

MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ

RAPORT DE CERCETARE NR. 2

*Modelarea batimetrică – premisa pentru crearea de
modele ale curgerii și transportului de sedimente*

ÎN CADRUL PROIECTULUI DE CERCETARE:
*Contribuții privind utilizarea măsurătorilor geodezice în vederea
modelării transportului sedimentar pe Dunăre*

Conducători de doctorat:

Prof. univ. dr. ing. Constantin MOLDOVEANU

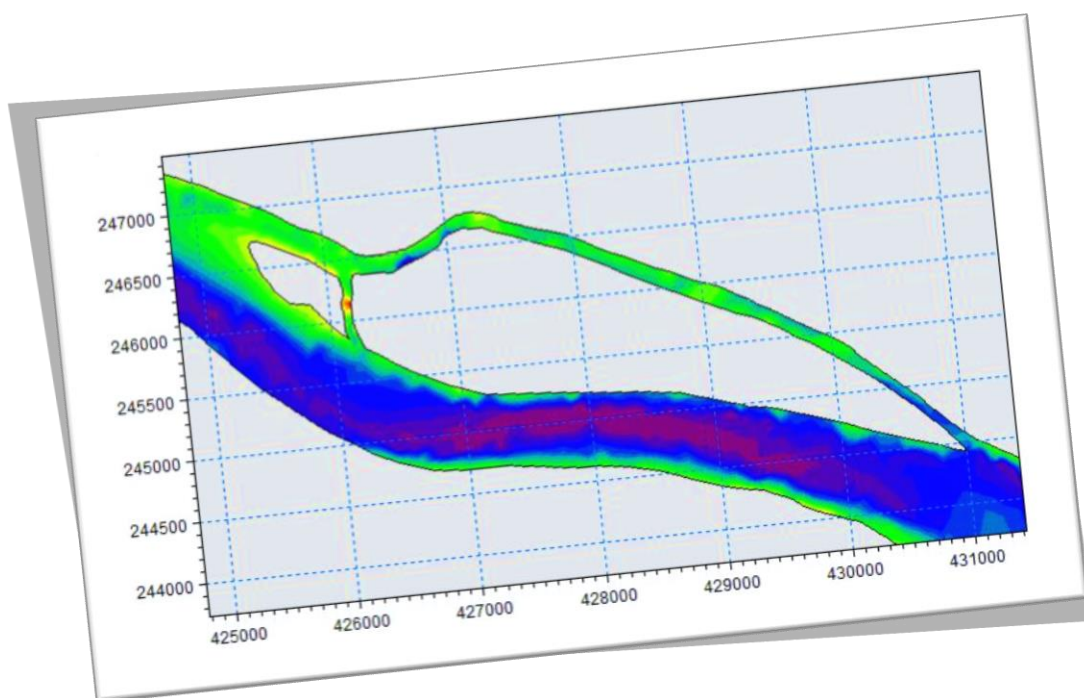
Prof. univ. dr. ing. Radu DROBOT

Studenta doctorand:

Ing. Elena-Andreea SAVU

București
Iunie, 2019

Modelarea batimetrică – premisa pentru crearea de modele ale curgerii și transportului de sedimente



Galileo Galilei:

„Mai ușor este a cunoaște corpurile cerești, decât cea mai simplă mișcare a unui fluid.”

Cuprins

1. INTRODUCERE	5
2. PRINCIPIILE MODELĂRII HIDRAULICE	8
3. CONSTRUIREA MODELULUI HIDRODINAMIC 2D.....	10
3.1. Noțiuni generale	10
3.2. Obiectivele cercetării.....	10
3.3. Zona de studiu	11
3.4. Date de intrare în model	14
3.4.1. Date topografice	14
3.4.2. Date hidrologice	22
3.4.3. Constituirea bazei de date geospațiale.....	23
3.4.4. Alte surse de date	25
3.5. Etape de lucru.....	25
3.5.1. Programe de specialitate utilizate	25
3.5.2. Pregătirea datelor geospațiale utilizând aplicații GIS.....	26
3.5.3. Importul datelor geospațiale și generarea MESH în Mike 21	28
3.5.4. Introducerea condițiilor la limită	31
3.5.5. Setarea modelului Mike 21 Flow Model (FM).....	32
4. REZULTATE ȘI CONCLUZII	34
BIBLIOGRAFIE	38

Lista figurilor

<i>Figura 1 – Clasificarea tipurilor de mișcare cu suprafață liberă.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2 – Zona de studiu</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3 – Amplasarea celor 12 puncte critice în sectorul românesc și în sectorul bulgăresc.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4 - Rețeaua de sprijin AFDJ2014.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5 - Componentele sistemului LiDAR.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 6 - Cessna T206H, modificat pentru scanare LiDAR.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7 - Piper Navajo PA-31, modificat pentru scanare LiDAR.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8 – Sistem LiDAR LiteMapper 6800i instalat în aeronavă</i>	<i>18</i>
<i>Figura 9 - Trimble R8s cu controller TSC3</i>	<i>18</i>
<i>Figura 10 - Stație totală Trimble M3</i>	<i>18</i>
<i>Figura 11 - Nava laborator ANR 1979</i>	<i>19</i>
<i>Figura 12 - Ambarcațiuni utilizate a) Șalupa Buster XL b) Șalupa Shadow c) Șalupa ZOPEDA.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 13 – Componentele sonarului interferometric Kongsberg GeoSwath Plus.....</i>	<i>20</i>

Figura 14 – Modul de funcționare a sonarului interferometric.....	20
Figura 15 – Transmiterea corecțiilor diferențiale din stațiile de bază de pe mal.....	21
Figura 16 – Vizualizarea și analiza MDT unificat folosind softul Global Mapper.....	22
Figura 17 – Exemplu de analiză și procesare a datelor brute în vederea utilizării acestora ca date de intrare în modelul matematic	23
Figura 18 – Reșantionarea MDT folosind funcția Resample.....	26
Figura 19 - Imagine satelitară Sentinel 2 (IR – benzile 8, 4, 3)	27
Figura 20 – Vectorizarea malurilor, albiei majore, ostroavelor și insulelor fluviale pe baza MDT, ortofotoplanurilor și imaginilor satelitare Sentinel 2 (banda IR)	27
Figura 21 – MDT suprapus peste ortofotoplan	27
Figura 22 – Coeficienții de rugozitate pentru albia majoră, albia minoră și insule	27
Figura 23 – Setarea proiecției și a tipului de fișier .xyz	28
Figura 24 – Generarea rețelei de elemente finite	28
Figura 25 - Rețea de elemente finite triunghiulare interconectate (Triangular Mesh)	29
Figura 26 – Importarea fișierului .xyz cu punctele extrase din MDT.....	29
Figura 27 – Fișierul Mesh pentru batimetria sectorul dunărean Bechet - Corabia.....	30
Figura 28 – Importarea fișierului .xyz cu coeficienții Manning de rugozitate	30
Figura 29 – Fișierul .dfs0 pentru rugozitatea sectorului dunărean Bechet - Corabia.....	30
Figura 30 – Fișier .dfs0 cu hidrograful debitelor (s.h. Bechet).....	31
Figura 31 - Fișier .dfs0 cu cheia limnometrică valabilă pentru anul 2017 (s.h. Corabia)	32
Figura 32 – Modulul Mike 21 FM	32
Figura 33 – Rezultatele simulării.....	33
Figura 34 – Nivelul Apei (Surface elevation)	34
Figura 35 – Adâncimea apei (Total water depth)	34
Figura 36 – Viteza curentului (Current speed).....	34
Figura 37 – Componenta U a vitezei (U velocity)	35
Figura 38 - Componenta V a vitezei (V velocity).....	35
Figura 39 – Extragerea nivelurilor simulate (MN75) corespunzătoare s.h. Corabia	36
Figura 40 – Compararea nivelurilor simulate cu cele măsurate folosind modulul Time Series Comparator	36

Lista tabelelor

Tabelul 1 - Puncte critice pentru navigație.....	12
Tabelul 2 – Zone critice pentru navigație	13
Tabelul 3 - Baza de date spațiale primare folosite în studiu.....	24

MODELAREA BATIMETRICĂ – PREMISA PENTRU CREAREA DE MODELE ALE CURGERII ȘI TRANSPORTULUI DE SEDIMENTE

1. INTRODUCERE

În domeniul hidrotehnicii, **modelarea** reprezintă un instrument extrem de eficient de rezolvare a unor probleme concrete prin reproducerea fenomenelor studiate cu ajutorul unor **modele hidraulice**.

În general, prin „model” înțelegem ansamblul de obiecte, inclusiv simboluri sau reprezentări simplificate, care se află într-un raport de corespondență cu fenomenul supus cunoașterii [1].

Un model reușit este mai accesibil pentru cercetări decât obiectul real și permite obținerea unor informații noi despre acesta. Procesul de construire a modelului poartă numele de *modelare*.

Hidraulica, asemenea celorlalte științe ale naturii, folosește în investigații metode teoretice și metode experimentale.

Modelarea hidraulică s-a dezvoltat ca metodă științifică de cercetare începând cu secolul al XX-lea, atunci când s-au pus bazele analizei dimensionale (instrument al metodei teoretice) și teoriei similitudinii (baza teoretică a modelării hidraulice).

În natură, există fenomene fizice foarte complexe al căror mecanism nu este încă suficient de bine studiat, ceea ce conduce la imposibilitatea stabilirii ecuațiilor generale ale fenomenului și a formulării condițiilor de unicitate corespunzătoare. În aceste situații, se aplică metode generale de cercetare, care sunt mai puțin exacte, dar care permit determinarea formei generale a legilor de desfășurare a fenomenelor fizice. Astfel, dacă se cunosc mărimile fizice $A_1, A_2, \dots, A_n$, care intervin în desfășurarea unui fenomen, și se presupune existența numai a unei singure funcții necunoscute între ele $f(A_1, A_2, \dots, A_n)$, atunci pot fi stabilite unele legături între aceste mărimi utilizând natura lor dimensională [2]. În plus, trebuie ținut seama de faptul că relațiile fizice reprezintă relații între mărimi fizice (dimensionale), pe când relațiile matematice operează cu numere abstracte. Acest mod de cercetare este cunoscut în știință sub numele de **analiză dimensională** și se folosește atunci când, pe bază experimentală, pot fi cunoscuți parametrii hidraulici ai fenomenului studiat.

