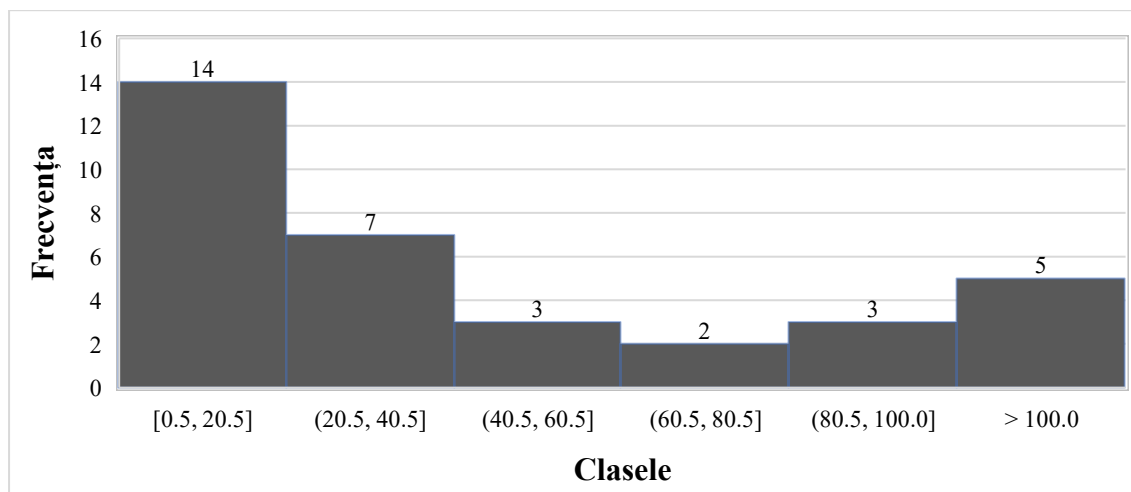


Figura 31 *Histograma debitelor maxime SH Cheia (1988-2021)*

Pe baza descrierilor furnizate în paragrafele de mai sus, cele mai potrivite funcții de distribuție teoretică pentru aceste evenimente ar putea fi din familiile Weibull și Log-Normal.

Rezultate teste statistice

Estimarea tendințelor

Așa cum am menționat în **Capitolul III** am investigat tendințele și punctele de ruptură în seriile de debite maxime. De asemenea, amintim că pentru realizarea testelor de tendință am utilizat programul MAKESENS, și programul Khronostat, care detectează un punct de „rupere” în seria de timp.

Patru niveluri de semnificație (α) sunt testate cu programul MAKESENS: 0,001, 0,01, 0,05 și 0,1. Toate seriile temporale investigate prezintă un comportament similar. **Figura 32** oferă un exemplu grafic al rezultatului obținut pentru stația Casimcea.

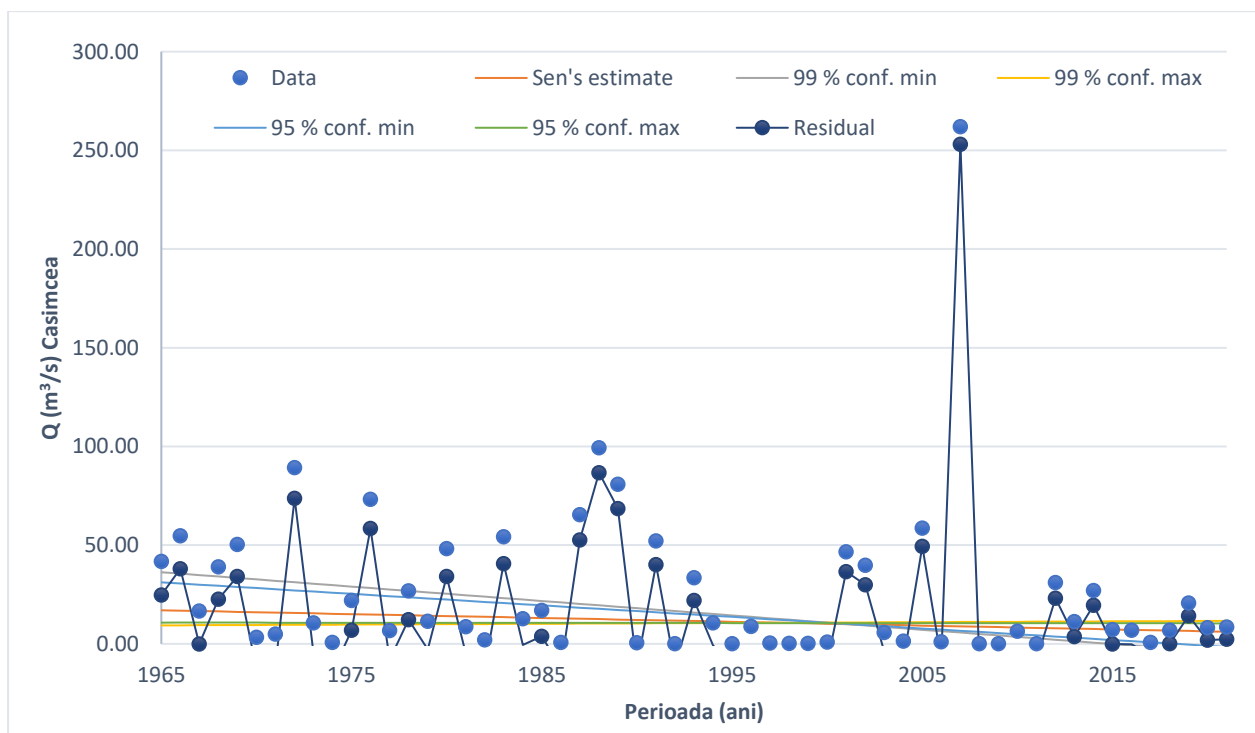


Figura 32 *Rezultatul testului Mann-Kendall pentru stația Casimcea*

Estimarea ruperilor în seriile de date

Programul Khronostat dezvoltat de IRD Montpellier (Institutul de Cercetare pentru Dezvoltare). Programul a fost dezvoltat ca parte a unui studiu privind variabilitatea climei în Africa de Vest și Centrală și este orientat pe analiza seriilor hidrometeorologice [20]. Acesta conține următoarele teste statistice: teste de staționaritate (test autocorelare; test de corelare a rangurilor) și teste de omogenitate (testul Pettitt, testul Buishand, testul Hubert, metoda Bayesian a lui Lee & Heghinian). Acestea au fost prezentate în **Capitolul III**.

În **Tabelul 5** prezentăm rezultatele testelor statistice disponibile în cadrul programului Khronostat. Trebuie menționat că testele Pettitt, Lee & Heghinian și Hubert oferă, de asemenea, anul în care a avut loc ruperea datelor din seria temporală.

Tabelul 5 Rezultat de independență ale seriei lor de timp de la toate stațiile investigate

Stația	Perioada (ani)	media (m ³ /s)	Corelația de rang	Buishard	Pettitt		Lee & Heghinian		Hubert
					rezultat	an	rezultat	an	
Casimcea	57	26.03	respins la 95% confid.	respins la 95% confid	respins la 95% confid	1989	respins Ho	1989	acceptat
Cheia	34	55.0	respins la 95% confid	respins la 95% confid	respins la 95% confid	2007	Respins Ho	2007	acceptat
Cartal	57	50.8	respins la 95% confid	respins la 95% confid	respins la 95% confid	2006	respins Ho	2006	acceptat
Ramnic	57	23.9	respins la 90% confid.	respins la 90% confid	respins la 90% confid	2006	respins Ho	2006	acceptat

Rezultatele arată că datele din seriile de timp investigate nu sunt aleatorii la un nivel de încredere de 95% (nivel de semnificație de 0,1 și 0,05) și ar putea admite o tendință sau o periodicitate. Analiza datelor din **Tabelul 5** arată că testele Buishard, Pettitt și Lee & Heghinian resping ipoteza nulă la nivelul de semnificație de 0,05 pentru Casimcea, Cheia și Cartal și la nivelul de semnificație de 0,1 pentru stația hidrometrică Râmnic. Testele Hubert au admis ipoteza nulă. Două dintre cele trei teste care ar putea furniza anul întreruperilor admit o întrerupere în 2006 pentru Casimcea și Râmnic, 2007 pentru Cheia și 1989 pentru stația hidrometrică Casimcea. Seria de date privind debitele investigate nu este evident omogenă. În consecință, conform testelor Lee & Heghinian, ruptura este mai severă în stația Cheia (probabilitate punct de rupere de 0,4131) decât în stația Casimcea (probabilitate punct de rupere de 0,0738), Cartal (probabilitate punct de rupere de 0,1616) și Râmnic (probabilitate punct de rupere de 0,1175).