În ceea ce privește **teoria similitudinii hidraulice**¹, enunțarea acesteia a oferit posibilitatea ca fenomenele complexe din natură să poată fi studiate pe modele la scară redusă, iar rezultatele obținute să poată fi extinse, după anumite legi, la o clasă întreagă de asemenea fenomene.

Similitudinea poate fi geometrică, cinematică sau dinamică, în funcție de proporționalitatea mărimilor determinante.

- **Similitudinea geometrică** este cea mai simplă formă de similitudine. Între fenomenul pe model (M) și fenomenul pe prototip (N) există o similitudine geometrică dacă este

¹ Două fenomene, M (model) și N (natură) sunt similare dacă fac parte din aceeași clasă și dacă între mărimile omoloage cu care se descriu aceste fenomene există relații de proporționalitate [17].

asigurată proporționalitatea lungimilor omoloage și egalitatea unghiurilor. Unui punct pe model îi corespunde un singur punct pe prototip (obiectul real) și reciproc, cele două puncte dispuse identic pe model și prototip purtând numele de *puncte omoloage*. Aceste puncte omoloage pot determina drepte omoloage, suprafețe omoloage și volume omoloage. Prin urmare, similitudinea geometrică presupune o scară unică pentru lungimi (S_l):

$$S_l = \frac{l_M}{l_N}; \quad (1-1)$$

Similitudinea geometrică poate fi asigurată prin realizarea modelului la scară, nedistorsionat geometric. Scara geometrică mai este cunoscută sub denumirea de *scară de modelare*.

- **Similitudinea cinematică** reprezintă similitudinea mișcării și implică, în puncte omoloage, similitudinea geometrică a câmpului hidrodinamic (aspectul curgerii este același pe model și prototip) și raport constant al mărimilor cinematice de același tip (viteze, accelerații). Odată stabilită scara lungimilor, rezultă un raport constant al timpului în care se desfășoară fenomenul pe prototip și timpul în care se desfășoară fenomenul pe model, adică scara timpului (S_t):

$$S_t = \frac{t_M}{t_N}; \quad (1-2)$$

- **Similitudinea dinamică** impune ca raportul tuturor forțelor din natură, de pe prototip și de pe model, să fie constant. Rezultă, astfel, scara forțelor (S_f):

$$S_f = \frac{f_M}{f_N}; \quad (1-3)$$

Realizarea pe un model hidraulic a acestor condiții nu este însă posibilă în totalitate, din cauza varietății forțelor care determină mișcarea fluidului, ceea ce atrage o serie de condiții greu de îndeplinit referitoare la constantele fizice ale fluidelor. În practica modelării hidraulice se apreciază mai întâi forțele dominante ale fenomenului de modelat și se impune apoi condiția de similitudine dinamică numai acestor forțe. În acest fel se obțin diferite modele („criterii de similitudine”) după categoria de forțe luate în considerare. Aceste criterii se pot exprima prin mărimi adimensionale numite *numere caracteristice*.

Altfel spus, dacă un fenomen fizic concret este descris de mai multe mărimi fizice de aceeași natură (cu aceleași dimensiuni), orice raport a două dintre aceste mărimi reprezintă un *complex adimensional*, care se notează de obicei cu litera π , însoțită de un indice. Complexele adimensionale pot fi privite și ca numere, deoarece ele rezultă din raportul a două mărimi de aceeași dimensiuni.

Considerând câteva dintre mărimile fizice determinante în descrierea fenomenelor din cadrul mecanicii fluidelor, și anume: lungimea caracteristică l , viteza fluidului u , densitatea fluidului ρ , coeficientul dinamic de vâscozitate al fluidului μ , presiunea p , accelerația gravitațională g , viteza sunetului a și coeficientul de tensiune superficială σ , se pot forma următoarele criterii utilizând aceste mărimi [3]:

- **Criteriul Reynolds** - constituie condiția de bază pentru modelul în care forțele de vâscozitate sunt dominante:

$$Re = \frac{ul\rho}{\mu} = \frac{ul}{\nu}; \quad (1-4)$$

- **Criteriul Euler** - se folosește atunci când, pe lângă forțele de inerție, trebuie luate în considerare și forțele de presiune:

$$Eu = \frac{p}{\rho u^2}; \quad (1-5)$$

- **Criteriul Froude** - se utilizează la modelarea mișcărilor la care forța de greutate este predominantă:

$$Fr = \frac{u^2}{gl}; \quad (1-6)$$

- **Criteriul Mach** - intervine la modelarea mișcărilor la care se ține cont de compresibilitatea fluidului:

$$Ma = \frac{u}{a}; \quad (1-7)$$

- **Criteriul Weber** - se folosește la modelarea acelor mișcări la care, pe lângă forțele de inerție, forța de tensiune superficială este predominantă:

$$We = \frac{\rho u^2 l}{\sigma}; \quad (1-8)$$

- Atunci când mișcarea este nepermanentă, se introduce **criteriul Strouhal**:

$$Sh = \frac{l}{ut}; \quad (1-9)$$

unde t reprezintă timpul caracteristic.

Teoria similitudinii hidraulice demonstrează faptul că nu pot fi aplicate simultan toate criteriile, cea mai cunoscută incompatibilitate fiind Re și Fr . Rezolvarea situațiilor de acest tip se face prin elaborarea unor **modele cu distorsiuni hidraulice**, adică se renunță la unul dintre cele două criterii incompatibile.

Modelarea hidraulică sau hidrodinamică operează cu două tipuri de modele: modele fizice și modele numerice [4].

Modelele fizice se disting prin particularitatea de a reproduce fenomenele studiate la o altă scară decât cea naturală. În cazul fenomenelor hidraulice, care se produc în spații întinse, modelele fizice se realizează la scară redusă [5].

În ultimele decenii, datorită dezvoltării tehnicii de calcul automat, precum și a metodelor matematice de integrare a ecuațiilor diferențiale, **modelele numerice sau matematice** au cunoscut o dezvoltare rapidă. Ele sunt aplicate în diferite ramuri ale hidraulicii, precum curgeri cu nivel liber uni și bidimensionale, curgeri sub presiune, curgeri subterane etc. Aceste modele reprezintă seturi de relații matematice între parametrii care descriu un anumit fenomen fizic.

Modelele matematice se pot construi pe două căi principal diferite, cele două tipuri fiind cunoscute sub numele de *modele deterministe* și *modele stochastice*, care reflectă metodele fizicii clasice, respectiv ale fizicii statistice pentru descoperirea și studiul legilor care guvernează fenomenele naturale.

Modelele deterministe se referă la fenomenele descrise de un număr relativ mic de parametri. Legile care exprimă legătura dintre parametrii ce descriu unul sau mai multe fenomene iau forma unor ecuații denumite *ecuațiile fizicii matematice*.

Modelele stochastice au la bază statistica matematică. Prin analizarea unui număr mare de evenimente, statistica poate descoperi legile care le guvernează, independent de felul în care acestea sunt determinate (fără a urmări relația cauză-efect), prin intermediul *corelațiilor*.

O tendință actuală constă în utilizarea complementară a modelelor fizice și numerice, deoarece modelul fizic oferă datele necesare pentru calibrarea modelului numeric.

2. PRINCIPIILE MODELĂRII HIDRAULICE

Una dintre cele mai importante probleme ale hidraulicii o constituie **mișcarea cu suprafață liberă** a apei în râuri și canale (sau în conducte cu secțiunea parțial plină).

Mișcările cu suprafață liberă (sau cu nivel liber) reprezintă mișcările lichidelor care se produc astfel încât în lungul curentului există o suprafață liberă în contact cu atmosfera [6].

În funcție de variația în timp și spațiu a parametrilor hidraulici (debit, viteză, adâncime, pantă, suprafață și perimetru ud), mișcarea cu suprafață liberă din albiile râurilor poate fi clasificată, conform *Figurii 1*, astfel [7]:

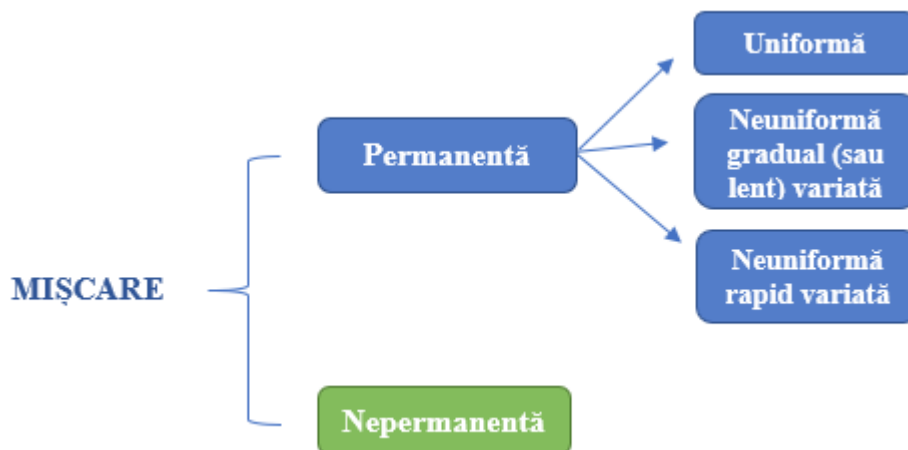


Figura 1. Clasificarea tipurilor de mișcare cu suprafață liberă

Tipul de curgere este influențat în mod direct de modificările suferite de albia râului. În general, curgerea în albiile deschise are un caracter nepermanent și neuniform, din cauza modului de alimentare a cursurilor de apă, dar și din cauza neuniformităților frecvente în albie. Cu toate acestea, în ipoteza în care variația debitelor și a nivelurilor este lentă, pentru perioade scurte de timp, curgerea poate fi considerată permanentă (uniformă sau neuniformă)².

Mișcările nepermanente cu suprafață liberă prezintă un caracter ondulatoriu și iau naștere ca urmare a modificării condițiilor la limită, prin schimbarea debitelor sau a nivelurilor. Aceste perturbații, care se transmit cu viteză finită sub formă de unde, modifică simultan și debitul, și nivelul. Întrucât transmiterea modificărilor de nivel conduce la modificarea formei suprafeței libere, orice mișcare nepermanentă cu suprafață liberă poate fi recunoscută după variația în timp a formei suprafeței libere, cum se întâmplă, de exemplu, în cazul valurilor.