Alegerea modelului frecvențial empiric (EDF - Empirical Distribution Function)

Pentru alegerea modelului frecvențial am utilizat Curba de Durată a Debitului (FDC); aceasta a fost determinată utilizând două funcții empirice de frecvență cumulativă (EDF): Hazen și Weibull. S-au folosit funcțiile de distribuție empirică Weibul, și Hazen pentru toate cele patru serii de timp. Valorile obținute prin intermediul funcțiilor de distribuție teoretice (PDF) vor fi comparate cu cele extrase pentru perioade de revenire de 100, 50, 20, 10, 5 și 2, obținute cu ecuația Hazen și Weibull (**Tabelul 6**).

Tabelul 6 Valorile debitului maxim pentru toate stațiile

Debit maxim (m ³ /s)						
Perioada de revenire (year)	100	50	20	10	5	2
EDF	Hazen					
Casimcea	262	157.87	89.3	65.4	50.3	10.7
Cheia	no	377.92	310	128	56.2	12.9
Cartal	333	324.72	287	246	83.1	24.3
Ramnic	131	119.85	110	57.2	39.8	12.6
EDF	Weibull					
Casimcea	262	224.35	99.3	73.3	50.3	10.7
Cheia	no	333	297.87	246	83.1	24.3
Cartal	488	460.48	316	224	56.2	12.9
Ramnic	131	128.12	114.00	68.8	39.8	12.6

Alegerea modelului frecvențial teoretic (PDF - Probability Density Function)

Într-o lucrare recentă, Cerneagă C. et al (2021) [27], s-au analizat mai multe modele frecvențiale realizate cu programul Hydrognomon conceput pentru prelucrarea datelor hidrologice, aplicația open source care rulează pe platformele standard Microsoft Windows și face parte din cadrul openmeteo.org.

Au fost testate funcțiile de distribuție recomandate în literatura de specialitate – Log-Normal, Pearson tip III, Log-Pearson tip III și Gumbel – pentru seriile de timp ale debitelor maxime anuale, disponibile până în anul 2016 la momentul realizării analizei.

Testul Kolmogorov-Smirnov de la Hydrognomon și Anderson Darling de la EasyFit au fost utilizate pentru a testa ipoteza nulă „ H_0 : urmează o distribuție specificată”.

Log-Pearson Tip III a fost acceptat, dar valorile pentru diferite perioade de revenire sunt foarte mari în comparație cu cele obținute folosind formulele empirice calculate anterior.

În consecință, am renunțat la funcția de distribuție folosite în mod uzual pentru debitele maxime, ale căror aplicare supraestimează valorile de debite maxime și am testat și alte funcții de distribuție.

A fost propusă următoarea metodă: programul Hydrognomon care folosește testul K-S, ca un test statistic de ajustare (goodness-of-fit - GOF) ce verifică dacă un eșantion aparține unei anumite distribuții a populației.

Pentru stația Casimcea este prezentat în continuare **Tabelul 7**, iar în **Tabelul 8** sunt redată funcțiile PDF cu cele mai bune rezultate pentru toate stațiile hidrometrice.

Tabelul 7 Rezultatele test K-S pentru stația hidrometrică Casimcea

<i>Kolmogorov-Smirnov/ PDF</i>	<i>a=1%</i>	<i>rang</i>	<i>D_{max}</i>
<i>Gamma</i>	ACCEPT	1	0.0796
<i>Pearson III</i>	ACCEPT	2	0.0831
<i>GEV-Min</i>	ACCEPT	3	0.0847
<i>EV3-Min (Weibull, L-Moments)</i>	ACCEPT	4	0.098
<i>EV3-Min (Weibull)</i>	ACCEPT	5	0.1052
<i>Pareto (L-Moments)</i>	ACCEPT	6	0.1200
<i>GEV-Min (L-Moments)</i>	ACCEPT	7	0.1215

Tabelul 8 Funcțiile PDF acceptate în ordinea rangului obținut

<i>PDF</i>	<i>Gamma</i>	<i>Pearson III</i>	<i>GEV-Min</i>	<i>EV3-Min (Weibull, L-Moments)</i>	<i>EV3-Min (Weibull)</i>	<i>Pareto (L-Moments)</i>	<i>GEV-Min (L-Moments)</i>	<i>GEV-Max (L-Moments)</i>	<i>Log Pearson III</i>
<i>Stația</i>									
<i>Casimcea</i>	1	2	3	4	5	6	7	x	x
<i>Cheia</i>	7	x	x	6	3	1	4	2	5
<i>Cartal</i>	7	x	6	2	1	5	5	4	3
<i>Ramnic</i>	2	x	x	5	6	3	4	1	x

În continuare am comparat valorile debitelor maxime obținute prin ajustarea funcțiilor PDF valabile pentru toate stațiile hidrometrice cu cele obținute prin funcțiile EDF. Un exemplu este oferit pentru stația Casimcea, valorile debitului maxim estimate prin intermediul PDF-urilor alese și valorile EDF corespunzătoare perioadei de revenire sunt prezentate în **Tabelul 9**.

Tabelul 9 *Comparație între valorile PDF și valorile EDF la stația Casimcea*

<i>Perioada de revenire (T)</i> <i>PDF's</i>	1000	100	50	20	10	5	2
<i>Casimcea – Q_{max} (m³s)</i>							
<i>Gamma</i>	323.52	193.42	155.81	107.94	73.83	42.63	9.94
<i>EV3-Min (Weibull, L-Moments)</i>	376.84	201.90	157.07	104.16	69.47	40.032	10.95
<i>EV3-Min (Weibull)</i>	361.02	196.20	153.52	102.77	69.18	40.37	11.37
<i>Pareto (L-Moments)</i>	469.36	200.59	149.70	96.69	65.17	39.53	12.82
<i>GEV-Min (L-Moments)</i>	331.60	187.72	149.21	102.36	70.45	42.15	11.95
<i>EDF</i>		262	157.8	89.3	65.4	50.3	10.7

Cea mai importantă concluzie este că modelele nu pot fi alese exclusiv pe baza valorii obținute pentru rang. Acesta este motivul pentru care am utilizat o serie de coeficienți care determină eroarea dintre valorile modelate și cele observate. Coeficientul Pearson (r), $RMSE$ (eroarea medie pătratică), NSE (coeficientul de eficiență Nash-Sutcliffe) și R^2 (R-Pătrat) sunt utilizați pentru a măsura performanța modelelor PDF.

Tabelul 10 *Rezultatele calibrării: valorile observate pentru probabilitatea de depășire sunt extrase cu ecuațiile Hazen și, respectiv, Weibull*

	Hazen					Weibull			
	rang	r	RMSE	NSE	R ²	r	RMSE	NSE	R ²
Casimcea									
Gamma	1	0.96	29.40	0.87	0.92	0.98	39.87	0.81	0.92
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	2	0.97	25.68	0.90	0.95	0.98	37.15	0.84	0.95
EV3-Min (Weibull)	3	0.97	27.82	0.89	0.94	0.98	39.74	0.81	0.94
Pareto (L-Moments)	4	0.98	25.86	0.90	0.97	0.99	39.87	0.81	0.97
GEV-Min (L-Moments)	5	0.97	31.24	0.86	0.94	0.98	43.30	0.78	0.94
Cheia									
Pareto (L-Moments)	1	0.87	73.34	0.62	0.76	0.93	56.67	0.74	0.87
EV3-Min (Weibull)	2	0.90	80.06	0.55	0.80	0.94	56.91	0.74	0.88
GEV-Min (L-Moments)	3	0.92	52.44	0.81	0.85	0.93	53.70	0.77	0.86
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	4	0.90	60.02	0.75	0.81	0.82	172.03	-1.40	0.67
Gamma	5	0.90	60.02	0.75	0.81	0.94	53.91	0.76	0.88
Cartal									
EV3-Min (Weibull)	1	0.98	49.00	0.92	0.80	0.97	79.97	0.81	0.93
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	2	0.98	38.52	0.75	0.81	0.98	67.81	0.86	0.92
Pareto (L-Moments)	3	0.96	58.72	0.62	0.76	0.96	92.35	0.74	0.86
GEV-Min (L-Moments)	4	0.97	45.35	0.81	0.85	0.97	72.52	0.84	0.91
Gamma	5	0.99	40.54	0.75	0.81	0.99	68.58	0.86	0.96
Râmnic									
Gamma	1	0.86	37.36	0.29	0.74	0.83	38.43	0.28	0.70