Fiind un fenomen neliniar, cu diferite forme de manifestare, calculul mișcărilor nepermanente cu suprafață liberă este foarte complicat.

În cazul mișcărilor nepermanente în râuri și canale, pe lângă fenomenul ondulatoriu de propagare a perturbațiilor, intervine și fenomenul de transport, de mișcare a apei cu o anumită viteză.

² Tipurile de mișcare permanentă (uniformă, neuniformă gradual variată și neuniformă rapid variată) au fost prezentate în *Referatul nr. 2 - Hidrologie și hidraulica râurilor*.

Modelarea matematică a curgerii în albie constă în simularea condițiilor de curgere, bazate pe formularea și soluționarea relațiilor matematice care exprimă ecuațiile de mișcare ale apei în albia râului.

În mișcare nepermanentă, viteza apei are componente și în planul secțiunii transversale a albiei [8], iar pentru modelarea matematică a mișcării nepermanente este necesar să se apeleze la schematizări simplificate care să cuprindă doar aspectele cu influență esențială asupra proceselor reale și, de multe ori, să se ignore cele de importanță secundară.

După stabilirea ecuațiilor care modelează procesul fizic în aspectele lui principale, tratarea matematică sau numerică a acestora, executată în mod corect, nu schimbă natura fizică a procesului analizat.

De cele mai multe ori, se realizează o schematizare unidimensională, astfel încât curgerea nepermanentă în albie să fie descrisă prin evoluția în timp, în orice secțiune transversală, a două variabile dependente, și anume: cota suprafeței libere a apei y (sau adâncimea apei h) și debitul Q (sau viteza medie în secțiune v). Aceste variabile dependente definesc starea mișcării în raport cu două variabile independente: poziția spațială în lungul albiei x (față de o origine aleasă convenabil) și timpul t (față de momentul apariției perturbației).

Variabilele dependente și independente care apar în curgerea nepermanentă în albie sunt legate între ele prin două ecuații care provin din legile de conservare ale masei, cantității de mișcare și energiei mecanice.

Ipotezele care stau la baza modelului unidimensional, împreună cu ecuațiile ce descriu mișcarea unidimensională nepermanentă, au fost formulate de Barré de Saint-Venant în 1871, la Academia Franceză, în lucrarea “Théorie et equations generales du mouvement non-permanent des eaux courantes”.

În literatura de specialitate, ecuațiile fundamentale ale mișcării nepermanente în albie deschise sunt denumite **ecuațiile Saint-Venant**. Pentru analiza mișcării apei în canale se pot utiliza mai multe forme ale ecuațiilor Saint-Venant, care, față de forma lor inițială, au suferit în timp generalizări și îmbunătățiri.

Ecuațiile Saint-Venant reprezintă de fapt un sistem de ecuații cu derivate parțiale de ordinul II, neliniare, de tip hiperbolic:

- ecuația de continuitate, exprimând principiul conservării și continuității fazei lichide:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0; \quad (2-1)$$

- ecuația de mișcare, exprimând principiul conservării și continuității energiei:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot V)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 \right) + g \cdot A \cdot S_f = 0; \quad (2-2)$$

unde: S_0 reprezintă panta fundului albiei, S_f – panta de frecare, V este viteza considerată uniformă în secțiune transversală, iar A – aria secțiunii vii; V și A sunt funcții de x și t , astfel încât debitul va fi:

$$Q = A \cdot V = Q(x, t) \quad (2-3)$$

Soluționarea exactă a sistemului de ecuații Saint-Venant, în sensul obținerii valorilor necunoscute (variabilelor dependente) în toate punctele planului variabilelor independente este practic imposibilă.

3. CONSTRUIREA MODELULUI BATIMETRIC 2D

3.1. Noțiuni generale

În ultimele decenii, s-au înregistrat progrese remarcabile în ceea ce privește studiul proceselor de curgere și transport sedimentar pe râuri și fluvii, prin utilizarea instrumentelor de modelare a curgerii, morfologiei albiei și a transportului de sedimente.

În general, la modelarea cursurilor de apă cele mai utilizate sunt modelele unidimensionale (1D), care au la bază ecuațiile curgerii uniforme și pe cele ale curgerii uniform-variate. Aceste modele prezintă următoarele avantaje: simplitatea calculelor, ușurința parametrizării, calibrarea facilă, număr mai mic de date necesare pentru calibrare/validare [9].

Elaborarea unui model numeric al deplasării masei de fluid, în special în perioada viiturilor, reprezintă un proces complex, întrucât se bazează pe sistemul de ecuații Saint-Venant, în care intervin parametri precum rugozitatea din fiecare secțiune de calcul. Acești parametri sunt diferiți pentru albia minoră, respectiv pentru albia majoră, sau pot fi considerați variabili pe verticală. Calibrarea lor presupune ajustarea valorilor acestora (în limite acceptabile) până la reproducerea cu acuratețe a nivelurilor înregistrate pentru situații care au fost foarte bine monitorizate.

Modelele hidrodinamice de propagare 2D sunt capabile să reproducă într-un mod foarte realist fenomene distribuite spațial, deși sunt mai dificil de calibrat și validat decât modelele 1D, întrucât datele necesare se obțin prin intermediul tehnologiilor moderne de măsurare. De asemenea, modelele hidraulice 2D necesită un timp de calcul mai mare, iar datele necesare pentru construcția geometriei trebuie să aibă o distribuție spațială mult mai mare [9].

Modelele bidimensionale pot fi împărțite în trei categorii: modele quasi 2D, modele complet 2D și modele combinate 1D-2D. Există și situații în care se impune o abordare tridimensională a curgerii, în special când aceasta trece din albie în lunca inundabilă [10].

3.2. Obiectivele cercetării

În cadrul proiectului de cercetare intitulat „*Contribuții privind utilizarea măsurătorilor geodezice în vederea modelării transportului sedimentar pe Dunăre*”, care își propune identificarea unor măsuri care să contribuie la stabilizarea patului albiei fluviului Dunărea, **obiectivul raportului de cercetare nr. 2** - „*Modelarea batimetrică – premiza pentru crearea de modele ale curgerii și transportului de sedimente*” îl reprezintă **crearea unui model complex hidrodinamic (2D)** al sectorului dunărean analizat, având la bază diversele tipuri de măsurători geodezice pentru determinarea elementelor necesare (tipurile de măsurători geodezice au fost prezentate în detaliu în cadrul raportului de cercetare nr. 1 - „*Stadiul actual privind măsurători geodezice și Sisteme de Coordonate de Referință*”).

Rezultatele acestui raport vor fi folosite mai departe în raportul de cercetare nr. 3 - „*Studiu de caz și interpretarea rezultatelor*”, care va trata îndeosebi problematica modelării transportului sedimentar pe Dunăre, prin realizarea unui model de eroziune, urmată de calibrarea și validarea acestuia.

3.3. Zona de studiu

Zona de studiu (Figura 2) propusă pentru a fi modelată hidrodynamic se referă la sectorul dunărean situat amonte de stația hidrometrică Bechet (km 678) și aval de stația hidrometrică Corabia (km 625).

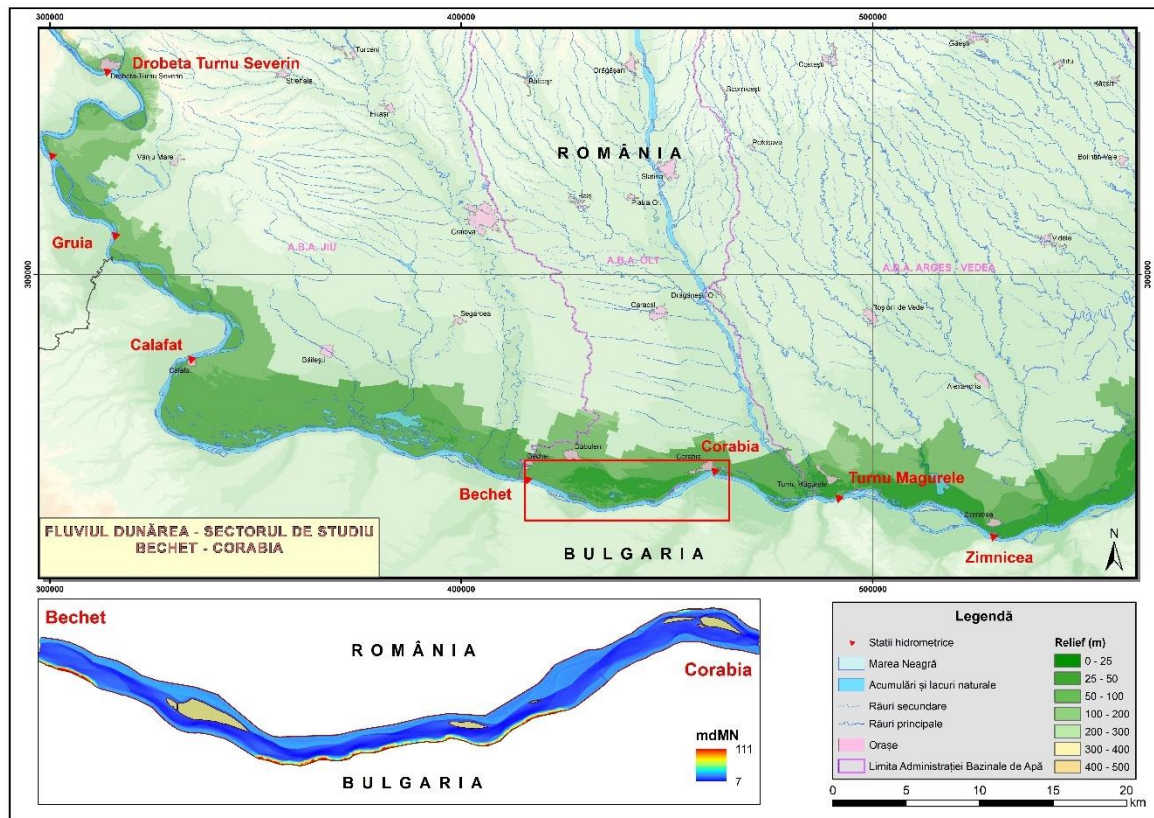


Figura 2. Zona de studiu

Acest sector este reprezentativ pentru proiectul de cercetare, deoarece, pe cei aproximativ 53 de km pe care îi măsoară cursul de apă, navigația se desfășoară cu mare dificultate, din cauza complexității regimului hidraulic și a schimbărilor dinamice ale morfologiei albiei fluviului, cu efecte nefavorabile asupra **șenalului navigabil**³.