Pareto (L-Moments)	2	0.79	68.69	-1.41	0.62	0.75	69.22	-1.33	0.57
GEV-Min (L-Moments)	3	0.87	34.92	0.38	0.76	0.82	46.06	-0.03	0.67
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	4	0.82	61.21	-0.91	0.68	0.79	44.37	-0.84	0.63
EV3-Min (Weibull)	5	0.84	43.35	0.04	0.71	0.81	61.55	0.04	0.66

Rezultatele prezentate în tabelul de mai sus (**Tabelul 10**) arată: (i) coeficienții de corelație (r) dau rezultate bune, apropiate de valoarea 1, ceea ce înseamnă o corelație excelentă între valorile observate și cele modelate; există câteva excepții: la stația Râmnic valoarea r variază între 0,79 și 0,87, putem concluziona că există o relație liniară pozitivă puternică între valorile debitelor maxime observate și cele modelate; (ii) R^2 oferă, de asemenea, rezultate bune pentru stația Casimcea, dar pentru restul stațiilor R^2 sunt peste 0,85; un $R^2 > 0,5$ este de obicei considerat satisfăcător. (iii) NSE dă unele valori apropiate de 1 sau negative; un NSE apropiat de 1 arată că estimările modelului sunt precise în aceeași măsură ca media datelor observate, ceea ce indică o performanță inacceptabilă și (iv) valorile $RMSE$ trebuie interpretate cu atenție. Eroarea $RMSE$ acoperă intervalul 25,68 m³/s și 172,03 m³/s. Modelele PDF cu cele mai mici valori $RMSE$ au obținut cele mai bune rezultate. $RMSE$ utilizează aceleași unități ca și variabilă dependentă (m³/s) și este sensibil la valori aberante.

Rezultatele obținute prin aplicarea funcțiilor de eroare, prezentate în **Tabelul 10**, sunt similare cu cele obținute prin graficele de probabilitate.

A fost determinat și intervalul de încredere (CI). În figura următoare (**Figura 33**) se observă că funcția EV3-Min-Weibull (L-moment) oferă rezultate în limitele CI. Așa cum era de așteptat, coada stângă a PDF se găsește în afara intervalului de predicție (PI), dar se află în intervalele CI.

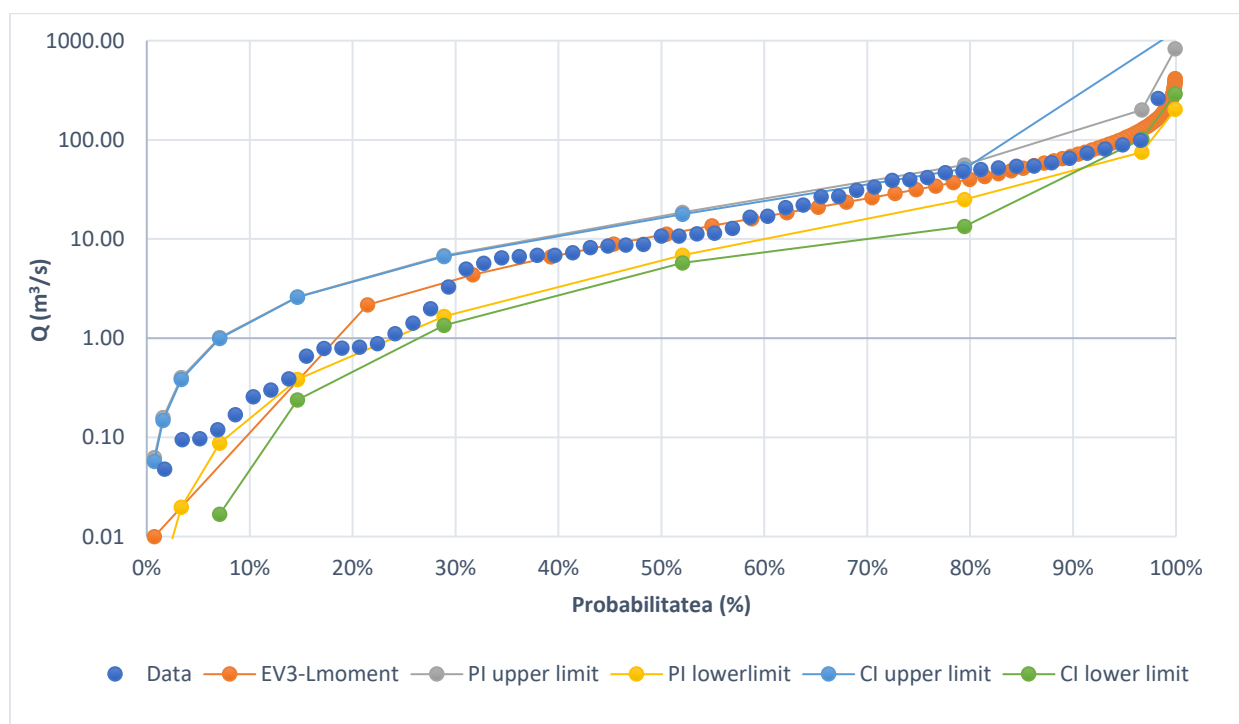


Figura 33 Performanța realizată de PDF EV3 la stația Casimcea

În concluzie, nu poate fi identificat un singur model de distribuție a probabilităților care să fie aplicabil în mod universal pentru râul Casimcea și afluenții săi, oferind totodată cea mai bună performanță statistică. O limitare importantă a analizei o reprezintă dependența de testul

Kolmogorov–Smirnov, însă aplicarea testului Anderson–Darling nu a evidențiat diferențe semnificative în ceea ce privește calitatea ajustării.

Modelarea 1D și 2D a fost realizată utilizând valorile debitelor din PPPDEI, având în vedere că acestea oferă un grad sporit de siguranță și sunt considerate mai reprezentative pentru scenariile de proiectare. Comparativ, debitele estimate prin analiza frecvențială au prezentat valori sensibil mai mici, ceea ce ar fi condus la subestimarea riscurilor hidraulice și hidrologice. Alegerea valorilor din PPPDEI permite o dimensionare mai conservatoare și contribuie la respectarea cerințelor de siguranță impuse de reglementările tehnice în vigoare. În plus, utilizarea acestor debite conduce la obținerea unor hărți de hazard și risc mai realiste, cu aplicabilitate directă în procesele de planificare teritorială și management al riscurilor. Din acest motiv, valorile din PPPDEI au fost preferate în detrimentul celor obținute prin metode statistice, reflectând o estimare mai adecvată a debitelor maxime posibile pentru zonele analizate.

7.2. Rezultatele modelării 1D

Nistorești Pentru simularea hidraulică în regim nepermanent, în cadrul modelului aplicat în zona Nistorești, s-a folosit hidrograful de 1%, testându-se mai multe valori ale pasului de timp (1 minut, 30 secunde și 10 secunde). Reducerea pasului de timp conduce la o îmbunătățire semnificativă a acurateții bilanțului de volum, eroarea procentuală scăzând de la aproximativ 1,45% (la 1 minut) până la 0,15% (la 10 secunde) - **Error! Reference source not found..**

În continuare sunt prezentate date privind distribuția vitezelor și a debitelor (**Figura 34**) pentru sectorul Nistorești