Serviciile de transport pe Dunare viabile din punct de vedere economic sunt dependente de condițiile unui șenal navigabil stabil. De-a lungul Dunării, navigația este împiedicată de mai multe blocaje sau **puncte critice**, atât în timpul iernii, când apar sloiuri de gheață, cât și în timpul verii, când nivelul Dunării este foarte scăzut (debitul înregistrat este mai mic de 3000 m³/s).

În conformitate cu prevederile „Convenției despre regimul navigației pe Dunăre”, semnată la Belgrad la 18 august 1948, asigurarea condițiilor de navigație pe sectorul de Dunare

³ Șenalul navigabil reprezintă o porțiune navigabilă în lungul unui curs de apă, a unui canal sau pe suprafața unui lac. Constituie o cale continuă, cu lățime și cu adâncime suficiente pentru a asigura circulația navelor, pătrunderea navelor în port sau pentru trecerea acestora printr-un loc îngust. Șenalul navigabil este amenajat și balizat în scopul desfășurării navigației în condiții de siguranță. Sursa: www.wikipedia.org.

cuprins între km 845,5 și km 375 se află în responsabilitatea celor două țări riverane, România și Bulgaria.

În baza *Acordului bilateral româno-bulgar*, semnat la Sofia la 28 noiembrie 1955, cele două state și-au definit sectoarele de responsabilitate, pe sectorul comun de Dunăre, după cum urmează:

- între km 845,5 și km 610, responsabilitatea întreținerii căii navigabile aparține părții române;
- între km 610 și km 375, responsabilitatea întreținerii căii navigabile aparține părții bulgare.

AFDJ Galați (România) și IAPPD Ruse (Bulgaria) sunt autoritățile responsabile pentru menținerea condițiilor adecvate de navigabilitate.

Regia Autonomă Administrația Fluvială a Dunării de Jos (AFDJ) este autoritatea de cale navigabilă pe tot sectorul românesc al Dunării. Pentru asigurarea condițiilor minime de navigație, recomandate de Comisia Dunării, se execută lucrări de întreținere (activități de măsurători, semnalizare și dragaj), care sunt eficiente doar o scurtă perioadă de timp.

De aceea, în anul 2017 a fost demarat proiectul “FAST Danube” - „Asistență tehnică pentru revizuirea și completarea studiului de fezabilitate privind îmbunătățirea condițiilor de navigație, pe sectorul comun Româno-Bulgar al Dunării și studii complementare”, care să studieze condițiile geomorfologice și hidrologice care influențează acest sector de Dunăre, în scopul elaborării unor soluții tehnice complexe care să ajute la îmbunătățirea condițiilor de navigație și totodată să aibă un impact minim asupra mediului.

În urma unui studiu de fezabilitate necesar demarării proiectului, finalizat în anul 2011, în sectorul fluvial aval de Porțile de Fier II, în secțiunea comună româno-bulgară (km 845,5 – km 375), au fost identificate **12 puncte critice pentru navigație** (Tabelul 1), care necesită o monitorizare atentă, printr-o serie de măsurători topo-hidrografice.

Tabelul 1. Puncte critice pentru navigație

NR. CRT.	DENUMIRE	LOCALIZARE (KM FLUVIAL)	TERITORIU ADMINISTRATIV
1	<i>Gârla Mare</i>	<i>km 839 – km 837</i>	<i>România</i>
2	<i>Salcia</i>	<i>km 824 – km 820</i>	<i>România</i>
3	<i>Bogdan-Secian</i>	<i>km 786 – km 782</i>	<i>România</i>
4	<i>Dobrina</i>	<i>km 762 – km 756</i>	<i>România</i>
5	Bechet	km 678 – km 673	România
6	Corabia	km 632 – km 626	România
7	<i>Belene</i>	<i>km 577 – km 560</i>	<i>Bulgaria</i>
8	<i>Vardim</i>	<i>km 542 – km 539</i>	<i>Bulgaria</i>
9	<i>Iantra</i>	<i>km 537 – km 534</i>	<i>Bulgaria</i>
10	<i>Batin</i>	<i>km 530 – km 520</i>	<i>Bulgaria</i>
11	<i>Kosui</i>	<i>km 428 – km 423</i>	<i>Bulgaria</i>
12	<i>Popina</i>	<i>km 408 – km 401</i>	<i>Bulgaria</i>

Ca urmare a acestui studiu, Comisia Dunării a recomandat pentru sectorul româno-bulgar o lățime a șenalului de 180 m, cu o adâncime minimă de 2,5 m și raza minimă de curbură de 1000 m. Pentru zonele în care adâncimile minime nu sunt asigurate (Figura 3), s-a propus reducerea lățimii șenalului până la 150 m.

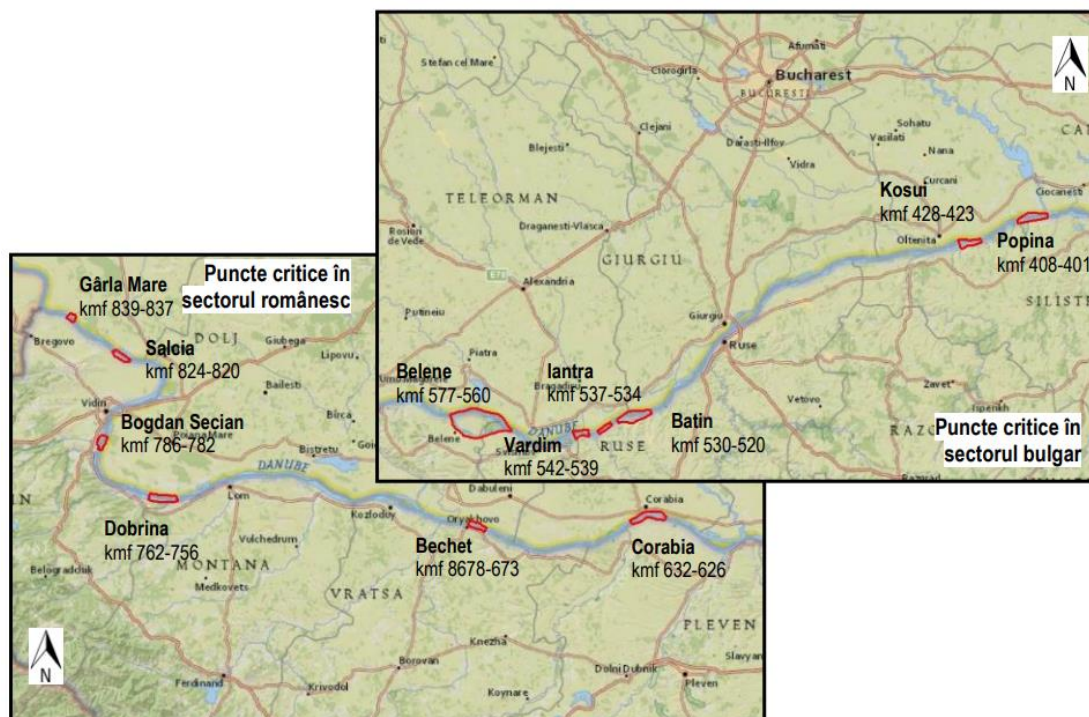


Figura 3. Amplasarea celor 12 puncte critice în sectorul românesc și în sectorul bulgăresc

Sursa: <http://www.fastdanube.eu/official-documents>

Așadar, zona de studiu Bechet-Corabia face parte din **zonele critice pentru navigație stabilite**, conform aceluiași studiu de fezabilitate, conform Tabelului 2.

Tabelul 2. Zone critice pentru navigație

NR. ZONĂ CRITICĂ	LUNGIME (KM FLUVIAL)	PUNCTE CRITICE INCLUSE ÎN ZONA CRITICĂ
ZC1	km 850 – km 818	Gârla Mare, Salcia
ZC2	km 786 – km 755	Bogdan-Secian, Dobrina
ZC3	km 678 – km 625	Bechet, Corabia
ZC4	km 577 – km 520	Belene, Vardim, Iantra, Batin
ZC5	km 428 – km 401	Kosui, Popina

3.4. Date de intrare în model

Înțelegerea proceselor morfologice ale unui râu sau fluviu în contextul modelării hidrodinamice, precum și modelarea transportului de sedimente reprezintă un subiect dificil, care necesită o cantitate mare de date măsurate și cunoștințe interdisciplinare.

Calitatea modelării matematice și reprezentarea spațială a rezultatelor acesteia sunt strâns legate de datele de intrare utilizate. Calitatea acestor date este cu atât mai importantă cu cât influențează în mod direct reprezentarea fenomenelor naturale într-o formă cât mai aproape de realitate.

În consecință, există o mare cerere pentru informații corecte și precise, pentru a minimiza incertitudinile din rezultatul simulărilor .

3.4.1. Date topografice

Punctul de plecare în elaborarea oricărui model hidrodinamic al curgerii îl reprezintă datele legate de teren, topografia terenului și acoperirea terenului [11].

În funcție de tipul de modelare matematică utilizat, și anume unidimensională sau bi-dimensională, datele topografice necesare sunt diferite.

Modelarea 1D se pretează la o abordare clasică a colectării, unde metodele de culegere a datelor folosind tehnologia GNSS și stația totală vor înlocui LiDAR-ul aeropurtat și fotogrammetria aeriană, folosite la obținerea datelor geospațiale necesare modelării 2D [12].

Pentru generarea unui model unidimensional al râurilor, sunt necesare profile grafice longitudinale și transversale, acestea din urmă fiind dispuse perpendicular pe axul longitudinal al râului, iar poziția și densitatea lor se alege în funcție de configurația terenului și de importanța zonei în care acestea se află. La colectarea datelor trebuie să se țină cont de precizia solicitată, ea având un rol esențial la alegerea echipamentului și a metodelor de măsurare.

Prelucrarea finală a datelor în vederea utilizării lor în programele de modelare matematică 1D a râurilor conține mai multe etape independente, multe dintre ele fiind prelucrări manuale care necesită mult timp și facilitează apariția erorilor umane. De asemenea, această metodă nu oferă un randament ridicat.

În cazul modelelor bidimensionale, profilele transversale/măsurătorile batimetrice în albia minoră sunt cuplate cu seturi de date topografice în albia majoră, pentru generarea unui Model Digital al Terenului (MDT) continuu [11]. Datele topografice se colectează separat pentru zonele uscate și pentru cele acoperite de apă și se procesează, de asemenea, separat. Acestea trebuie însă incluse într-un MDT unitar, care să acopere întreaga zonă de studiu.

În cazul de față, pentru modelarea hidraulică bidimensională a sectorului dunărean Bechet-Corabia (53 km lungime), modelul digital al terenului ne-a fost pus la dispoziție prin amabilitatea AFDJ Galați (S.C.N. Giurgiu), beneficiarul proiectului FAST Danube.

Acest MDT a fost obținut pe baza datelor culese prin tehnologie LiDAR (Light Detection and Ranging), combinate cu date topo-geodezice și batimetrice, el acoperind întreaga zonă modelată, inclusiv albia minoră.

a) Stabilirea bornelor geodezice de referință

În cadrul proiectului „Realizarea unui sistem de sprijin pentru lucrările hidrografice pe Dunăre în scopul asigurării adâncimilor minime de navigare”, al cărui beneficiar este statul român, iar autoritatea contractantă este AFDJ Galați, obiectivul principal a fost proiectarea și materializarea a câte trei borne geodezice (Borna Martor, Borna de Referință și Borna Azimutală) în 144 de locații din lungul Dunării. Sistemul, denumit *AFDJ2014*, e definit așadar de cele 144 de locații, situate la mai puțin de 15 km una față de cealaltă.

Pe sectorul analizat, Bechet-Corabia, există șase locații în care au fost amplasate borne din rețeaua de sprijin *AFDJ2014* (91-86), ilustrate în *Figura 4*.

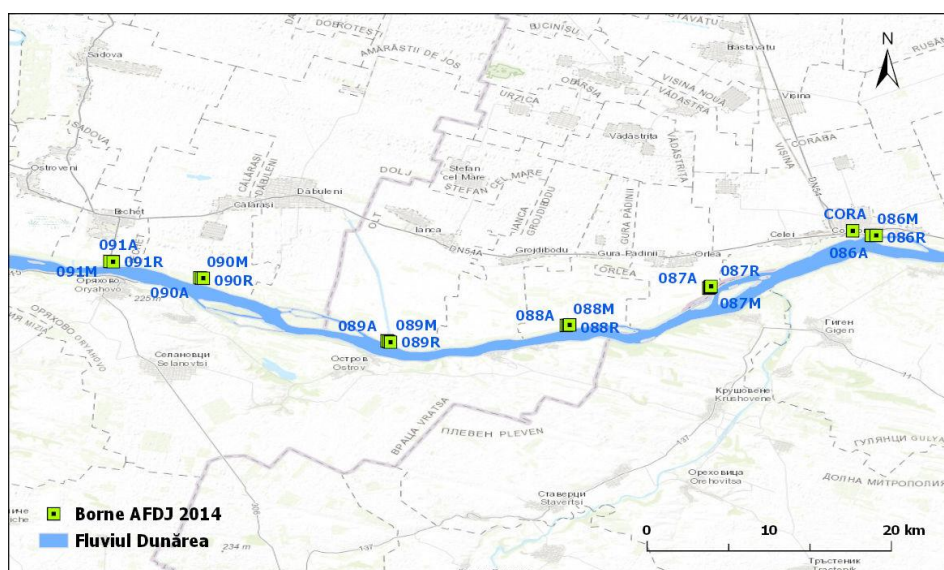


Figura 4. Rețeaua de sprijin AFDJ2014 pe sectorul Bechet-Corabia

Coordonatele finale ale bornelor au fost furnizate atât în sistem ETRS89 (pentru a facilita interconectarea cu țările vecine), cât și în sistemul national de referință S42 (cu elipsoidul aferent Krasovski 1940 și sistem de proiecție stereografic 1970). Pe lângă setul de coordonate planimetrice și geodezice (determinate cu tehnologie GNSS), fiecărei borne i s-a determinat și coordonata altimetrică în sistemul normal de altitudini Marea Neagră 1975 (cota a fost transmisă prin nivelment geometric de la reperii din rețeaua națională), care mai apoi a fost transformată cu TransDatRo în sistemul EVRF2007 (punct fundamental Amsterdam).

Tot prin intermediul soft-ului TransDatRo, coordonatele planimetrice au fost calculate și în sistemul de proiecție UTM (Universe Transverse Mercator), utilizat în Bulgaria.

Această rețea de sprijin stă la baza redeterminării corecte a „cotei 0” a mirelor hidrometrice, făcând astfel posibilă determinarea cât mai precisă a cotei absolute a suprafeței libere a apei. De asemenea, aceste puncte de referință au fost folosite ca stații de bază în care au fost instalate echipamente GNSS pentru generarea corecțiilor diferențiale, care au fost transmise ulterior prin unde radio către receptorul GNSS din barca dotată cu sonar (din care s-au efectuat măsurătorile batimetrice). Precizia de determinare a acestor puncte, în special a cotelor, influențează semnificativ rezultatele finale: MDT-ul și modelul matematic al curgerii.

b) Date provenite din scanări LiDAR

Tehnica LiDAR presupune existența unui senzor laser montat cu foarte mare precizie pe un avion, elicopter sau UAV (*Unmanned Aerial Vehicle* - Vehicul Aerian Fără Pilot - dronă), care transmite în timpul zborului o undă laser către suprafața terenului, iar un receptor montat în spatele avionului recepționează undele laser reflectate de aceasta.

Majoritatea sistemelor LiDAR folosesc o oglindă de scanare pentru generarea unei benzi de impulsuri laser. Lungimea benzii depinde de unghiul de oscilare al oglinzii, iar densitatea punctelor de la sol depinde de factori precum viteza avionului și rata de oscilare a oglinzii.

Distanțele se determină prin calcularea timpului necesar parcurgerii de către semnalul laser a distanței de la senzorul emițător până la sol și înapoi la acesta.

Pe lângă sistemul de scanare cu laser (*Laser Scanner* - *Figura 5*), tehnica LiDAR se bazează pe cuplul GNSS/IMU (sistem satelitar de navigație globală/unitate inerțială de măsurare), care ajută la determinarea cât mai exactă a poziției și orientării sistemului.

Sistemul GNSS este compus dintr-o antenă GNSS aeropurtată (*GNSS Receiver* – *figura 4*), montată într-o poziție vizibilă în partea superioară a aeronavei, oferind o deschidere suficientă spre sateliți, pentru a înregistra poziția continuă a avionului, și o stație GNSS amplasată la sol (*GNSS Reference Station*), cu rolul de a corecta măsurătorile antenei GNSS, astfel încât să se obțină o traiectorie cât mai bună a aparatului de zbor (datele GNSS sunt prelucrate prin metode GNSS diferențiale).

Sistemul IMU (*Inertial Measurement Unit*) constă într-un set de giroscopie și accelerometre care măsoară continuu înălțimea și accelerația avionului.

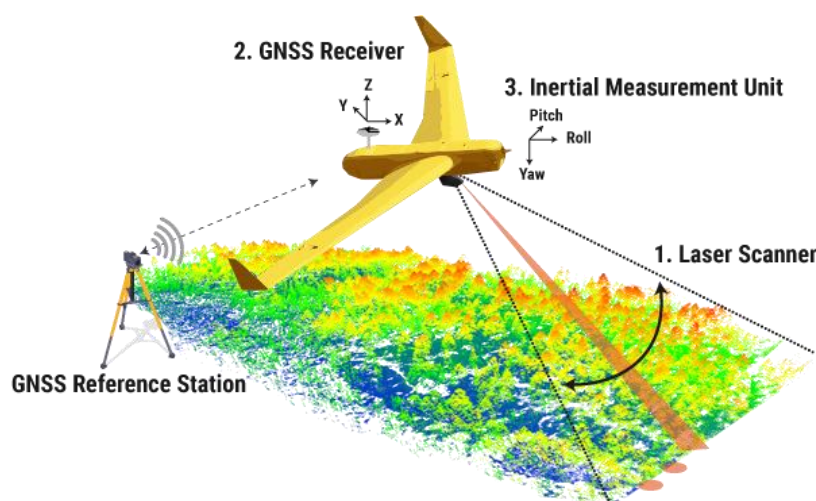


Figura 5. Componentele sistemului LiDAR

Sursa: <https://www.yellowscan-lidar.com/>

În prezent, tehnologia de scanare laser furnizează date topografice de mare rezoluție și este capabilă să acopere rapid suprafețe întinse, la costuri moderate, cu o precizie ridicată atât în plan orizontal, cât și în cel vertical, contribuind în mod semnificativ la reprezentarea suprafețelor de teren.

Coordonatele tridimensionale (x , y , z sau latitudine, longitudine și altitudine) ale punctelor corespunzătoare obiectelor măsurate sunt calculate prin utilizarea a trei elemente

principale, și anume: diferența de timp dintre emisia și întoarcerea pulsului laser, unghiul sub care a fost emis pulsul laser și locația exactă a senzorului de pe suprafața Pământului sau deasupra acesteia.

Chiar dacă pentru zonele străbătute de ape această tehnologie prezintă anumite limitări cauzate de faptul că impulsul laser nu pătrunde apele adânci, în mod cert reprezintă un instrument util pentru generarea modelelor digitale ale terenului cu o acuratețe ridicată în zone complexe precum văile inundabile sau insulele fluviale.

În cadrul proiectului “Fast Danube”, în anul 2017 au fost realizate două campanii de scanare cu aeronave dotate cu echipamente LiDAR, în lunile aprilie și iulie, obiectivul fiind acoperirea a minim 200 m de la limita apei de fiecare parte a Dunării (pe sectorul comun româno-bulgar) și scanarea insulelor fluviale acoperite cu vegetație forestieră.

Pentru asigurarea celor mai bune date de intrare pentru procesul de modelare, zona de interes a fost extinsă până la valoarea de 250 m de la primul mal ferm (zonele de nisip au fost considerate parte din corpul de apă), în final rezultând o suprafață scanată de 1013 km².