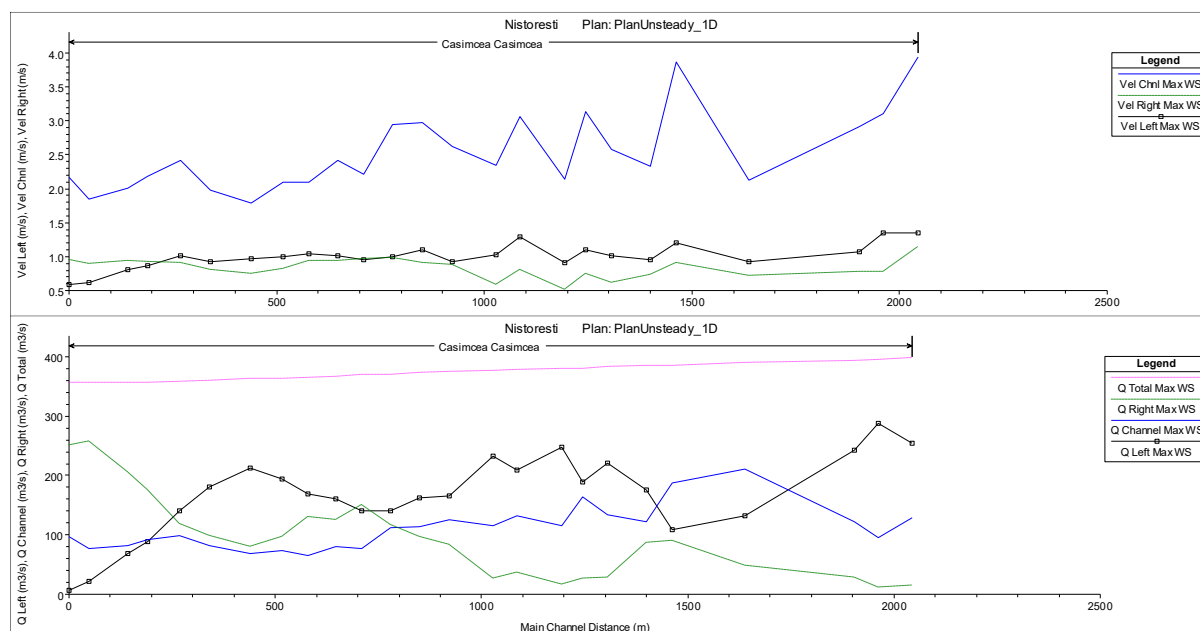


Figura 34 Distribuției vitezelor și debitelor în regim nepermanent – Nistorești

Putem observa că în regim nepermanent, viteza apei în albia minoră depășește 3,8 m/s în anumite secțiuni, semnalând accelerări locale determinate de variațiile de debit și de propagarea undelor de viitură. În zonele inundate, viteza pe malul stâng se menține, în general, între 0,6 și 1,4

m/s, iar pe malul drept poate atinge valori de până la 1,5 m/s, ceea ce evidențiază o implicare activă a spațiilor laterale în procesul de scurgere în condiții tranzitorii.

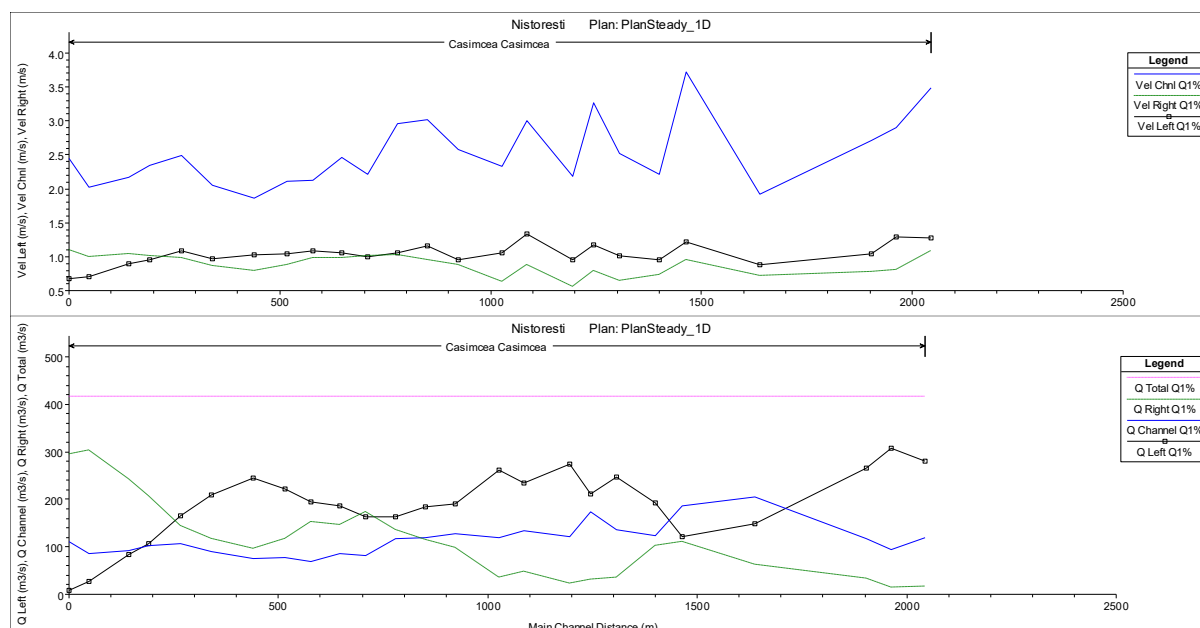


Figura 35 Distribuției vitezelor și debitelor în regim permanent – Nistorești

Față de regimul nepermanent, în regim permanent viteza apei în albia minoră se menține între 2,0 și 3,8 m/s, fără variații semnificative de-a lungul sectorului analizat. Această uniformitate reflectă o curgere stabilă și echilibrată din punct de vedere hidraulic, fără accelerări locale sau redistribuiri bruște ale fluxului. În zonele laterale, inundate temporar, valorile vitezei variază între 0,5 și 1,1 m/s pe malul stâng și între 0,6 și 1,3 m/s pe malul drept — caracteristici tipice sectoarelor marginale cu adâncime redusă, unde energia curgerii este disipată progresiv.

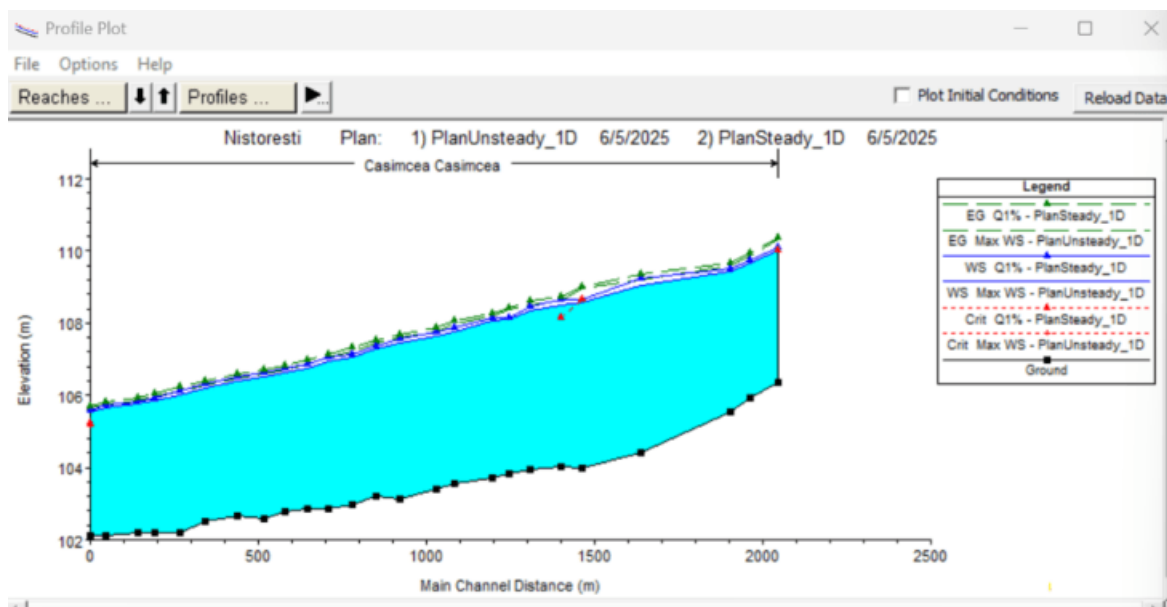


Figura 36 Nivelul apei în regim nepermanent/ permanent – Nistorești

Astfel, analiza comparativă relevă diferențele fundamentale între cele două regimuri: de la un flux uniform, controlat geometric, în regim permanent, la un comportament tranzitoriu

complex, în regim nepermanent, influențat de caracterul temporar al undei de viitură și de variabilitatea locală a condițiilor de curgere, dar, așa cum se poate observa și în **Figura 36**, nivelurile maxime ale apei în regim nepermanent sunt apropiate de cele din regimul permanent, diferențele fiind moderate și constante pe întregul sector analizat. Acest lucru indică faptul că, deși regimul tranzitoriu generează o ușoară creștere a nivelului în zonele laterale inundabile, nu apar instabilități hidraulice semnificative, iar propagarea undei de viitură are loc într-un mod previzibil. În consecință, dinamica curgerii în regim nepermanent reflectă o extindere temporară în zonele adiacente malurilor, fără modificări bruște de regim sau comportamente locale necontrolate.

Războieni În cadrul modelării hidraulice nepermanente realizate pentru zona Războieni, în mod similar cu cea de la Nistorești, au fost testate cele trei variante de pas de timp: 1 minut, 30 de secunde și 10 secunde. Deși reducerea pasului de timp determină o ușoară îmbunătățire a acurateței (diferență de ordinul a câtorva metri cubi), această corecție este marginală în raport cu resursele de procesare suplimentare necesare.