Pentru construirea modelului hidrodinamic al sectorului Bechet-Corabia au fost utilizate datele rezultate în urma primei campanii de măsurători, puse la dispoziție de AFDJ Galați.

Aeronavele utilizate pentru scanarea LiDAR au fost SP-FPL- Cessna T206H (*Figura 6*) și SP-FPK Piper Navajo PA-31 (*Figura 7*).



Figura 6. Cessna T206H, modificat pentru scanare LiDAR



Figura 7. Piper Navajo PA-31, modificat pentru scanare LiDAR

Sursa: <http://www.fastdanube.eu/official-documents>

Acestea au avut instalate sisteme identice de scanare, compuse din scanner-ul LiteMapper 6800i (*Figura 8*) și sistemul GPS/IMU AeroControl seria IIe 256Hz.

Sistemul LiteMapper 6800i are în componență scanner-ul de ultimă generație Riegl LMS-Q680i, care utilizează principiul de măsurare prin unde continue și dispune de funcția inovativă *Multi-Time Around*, ce permite achiziția datelor de la înălțimi mari de zbor, de până la 3000 m AGL (*Above Ground Level* – deasupra nivelului solului), în funcție de suprafața scanată.

Punctul de plecare pentru efectuarea planurilor de zbor a fost densitatea de scanare, obiectivul fixat fiind de 4 puncte/m², însă, din analiza finală a reieșit faptul că densitatea a variat în funcție de acoperirea cu vegetație a fiecărei zone.

Lățimea unei benzi de scanare a fost de 570 m (pentru o altitudine medie de 690 m AGL și unghi de deschidere al scanner-ului de 45°). Viteza medie a fost de 125 kts (231.5km/h).

Principalul rezultat al acestor scanări LiDAR îl reprezintă norii de puncte 3D, adică sute de milioane de puncte ce conțin informații de tipul x,y,z.

Acest volum imens de date nu a putut fi manipulat și procesat decât cu ajutorul stațiilor grafice puternice și al produselor software dedicate: RiAnalyze, RiWorld și RiProcess pentru procesarea datelor LiDAR, iar FugroViewer pentru vizualizarea norului de puncte.



Figura 8. Sistem LiDAR LiteMapper 6800i instalat în aeronavă

Sursa: <http://www.fastdanube.eu/official-documents>

Calibrarea măsurătorilor LiDAR a fost realizată pe baza stațiilor GNSS permanente și a suprafețelor de control amplasate la sol.

Spre deosebire de tehnicile topografice tradiționale de măsurare, această tehnologie a oferit posibilitatea generării unui MDT de înaltă rezoluție (0.5 m x 0.5m) direct din norul de puncte, în urma etapelor multiple de prelucrare a datelor, prin aplicarea algoritmilor de filtrare, segmentare și clasificare a norilor de puncte.

Verificarea preciziei coordonatelor obținute și evaluarea calității MDT derivat din date LiDAR s-a făcut prin aplicarea unor teste de încredere, pe baza seturilor de date măsurate în teren.

În timpul campaniei de măsurători terestre, pentru crearea bazei de control la sol, echipamentul utilizat a constat în: receptor GPS Trimble R8s compatibil ROMPOS (Figura 9), stație totală laser Trimble M3 (Figura 10) și un autovehicul pentru transport.



Figura 9. Trimble R8s cu controller TSC3



Figura 10. Stație totală Trimble M3

Sursa: <https://www.trimble.com/>

c) Date provenite din măsurători batimetrice

Tot în cadrul proiectului “Fast Danube” au fost efectuate două campanii de cartografiere batimetrică a albiei Dunării, de-a lungul sectorului comun româno-bulgar, în lunile aprilie-mai 2017 (68 de zile – din aval, de la Călărași, în amonte, la Porțile de Fier II), respectiv iulie-august 2017 (47 de zile – din amonte, de la Porțile de Fier II, spre aval, la Călărași).

Datele hidrografice, hidrodinamice și cele privind sedimentele au fost colectate simultan. Pe toată durata determinărilor batimetrice, nava laborator ANR 1979 a fost utilizată ca bază mobilă suport cu staționare la fiecare 10-12 km (Figura 11).



Figura 11. Nava laborator ANR 1979

Pentru colectarea datelor hidrografice au fost utilizate trei ambarcațiuni (Figura 12.a,b,c) dotate cu sonare interferometrice Kongsberg GeoSwath Plus, care operează la frecvențe de 250 kHz și 500 kHz. O frecvență mai mare oferă o rezoluție mai bună, dar în același timp limitează raza de acțiune. Așadar, diferența între cele două clase de frecvență rezidă în lățimea fâșiei acoperite (swath width).



a)

b)

c)

Figura 12. Ambarcațiuni utilizate

a) Șalupa Buster XL b) Șalupa Shadow c) Șalupă ZOPEDA

Sursa: <https://marine-research.com/>

Frecvența de 500 kHz a fost utilizată în ape cu adâncimi mici și pe profilele transversale, iar cea de 250 kHz pentru scanarea zonelor cu ape adânci și pentru șenalul navigabil, toate echipele folosind software-ul GS4 pentru achiziția, calibrarea și procesarea datelor.



Sonarele interferometrice Kongsberg GeoSwath Plus (Figura 13) se compun din: transductor (“transducer”), unitate de punte (“deck unit”) și receptor GNSS. Transductorul este partea submersă a ansamblului, care emite și înregistrează semnalul acustic întors de la substrat, fiind conectat la unitatea de procesare aflată pe nava.

Transductorul are conectat un mini senzor SVS (Sound Velocity Sensor) pentru determinarea continuă a vitezei de propagare a sunetului în apă, introdusă ulterior ca și corecție în procesare. Tot pe “transducer” este atașat ansamblul MRU (Motion Reference Unit) de senzori inerțiali de poziție și compensare a mișcărilor ambarcațiunii.

Figura 13. Componentele sonarului interferometric Kongsberg GeoSwath Plus

Sursa: Alfred Wegener Institute Helmholtz Center for Polar and Marine Research

Ca mod de funcționare, sonarul interferometric este asemănător cu sonarul cu scanare laterală (Side Scan Sonar)⁴, deoarece impulsurile acustice sunt emise în mod similar, însă pentru recepția semnalelor reflectate se utilizează o matrice de mai multe elemente transductoare amplasate la distanțe bine determinate între ele (Figura 14). Adâncimea diferitelor puncte de pe fundul albiei râurilor (sau mărilor) este precis calculată prin măsurarea diferenței de fază dintre semnalele recepționate la nivelul elementelor transductoare (corespunzătoare aceluiași punct), din care rezultă unghiurile dintre acestea, și prin cunoașterea exactă a vitezei de propagare a sunetului în coloana de apă (aproximativ 1500 m/s) și a timpului scurs între emisia și recepția semnalului.

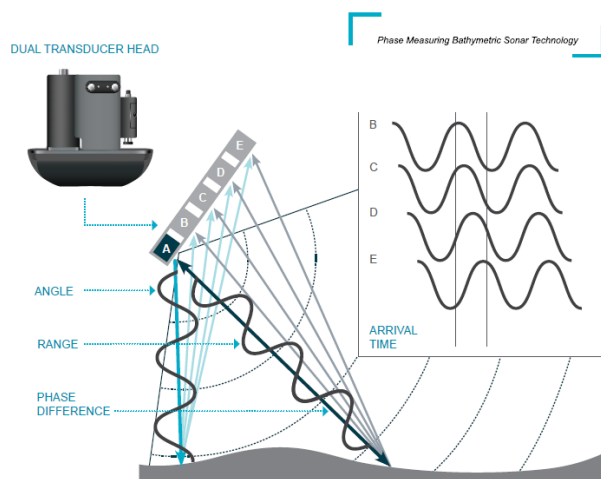


Figura 14. Modul de funcționare a sonarului interferometric

Sursa: International Hydrographic Organization

⁴ Sonarul cu scanare laterală (Side Scan Sonar) a fost descris în Raportul de cercetare nr. 1 - „Stadiul actual privind măsurători geodezice și Sisteme de Coordonate de Referință” (p.115).

Pe de altă parte, sateliții artificiali ce evoluează pe orbite circumterestre emit semnale satelitare difuzate în domeniul microundelor, în mod continuu sau prin impulsuri, la intervale regulate de timp, care sunt recepționate de către receptorul GNSS, care decodifică acest semnal pentru a extrage informațiile necesare determinării poziției receptorului, transmițând către sonar coordonatele de poziție și timpul la care s-a efectuat determinarea.

Pentru reducerea erorilor de poziționare (cuprinse în limita a 3÷5 m) au fost utilizate corecțiile diferențiale primite de la stațiile de bază de pe mal (puncte din rețeaua de sprijin AFDJ2014), în care au fost instalate echipamente GNSS (*Figura 15*). În urma aplicării acestor corecții, a rezultat o precizie orizontală de 16 mm + 1 ppm din lungimea bazei (distanța stație de bază-rover) și o precizie verticală de 30 mm + 1 ppm din lungimea bazei.

Deoarece receptorul GNSS și sonarul, deși au sisteme de referință diferite, execută măsurători asupra aceluiași punct, este necesară corelarea datelor furnizate de cele două echipamente, astfel încât unui punct cu coordonate planimetrice determinate prin tehnologie GNSS să-i fie asociată valoarea corespunzătoare a adâncimii măsurate de sonar [13].

Conform documentației tehnice a sistemului, precizia măsurării adâncimii cu sistemele GeoSwath Plus este de 3 mm.

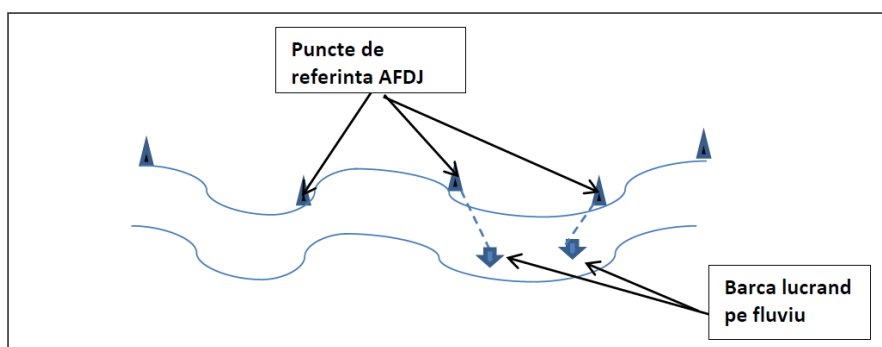


Figura 15. Transmiterea corecțiilor diferențiale din stațiile de bază de pe mal

În realizarea măsurătorilor batimetrice s-a optat pentru utilizarea sonarelor interferometrice în defavoarea sonarelor multifasciculare (multibeam) din următoarele rațiuni:

- Sonarele interferometrice pot cartă și malurile până la suprafața apei datorita unghiului mare de transmitere a fasciculelor (240 grade);
- Sonarele interferometrice oferă o acoperire de până la de două ori mai mare decât cele multifasciculare (multibeam) clasice, fiind mult mai eficiente în ceea ce privește timpul necesar și implicit costurile aferente;
- Sonarele interferometrice asigură un număr mare de puncte măsurate, peste 5000 în lungul fâșiei scanate (swath), pentru fiecare ping (emisie de unde acustice). Pentru gama de adâncime prevăzută pentru măsurători se emit cel puțin 10 pinguri/s, ceea ce înseamnă 7-8 pinguri/metru liniar de profil, rezultând 400-800 puncte măsurate/mp;
- Adâncimea este măsurată până la suprafața apei de la o distanță sigură de navigare față de diguri sau obstacole subacvatice;

- Sonarele interferometrice sunt proiectate special pentru operare în ape cu adâncime mică și foarte mică, în timp ce sonarele multifasciculare clasice oferă o acoperire redusă în aceste zone.

Modelul digital al terenului rezultat din procesarea datelor batimetrice a fost integrat cu cel derivat din date LiDAR, rezultând un MDT unitar de înaltă rezoluție (50cm x 50 cm), care acoperă întreaga zonă de studiu (*Figura 16*) - albia minoră a fluviului și 250 m stânga-dreapta de la primul mal ferm.

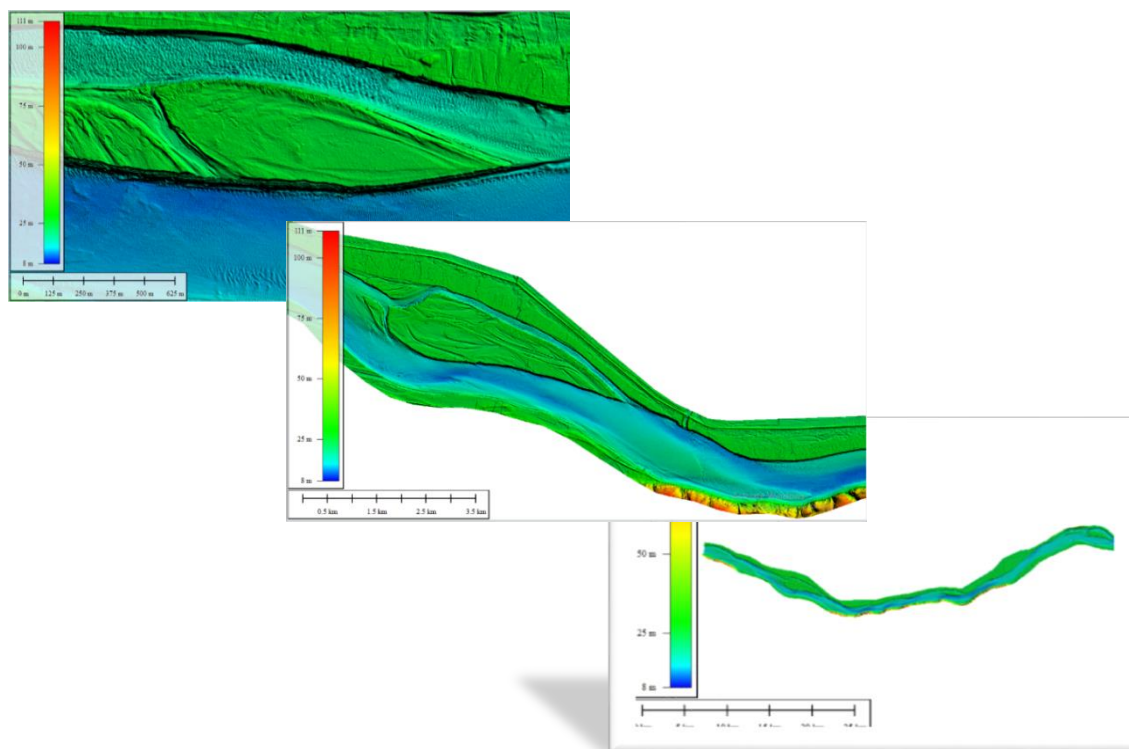


Figura 16. Vizualizarea și analiza MDT unificat folosind softul Global Mapper

La final, pentru aprecierea calității MDT unificat s-a efectuat o analiză privind zonele de conectare a MDT obținut din date LiDAR cu MDT obținut din măsurători batimetrice și au fost determinați indicatorii globali de precizie și acuratețe în conformitate cu prevederile din caietul de sarcini.

3.4.2. Date hidrologice

Datele hidrologice necesare construirii modelului hidrodinamic 2D, respectiv stabilirii condițiilor la limită, au fost furnizate de către Institutul Național de Hidrologie și Gospodărire a Apelor (INHGA) și AFDJ Galați. Toate datele colectate au fost reorganizate și procesate prin metode statistico-matematice (Microsoft Excel 2014). Acestea constau în:

- Debite lichide medii zilnice și niveluri medii zilnice de la stațiile hidrometrice Bechet și Corabia pentru anul 2017 (sursa: INHGA);

- Cheia limnimetrică de la stația hidrometrică Corabia valabilă pentru anul 2017 (sursa: INHGA);
- Coeficienții de rugozitate pentru albia minoră și pentru albia majoră, stabiliți în urma analizei mai multor seturi de date puse la dispoziție de către AFDJ Galați - S.C.N. Giurgiu și a fișierului .shp *Corine Land Cover (2012-2018)* cu acoperirea terenului.

Cheia limnimetrică de la s.h. Corabia a fost pusă la dispoziție sub formă tabelară, iar nivelurile erau exprimate relativ. Transformarea acestor valori relative în niveluri absolute (*Marea Neagră 1975*) a fost posibilă prin raportarea la valoarea „zero” miră corespunzătoare s.h. Corabia (19.647 m), după cum se poate observa în *Figura 17*.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	H(cm)/Q(mc/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
2	-70			1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	
3	-60	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	
4	-50	2100	2110	2120	2130	2140	2160	2170	2180	2190	2200	
5	-40	2210	2220	2230	2250	2260	2270	2280	2290	2300	2310	
6	-30	2320	2340	2350	2360	2370	2380	2390	2400	2410	2420	
7	-20	2440	2450	2460	2470	2480	2490	2500	2510	2530	2540	
8	-10	2550	2560	2570	2580	2590	2600	2620	2630	2640	2650	
9	0	2660	2670	2690	2700	2710	2720	2740	2750	2760	2780	



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1		SH Corabia	„Zero” mira	19,647	mdMN									
2														
3								18,937	18,927	18,917	18,907	18,897	18,887	18,877
4		H(cm)	H(m)/ Q(mc/s)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
5				0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	
6	-0,7	-70	18,947					1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980
7	-0,6	-60	19,047	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	
8	-0,5	-50	19,147	2100	2110	2120	2130	2140	2160	2170	2180	2190	2200	
9	-0,4	-40	19,247	2210	2220	2230	2250	2260	2270	2280	2290	2300	2310	
10	-0,3	-30	19,347	2320	2340	2350	2360	2370	2380	2390	2400	2410	2420	
11	-0,2	-20	19,447	2440	2450	2460	2470	2480	2490	2500	2510	2530	2540	
12	-0,1	-10	19,547	2550	2560	2570	2580	2590	2600	2620	2630	2640	2650	
13	0,0	0	19,647	2660	2670	2690	2700	2710	2720	2740	2750	2760	2780	



Figura 17. Exemplu de analiză și procesare a datelor brute în vederea utilizării acestora ca date de intrare în modelul matematic

3.4.3. Constituirea bazei de date geospațiale

Problematica modelării transportului sedimentar pe Dunăre și îmbunătățirea, în general, a proceselor de întreținere a căii navigabile este una de actualitate, deși a fost abordată și în trecut în cadrul mai multor proiecte și programe de cercetare.

Construirea modelului matematic reprezintă un pas deosebit de important în atingerea obiectivelor acestui proiect de cercetare (prezentate în *Proiectul programului de cercetare științifică, 2018*).

În acest scop, au fost consultate materiale bibliografice care să ofere un cadru general

pentru cercetare: teze de doctorat, reviste de specialitate, tratate de geografie, studii hidrologice, studii regionale, site-uri web etc.

Etapa de documentare pentru realizarea acestui *raport de cercetare* a culminat cu realizarea unei baze de date care să conțină informații cât mai detaliate privind fluviul Dunărea în general și sectorul Bechet-Corabia în special.

Datele geospațiale în format vectorial au fost organizate în straturi tematice numite “layere” (Tabelul 3), care să permită analize în mediul GIS (*Sistem Informațional Geografic*).

De obicei, sursele de bază sunt datele de tip raster, care se vectorizează, rezultând alte date cărora li se adaugă o tabelă de atribute cu mai multe câmpuri caracteristice. Aceste câmpuri sunt folosite la rândul lor pentru design (etichete, clasificări) sau pentru a genera noi informații.