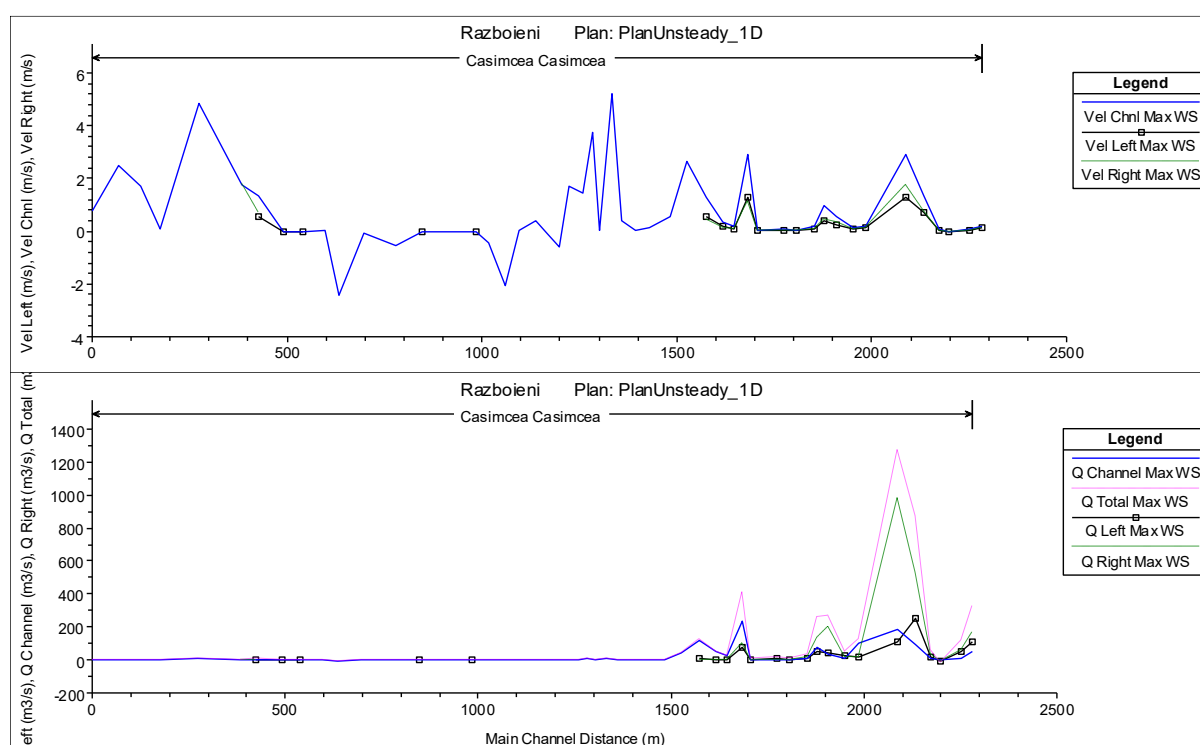


Figura 37 Distribuției vitezelor și debitelor în regim nepermanent – Războieni

În plus, simularea hidraulică în regim nepermanent pentru sectorul Războieni evidențiază o variabilitate semnificativă a vitezelor și debitelor pe traseu, specifică propagării unei unde de viitură. În albia minoră, viteza maximă atinge 6 m/s, iar în anumite secțiuni se înregistrează chiar valori negative, semnalând refluxuri locale sau oscilații de curgere cauzate de dinamica instabilă a undei. Pe zonele adiacente malurilor stâng și drept, vitezele rămân reduse, oscilând între 0 și 2 m/s.

Condiția de margine la intrare a impus un vârf de debit de 398 m³/s, însă în aval (după stația 1900) modelul a evidențiat vârfuri de până la 1400 m³/s, ceea ce ar reprezenta o amplificare semnificativă a undei de viitură pe parcursul propagării.

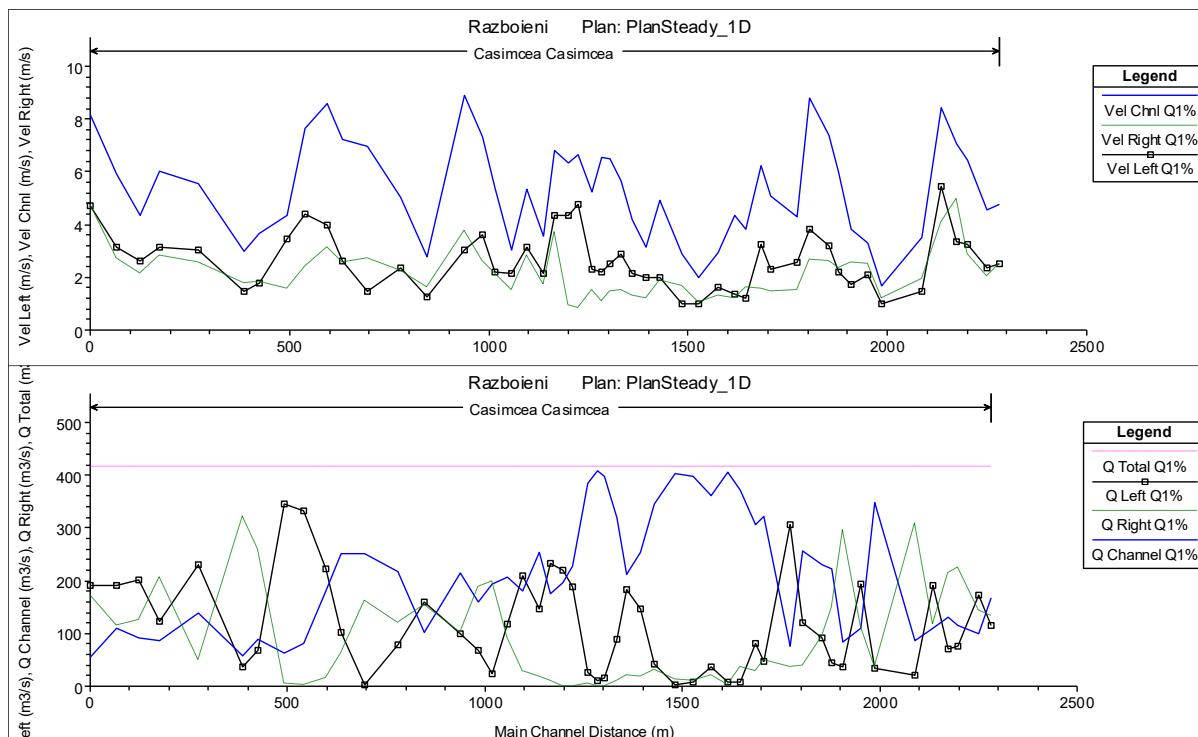


Figura 38 Distribuției vitezelor și debitelor în regim permanent – Războieni

Față de simularea realizată în regim nepermanent, în regim permanent, corespunzător unui debit cu probabilitate de depășire de 1%, se evidențiază o distribuție marcat diferențiată a vitezelor în cadrul secțiunii transversale.

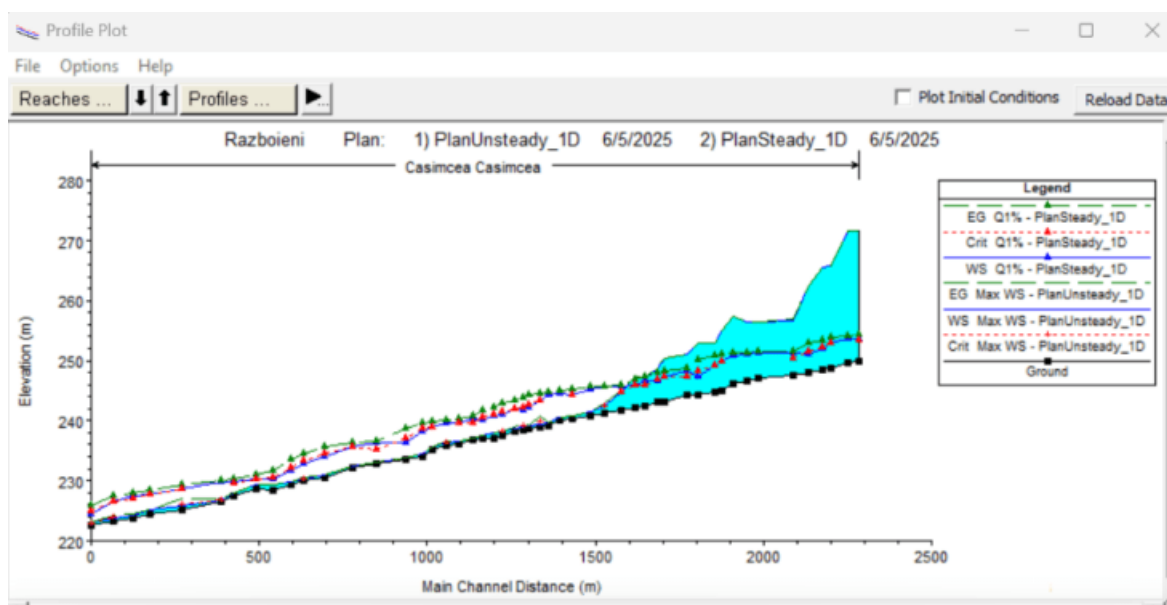


Figura 39 Nivelul apei în regim nepermanent/ permanent – Războieni

Astfel, regimul permanent prezintă o distribuție mai stabilă, cu viteze mari și debite constante, caracteristice unui flux uniform și bine definit în condiții extreme.

În schimb, regimul nepermanent scoate în evidență o variație mult mai mare (**Figura 39**), cu zone de reflux, acumulare și descărcare rapidă, ceea ce reflectă un răspuns complex al râului la

o undă de viitură, dar unde mai sunt necesare analize cu privire la consistența datelor geometrice, pentru a confirma dacă variațiile observate sunt rezultatul unor inexactități în configurarea și calibrarea simulării. Mai putem spune și că această lipsă de precizie poate fi generată de caracterul discontinuu al scurgerii, precum și de sensibilitatea ridicată a modelului față de configurația geometrică a secțiunilor transversale introduse în simulare.

7.3. Rezultatele modelării 2D

În zona Nistorești, scenariile simulate indică o distribuție similară a debitului, cu rezultate coerente la nivel macro, în ciuda instabilității modelului 1D nepermanent. În zona Războieni, modelarea 2D nepermanentă și 1D permanentă oferă rezultate comparabile privind extinderea inundației, în timp ce modelul 1D nepermanent evidențiază instabilități și limite neregulate, necesitând recalibrare.

Un alt aspect important îl reprezintă corelarea rezultatelor obținute în cadrul acestor modelări cu cele prezentate în cadrul **Planului pentru Prevenirea, Protecția și Diminuarea Efectelor Inundațiilor**.

Mai mult decât, atât în contextul celui de-al doilea ciclu de planificare al **Planului de Management al Riscului la Inundații**, pentru bazinul hidrografic Dobrogea-Litoral, așa cum a fost prezentat și în **Capitolul II**, s-a constatat că pentru cursurile de apă interioare nu au fost actualizate limitele de inundabilitate generate din surse fluviale. Această omisiune impune o reevaluare în cadrul celui de-al treilea ciclu de planificare, cel puțin pentru sectoarele APSFR aflate în intravilan, utilizând date actualizate privind lucrările de infrastructură, amenajările hidrotehnice și modele digitale de teren recente.

În continuarea analizei pentru zona Nistorești, au fost reluați pașii metodologici detaliați în **Capitolul VI**, extinzându-se aria de calcul aferentă modelării 2D. În acest sens, s-a definit o nouă zonă de simulare cu o dimensiune a celulei de 100x100 m, comparativ cu cea de 10x10 m utilizată în modelul anterior.

Păstrând aceeași rezoluție spațială a modelului digital al terenului, extinderea modelului a avut ca obiectiv verificarea consistenței comportamentului hidraulic la o scară mai mare. Rezultatele obținute au evidențiat limite de inundație apropiate cu cele generate de modelul inițial, ceea ce confirmă continuitatea regimului de curgere și uniformitatea caracteristicilor topografice și hidraulice pe întregul sector analizat.

Această constatare subliniază caracterul reprezentativ al sectorului inițial din punct de vedere hidraulic, indicând faptul că extinderea ariei de modelare nu a condus la variații semnificative în extinderea suprafețelor inundabile. Menținerea rezoluției MDT-ului pe întreaga arie modelată a asigurat coerența și comparabilitatea rezultatelor, demonstrând că o discretizare spațială unitară permite obținerea unor simulări fiabile atât la scară locală, cât și regională (**Figura 40**).

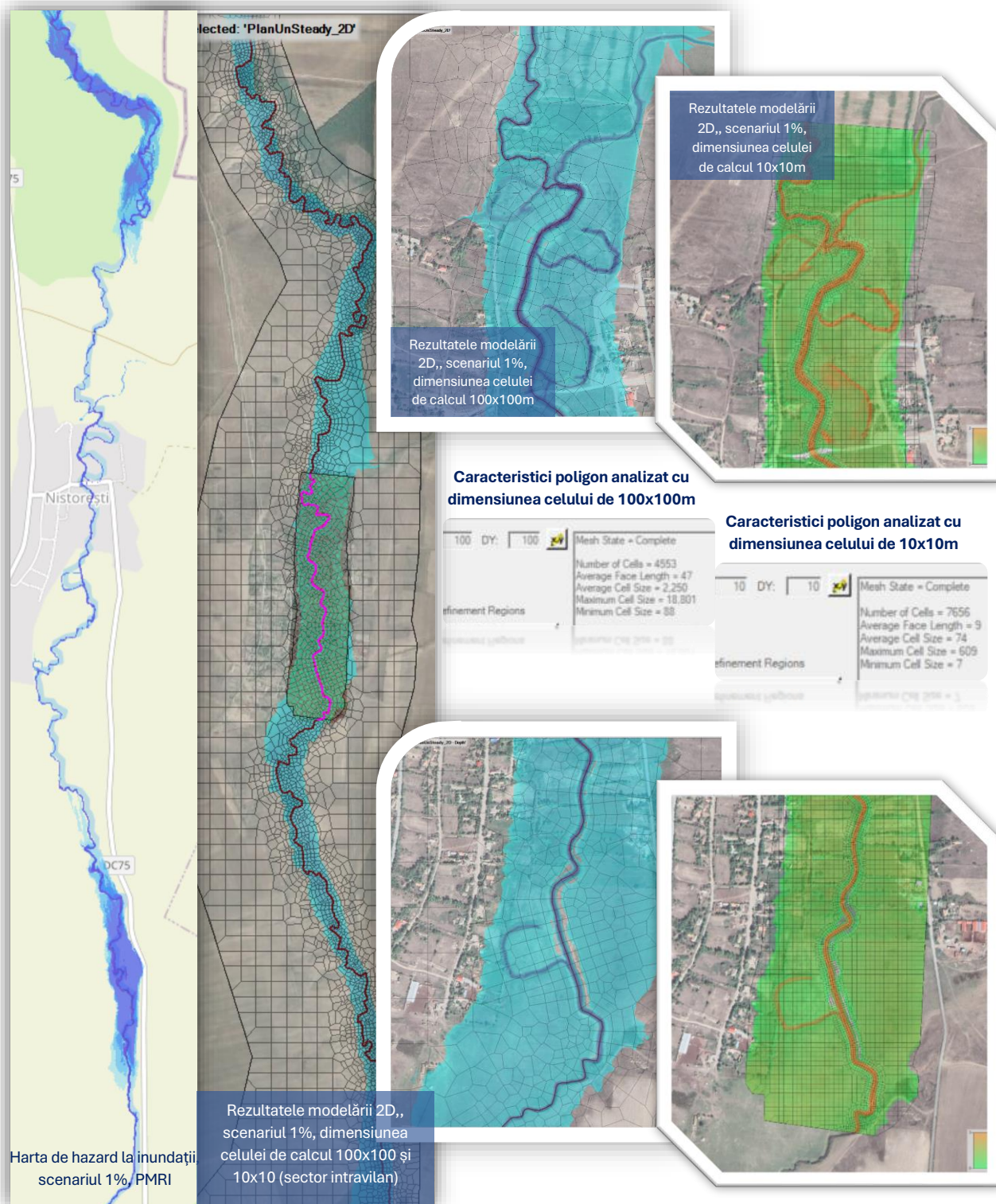


Figura 40 Rezultatele modelării 2D în raport cu limita de inundabilitate disponibilă în Hărțile de Hazard și Risc la Inundații

Concluzii, contribuții personale și perspective viitoare

România a finalizat Ciclul II de implementare a Directivei Inundații la sfârșitul anului 2023, proces care a presupus revizuirea Hărților de Hazard și Risc la Inundații și elaborarea Planurilor de Management al Riscului la Inundații. Procesul, cu caracter ciclic (o dată la 6 ani), are la bază Ciclul I de implementare a Directivei, în care, pentru bazinul hidrografic Dobrogea-Litoral, s-a realizat o modelare hidrologică pe o suprafață de 1076 km², cu programul MIKE SHE, și o modelare hidraulică, realizată cu MIKE 11 și MIKE 21, acoperind o lungime totală a cursurilor de apă de 889 km, 726 km modelate 1D și 163 km modelate 2D.

Deși au fost depuse eforturi semnificative pentru revizuirea PMRI, la nivelul spațiului hidrografic Dobrogea-Litoral nu au fost selectate pentru remodelare în Ciclul II, de către Administrația Națională „Apele Române” și Institutul Național de Hidrologie și Gospodărire a Apelor, sectoare de râu identificate anterior în Ciclul I.

În acest context, Teza de Doctorat intitulată *„Modelarea numerică a terenului pentru combaterea inundațiilor din zona Dobrogei de Nord”* are ca obiectiv determinarea limitelor de inundabilitate pentru localitățile Nistorești și Războieni, traversate de râul Casimcea – curs de apă desemnat ca APSFR în Ciclul I. Metodologia utilizată presupune integrarea unui model digital de teren de înaltă rezoluție cu modelarea hidraulică 1D și 2D în HEC-RAS.

Rezultatele cercetării

În urma unei analize bibliografice riguroase privind analiza frecvențială, modelarea numerică a terenului și modelarea matematică a inundațiilor, a fost propusă o metodologie aplicabilă BH studiat, structurată în cinci etape. Aceasta permite determinarea limitelor de inundabilitate în zonele studiate, precum și compararea și validarea rezultatelor obținute în raport cu HHRI existente.

Analiza frecvențială

Rezultatele analizei frecvențiale efectuate asupra debitelor maxime din bazinul hidrografic Casimcea arată că este dificil să fie recomandată o singură PDF (optimă) pentru toate râurile studiate. În plus, este esențială investigarea altor distribuții de probabilitate adaptate specific pentru analiza debitelor în regiuni aride sau semiaride, mai ales că debitele obținute prin analiză frecvențială au fost mai mici decât cele din Planul pentru Prevenirea, Protecția și Diminuarea Efectelor Inundațiilor. În continuare s-a considerat oportun ca modelarea hidraulică să se realizeze pe baza valorilor din PPPDEI, această alegere a fost motivată de necesitatea evitării unei eventuale subestimări a riscului, ce ar putea rezulta din utilizarea unor debite mai mici.

Modelarea terenului

Realizarea unui model digital al terenului de înaltă rezoluție a fost posibilă prin integrarea mai multor tehnologii și metode moderne de achiziție a datelor spațiale, precum: sistemele GNSS RTK, tehnologia LiDAR și fotogrammetria aeriană, completate de măsurători terestre de precizie. Aceste metode au fost susținute de utilizarea unor programe specializate pentru procesarea, filtrarea, modelarea și validarea datelor rezultate.

Modelarea hidraulică

În cartarea inundațiilor s-a utilizat modelul hidraulic HEC-RAS versiunea 6.7, dezvoltat de USACE. Acest program permite atât modelarea unidimensională (1D), cât și modelarea bidimensională (2D) a curgerii apei, oferind o flexibilitate sporită pentru simularea diferitelor regimuri hidraulice și evaluarea extinderii zonelor inundabile.

Contribuții personale

Prezenta lucrare aduce contribuții originale semnificative în domeniul evaluării riscului la inundații, structurate în șase direcții principale, cu un caracter aplicativ și metodologic pronunțat:

1. Integrarea tehnologiilor moderne pentru obținerea modelului digital al terenului (MDT):

- Achiziția și prelucrarea de date topografice cu precizie ridicată utilizând echipamente GNSS RTK și sisteme UAS dotate cu senzor LiDAR și cameră RGB;
- Realizarea personală a misiunilor aeriene: planificarea zborurilor, calibrarea senzorilor, colectarea datelor și integrarea acestora în procesele de modelare hidraulică, asigurând astfel un control complet al calității datelor spațiale.

2. Evaluarea comparativă a modelării hidraulice unidimensionale (1D) și bidimensionale (2D):

- Modelarea detaliată a regimurilor de curgere permanentă și nepermanentă, utilizând atât debite constante, cât și variabile, specifice scenariilor reale de inundație;
- Evidențierea limitărilor modelării 1D în cazul geomorfologiilor complexe și identificarea scenariilor în care debitul constant asigură o stabilitate numerică superioară.

3. Aplicarea modelării 2D pentru scenarii complexe de inundație

- Configurarea și calibrarea simulărilor 2D cu ajustarea dimensiunii celulelor și a perimetrelor simulate în funcție de caracteristicile geomorfologice ale terenului;
- Validarea internă a modelelor 2D prin corelare cu datele topografice colectate din teren și cu observații empirice, obținând rezultate coerente și robuste din punct de vedere numeric.

4. Corelarea rezultatelor modelării cu hărțile de hazard oficiale:

- Realizarea unei analize comparative între rezultatele proprii și hărțile de hazard la inundații din cadrul PMRI (Ciclurile I și II);
- Identificarea unor discrepante majore în zonele Nistorești și Războieni, cauzate de lipsa actualizărilor cartografice și de metodologiile generale aplicate anterior, fără calibrare locală detaliată;
- Integrarea analizei frecvențiale în procesul de validare a debitelor utilizate a permis înțelegerea modului în care distribuțiile statistice influențează extinderea zonelor inundabile. Cu toate acestea, pentru a preveni subestimarea riscului, s-a decis utilizarea în

modelarea hidraulică a valorilor oficiale din PPPDEI, considerate ca fiind mai conservatoare.

5. Propuneri pentru îmbunătățirea evaluării hazardului la inundații:

- Rezultatele modelării 2D, coroborate cu observațiile de teren, evidențiază necesitatea actualizării limitelor de inundabilitate în localitățile Nistorești și Războieni, ca urmare a discrepanțelor semnificative față de hărțile oficiale existente;
- Susținerea reconstituirii evenimentelor istorice de inundație ca metodă suplimentară de validare a modelelor și de reducere a incertitudinilor asociate bazinelor cu date incomplete sau discontinui.

6. Optimizarea metodei de analiză frecvențială pentru regiuni aride:

- Elaborarea unei metodologii proprii de analiză frecvențială adaptată regiunilor cu regim hidrologic intermitent, specifice Dobrogei;
- Testarea și selecția funcțiilor de distribuție teoretică (Gamma, EV3-Min, Pareto, GEV-Min), validate prin teste de ajustare Kolmogorov-Smirnov și L-moment, corelate cu funcții de eroare (RMSE, NSE, R^2);
- A fost evidențiat faptul că distribuțiile teoretice clasice (precum Gumbel și Log-Normal) tind să supraestimeze considerabil debitele maxime pentru probabilități reduse, ceea ce subliniază necesitatea utilizării unor modele statistice adaptate particularităților hidrologice locale;
- Deși analiza frecvențială a reprezentat o abordare validă din punct de vedere științific, utilizarea debitelor din PPPDEI în modelarea hidraulică a reflectat o opțiune precaută, justificată de dorința de a evita subestimarea riscului și de a asigura un nivel ridicat de protecție.

Perspective viitoare

Rezultatele obținute în cadrul acestei cercetări oferă un cadru solid pentru evaluarea hazardului la inundații în bazine hidrografice de mici dimensiuni, dar pun și bazele unor direcții viitoare esențiale pentru consolidarea și extinderea cunoașterii în domeniu:

Extinderea modelării la scară de bazin:

Deoarece studiile au vizat tronsoane reprezentative (Nistorești și Războieni), o etapă următoare ar putea fi extinderea modelării 2D asupra întregului bazin Casimcea, cu integrarea rețelei hidrografice și a subbazinelor. Această abordare ar permite simularea propagării undelor de viitură și identificarea zonelor critice cu potențial de risc ridicat.

Integrarea proceselor de generare a scurgerii (ploaie-scurgere):

În etapa actuală, modelarea hidraulică s-a bazat pe debite impuse, preluate din PPPDEI. Pentru a spori realismul simulărilor, se propune integrarea unui model hidrologic care să simuleze generarea viiturilor pe baza precipitațiilor, facilitând astfel evaluarea scenariilor de inundații extreme în context climatic actual.

Validarea pe baza evenimentelor istorice de inundație:

O direcție promițătoare constă în corelarea modelelor 2D cu evenimente de inundație documentate istoric (ex. viitura din 2002), utilizând surse alternative: imagini satelitare de arhivă, fotografii locale, relatări ale populației. Această validare calitativă și cantitativă este crucială mai ales în bazine unde datele instrumentale sunt incomplete sau recente.

Completarea evaluării hazardului cu analiza vulnerabilității și a expunerii:

Pentru a trece de la analiza hazardului la o evaluare completă a riscului, este necesară integrarea informațiilor privind expunerea infrastructurii, a populației și a activelor socio-economice. Acest demers presupune corelarea modelelor hidraulice cu date cadastrale, socio-demografice și imagini satelitare, în vederea generării unor hărți tematice de risc aplicabile în managementul situațiilor de urgență.

Perfecționarea metodei frecvențiale prin testare avansată și abordări hibride:

- Pentru a obține o estimare cât mai realistă a debitelor maxime, este necesară testarea unor funcții de distribuție avansate (ex. Anderson-Darling modificat, Bayesiene), precum și dezvoltarea unui cadru hibrid care combină date istorice, empirice și rezultate ale simulărilor numerice. Acest demers ar reduce incertitudinile asociate probabilităților mici de apariție (0,1% și sub), mai ales în regiunile aride.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [01] **Aditya, F. Gusmayanti E. Sudrajat J.** (2021) Rainfall trend analysis using Mann-Kendall and Sen's slope estimator test in West Kalimantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 893, 2nd International Conference on Tropical Meteorology and Atmospheric Sciences 23 - 25 March 2021, Jakarta, Indonesia
- [03] **Agencia Europeană de Mediu.** (2016) Flood risks and environmental vulnerability. Exploring the synergies between floodplain restoration, water policies and thematic policies. *EEA Raport 1/2016*.
- [04] **Agencia Europeană de Mediu.** (2017) Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016 – An indicator-based report. *Publications Office*.
- [14] **Banca Mondială.** (2018) Romania Water Diagnostic Report. Moving toward EU Compliance, Inclusion, and Water Security.
- [16] **Banca Mondială.** (2020) Rezultatul 1: Inventariere și Plan de lucru din cadrul proiectului de Servicii de Asistență Tehnică Rambursabile privind „Asistență Tehnică pentru Elaborarea Planurilor de Management al Riscului la Inundații pentru România.
- [20] **Boyer, J.F.** (2002) Khronostat Software for Statistical Analysis of Time Series. *IRD UR2, Program 21 FRIEND AOC, UMRGBE Hydrology Team, University of Montpellier II, Paris Mines School*.
- [26] **Cerneagă, C., Dobrică, G., Maftai, C.** (2022) Hydraulic Modeling with HEC-RAS 2D in the Urban Area of Casimcea (Romania) Catchment. In: Chenchouni, H., et. al. New Prospects in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences. CAJG 2019. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-72543-3_105
- [27] **Cerneagă, C. and Maftai, C.** (2021) Flood frequency analysis of Casimcea river. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1138. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1138/1/012014>
- [29] **Chendeș, V. Rădulescu, D. Rîndașu, S. Ion, B. Achim, D. Preda, A.** (2014) Aspecte metodologice privind realizarea hărților de risc la inundații raportate în cadrul Directivei 2007/60/EC. *Hidrotehnica*, 59.
- [33] **Comisia Europeană.** (2015) EU overview of methodologies used in preparation of Flood Hazard and Flood Risk Maps.
- [37] **Curtea de Conturi a Uniunii Europene.** (2018) Floods Directive: progress in assessing risks, while planning and implementation need to improve. *Special report no 25*.
- [42] **EXCIMAP.** (2007) Handbook on good practices for flood mapping in Europe. *EXCIMAP (a European exchange circle on flood mapping) Endorsed by Water Directors*, 29-30 November 2007.
- [43] **Fatica, S. Kátay, G. Rancan, M.** (2022) Floods and firms: vulnerabilities and resilience to natural disasters in Europe. *European Commission, Ispra, JRC132125*.

- [49] **Goswami, G., Prasad, R.K. & Kumar, D.** (2023) Hydrodynamic flood modeling of Dikrong River in Arunachal Pradesh, India: a simplified approach using HEC-RAS 6.1. *Model. Earth Syst. Environ.* 9, 331–345. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01507-2>
- [56] **Hosking J.R.M. Wallis J.R.** (1997) Regional Frequency Analysis – An Approach Based on L-Moment. *Cambridge University Press, Cambridge, UK.* <http://dx.doi.org/10.1017/cbo9780511529443>
- [58] **Ielenicz, M.** (2003) Relieful litostructural din podișul Dobrogei. *Analele Universității "Valahia" Târgoviște, Seria Geografie, Tomul 3.*
- [59] **Inspectoratul General pentru Situații de Urgență.** (2016) Country report 5.1 Conditionality Romania. *Condiționalitate Ex-ante 2013-2020.*
- [61] **Iordan, D.** (2014) Aplicarea tehnologiilor laser la studiul topografic al bazinului hidrografic Someș-Tisa. *Universitatea din București, Facultatea de Geologie și Geofizică.*
- [69] **Land Professional Group of RICS** (2010) Guidelines for the use of GNSS in land surveying and mapping. 2nd edition, guidance note. UK.
- [73] **Maftei, C. Papatheodorou, K.** (2015) Flash Flood Prone Area Assessment Using Geomorphological and Hydraulic Model. *J. Environ. Prot. Ecol.* pp 16, 63–73.
- [74] **Maftei, C. Papatheodorou, K.** (2016) Mathematical Models Used for Hydrological Floodplain Modeling. In *Extreme Weather and Impacts of Climate Change on Water Resources in the Dobrogea Region. IGI Global: Hershey, PA, USA*, pp 69–100.
- [75] **Maftei, C. Cerneagă, C. Vaseashta, A.** (2025) Predictive Modeling of Flood Frequency Utilizing Analysis of Casimcea River in Romania. *Hydrology* (ISSN 2306-5338). Basel, June 2025. <https://www.mdpi.com/2306-5338/12/7/172>
- [77] **Merz, R. Blöschl, G.** (2005) Flood frequency regionalisation – Spatial proximity vs. catchment attributes. *Journal of Hydrology*, 302(1–4), 283–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.07.018>
- [78] **Meylan, P. Musy, A.** (1999) Hydrologie fréquentielle. **H*G*A**, Bucharest.
- [79] **Meylan, P. Favre, A.C. Musy, A.** (2011) Predictive hydrology: a frequency analysis approach. *CRC Press.*
- [84] **Organizația Mondială de Meteorologie.** (2012) Management of Flash Floods - A Tool for Integrated Flood Management.
- [85] **Organizația Mondială de Meteorologie.** (2022) Assessment Guidelines for End-to-End Flood Forecasting and Early Warning System.
- [87] **Parlamentul European și Consiliul Uniunii Europene.** (2007) Directiva 2007/60/CE privind evaluarea și gestionarea riscurilor de inundații.
- [90] **Pike, R.J. Evans, I.S. Hengl, T.** (2009) Chapter 1 Geomorphometry: A Brief Guide. *Developments in Soil Science* .Volume 33, pp 3-30.
- [92] **Programul Global pentru Reducerea Riscurilor de Dezastre.** (2016) Country Risk Profiles for Floods and Earthquakes.

- [97] **Seghedi, A. Oaie, Gh. Anițai, N.** (2018) Dobrogea – patrimoniu geologic. *GeoEcoMar, București*.
- [103] **Török-Oance, M.** (2001) Aplicații Ale Sig În Geomorfologie (I). Realizarea Modelului Numeric Al Terenului Și Calcularea Unor Elemente De Morfometrie. *Analele Universității de Vest din Timișoara, GEOGRAFIE, vol. XI-XII, 2001-2002, pp. 17-30*
- [106] **Vaduva, R.** (2014) Planificarea Integrată a Teritoriului în Condiții de Incertitudine a Riscului la Inundații. *Universitatea Politehnica Timișoara*.
- [110] **Broșura Planurile de Management al Riscului la Inundații.** (2022). *Broșuri RO FLOODS - versiunea mai 2022*
- [114] **Planul de Management al Riscului la Inundații**, Administrația Bazinală de Apă Dobrogea Litoral 2016
- [115] **Planul de Management al Riscului la Inundații** Ciclul II - Sinteza Națională - perioada 2023 – 2027.
- [116] **Planul de Management al Riscului la Inundații** la nivelul Administrației Bazinale de Apă Dobrogea Litoral aferent Ciclului II de implementare a Directivei Inundații - perioada 2023 – 2027.