Tabelul 3. Structura bazei de date geospațiale de tip vector utilizate în studiu

DATE DIGITALE PRIMARE	FORMAT	SURSA DATELOR
<i>Rețea hidrografică</i>	<i>Vector; linie</i>	<i>Vectorizarea hărții topografice 1:25000</i>
<i>Stații hidrometrice</i>	<i>Vector; punct</i>	<i>Baza de date INHGA</i>
<i>Localități</i>	<i>Vector; punct</i>	<i>geo-spatial.org</i>
<i>Granița de stat</i>	<i>Vector; poligon</i>	<i>geo-spatial.org</i>
<i>Limita A.B.A.</i>	<i>Vector; poligon</i>	<i>Baza de date INHGA</i>
<i>Bazine hidrografice</i>	<i>Vector; poligon</i>	<i>Baza de date INHGA</i>
<i>Maluri</i>	<i>Vector; linie</i>	<i>Vectorizare ortofotoplanuri cu rezoluția de 0,5 m (ediția 2013-2017);</i>
<i>Albia majoră</i>	<i>Vector; linie</i>	<i>Vectorizare ortofotoplanuri cu rezoluția de 0,5 m (ediția 2013-2017);</i>
<i>Talveg</i>	<i>Vector; linie</i>	<i>AFDJ Galați (proiect “Fast Danube”)</i>
<i>Ostroave/ Insule fluviale</i>	<i>Vector; poligon</i>	<i>Vectorizare ortofotoplanuri cu rezoluția de 0,5 m (ediția 2013-2017);</i>
<i>Diguri</i>	<i>Vector; punct</i>	<i>Baza de date INHGA</i>
<i>Curbe de nivel</i>	<i>Vector; linie</i>	<i>Vectorizarea hărții topografice 1:25000</i>
<i>Utilizare teren</i>	<i>Vector; poligon</i>	<i>Vectorizare Corine Land Cover 2012-2018</i>
<i>Soluri</i>	<i>Vector; poligon</i>	<i>Vectorizarea hărții solurilor 1:200000</i>
<i>Geologie</i>	<i>Vector; poligon</i>	<i>Harta geologică a României, scara 1:200000</i>

Până la finalizarea proiectului de cercetare, această bază de date va fi completată și actualizată în mod constant, deoarece aplicarea operațiilor specifice GIS pe date vectoriale brute poate genera date în format raster, mult mai utile pentru analize și previziuni asupra anumitor procese geomorfologice actuale, existând posibilitatea prelucrării lor pentru a simula condițiile din teren și a cuantifica influențele acestora în declanșarea și evoluția unor procese invizibile ochiului uman sau nereprezentate pe harta topografică.

3.4.4. Alte surse de date

În general, procesele hidrologice, atât cele care caracterizează scurgerea lichidă, cât și cele care descriu scurgerea de aluviuni, se desfășoară la scara bazinelor hidrografice și sunt determinate de o serie de factori de mediu, dintre care cei mai importanți sunt substratul litologic (geologia), relieful, solurile, utilizarea terenului, elementele climatice și apele freatice.

3.5. Etape de lucru

Pentru descrierea și exemplificarea modurilor în care factorii hidrodinamici acționează asupra albiei fluviului și implicit asupra formațiunilor specifice patului de albie, au fost utilizate metode specifice modelării hidraulice coroborate cu tehnici geospațiale.

3.5.1. Programe de specialitate utilizate

Pentru digitizarea, prelucrarea și exportul datelor necesare modelării batimetrice, precum și pentru transpunerea spațială a datelor și a informațiilor în schițe și hărți au fost utilizate aplicațiile GIS: *ArcMap 10.5*, *ArcGIS PRO 2.1* și *Global Mapper v18*.

Modelul hidraulic 2D al zonei studiate (Bechet-Corabia) a fost elaborat cu ajutorul modulului hidrodinamic *MIKE 21 Flow Model (FM)* din pachetul software *MIKE 21*, dezvoltat de organizația internațională independentă de consultanță și cercetare *DHI* pentru modelarea 2D a râurilor, valurilor, transportului sedimentar, calității apei și advecției/dispersiei (<https://www.mikepoweredbydhi.com/>).

Soluția *MIKE 21 Flow Model HD FM* este bazată pe ecuațiile Navier-Stokes integrate în raport cu adâncimea (pentru curgerea cu suprafață liberă) și utilizează o rețea de elemente finite (*Flexible Mesh*) [14]. Programul calculează nivelul apei, adâncimea, mărimea vitezei și direcția acesteia din fiecare element finit al rețelei modelului și la fiecare interval de timp al simulării modelului.

De asemenea, *MIKE 21 FM* permite simularea transportului de sedimente folosind un modul de transport de sedimente necoezive ("*Sand Transport*"), un modul de transport de sedimente coezive ("*Mud Transport*") și un modul de morfologie (pentru actualizarea cotelor din patul albiei pe parcursul simulării modelului).

Modulul *FM* din pachetul *MIKE 21* permite o simulare mai performantă a sistemelor combinate de sedimente grosiere și fine decât alte module de curgere 2D, precum pachetul *MIKE21C* (care folosește o rețea cu ochiuri curbilinii), unde simularea transportului sedimentelor fine este mai simplistă.

3.5.2. Pregătirea datelor geospațiale utilizând aplicații GIS

Cele mai importante informații în construirea modelului hidrodinamic bidimensional al curgerii sunt reprezentate de batimetrie, împreună cu topografia albiei majore sau, mai bine zis, modelul digital al terenului. După cum s-a menționat anterior, MDT-ul corespunzător sectorului Bechet-Corabia acoperă albia minoră a fluviului și 250 m de la limita apei. El provine din procesarea și unificarea datelor LiDAR și a datelor batimetrice, fiind un MDT unitar de o acuratețe ridicată și o rezoluție spațială mare: 0.5 m x 0.5 m.

De cele mai multe ori, procesul de modelare hidraulică 2D necesită o componentă hardware cu o configurație specială, pentru ca exportul/importul datelor și simulările pe zone întinse să se realizeze într-un timp rezonabil.

Întrucât am avut la dispoziție un calculator performant, însă nu de calibrul unei stații grafice (Workstation) construite și pregătite să reziste solicitărilor continue pe întreaga durată a unei zile, s-a optat pentru reeșantionarea MDT la o rezoluție spațială de 1 m x 1 m.

Mai întâi, redimensionarea MDT-ului (fișier de tip raster) conform zonei de studiu s-a efectuat cu ajutorul funcției *Extract by Mask* din Modulul *Spatial Analyst* din ArcMap 10.5, apoi a fost accesată funcția *Resample* (Figura 18), care poate fi găsită în fereastra *ArcToolbox*: *Data Management Tools* → *Raster* → *Raster processing* → *Resample*. La “input” a fost selectat modelul numeric altitudinal al terenului, pentru X și Y am introdus valoarea 1, iar la *Resampling Technique* a fost selectată metoda *Nearest*.

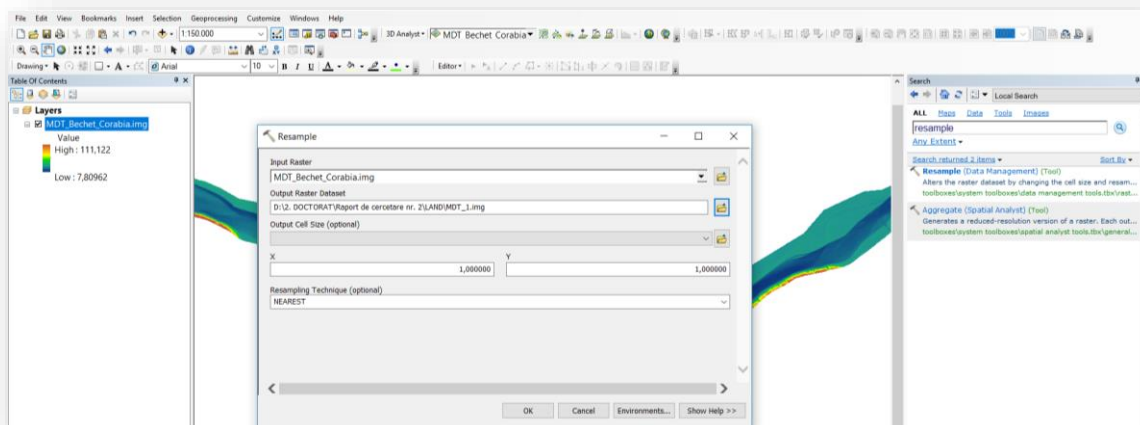


Figura 18. Reeșantionarea MDT folosind funcția *Resample*

Soft-ul *Global Mapper* a fost utilizat pentru conversia acestui fișier raster din format *.img* în formatul acceptat de *Mike 21*, și anume *.xyz*, urmând pașii *File* → *Export* → *Elevation Grid Format* → *XYZ Grid*. Fișierul *.xyz* rezultat conține peste 100 milioane de puncte.

Vectorizarea liniei malurilor, a albiei majore și a insulelor sau ostroavelor fluviale (Figura 21) s-a făcut în *ArcMap 10.5*, pe baza MDT, a ortofotoplanurilor ediția 2013-2017, respectiv 2017-2019 (figura 20), cu rezoluția spațială de 50 cm, realizate de Direcția Topografică Militară, dar și pe baza imaginilor satelitare Sentinel 2 (Figura 19) din perioada campaniei de măsurători.

Pentru exportul datelor de tip *shapefile* în format *.xyz*, s-a utilizat unealta *Shape to XYZ Conversion* creată de *DHI* (distanța maximă setată între puncte a fost de 100 m).



Figura 19. Imagine satelitară Sentinel 2 (IR – benzile 8, 4, 3)

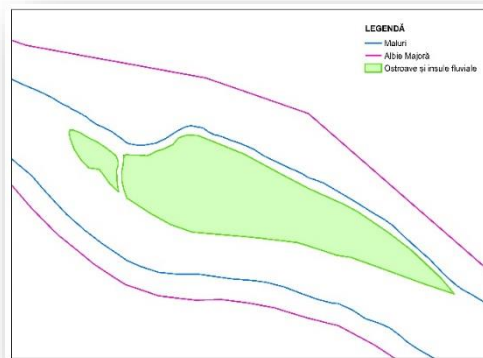


Figura 201. Vectorizarea malurilor, albiei majore, ostroavelor și insulelor fluviale pe baza MDT, ortofotoplanurilor și imaginilor satelitare Sentinel 2 (banda IR)

Figura 210. MDT suprapus peste ortofotoplan

Ultima etapă de pregătire a datelor înaintea importului acestora în *Mike 21* a constat în crearea fișierului *.xyz* cu valorile coeficientului de rugozitate *Manning* ($M=1/n$, unde n este coeficientul adimensional de rugozitate), care diferă pentru cursul principal, insule și albia majoră, luând valori între 10 – 38.46 (Figura 22). Cu cât valoarea numărului Manning este mai mică, cu atât crește rezistența terenului (repectiv scade viteza de curgere) [15].

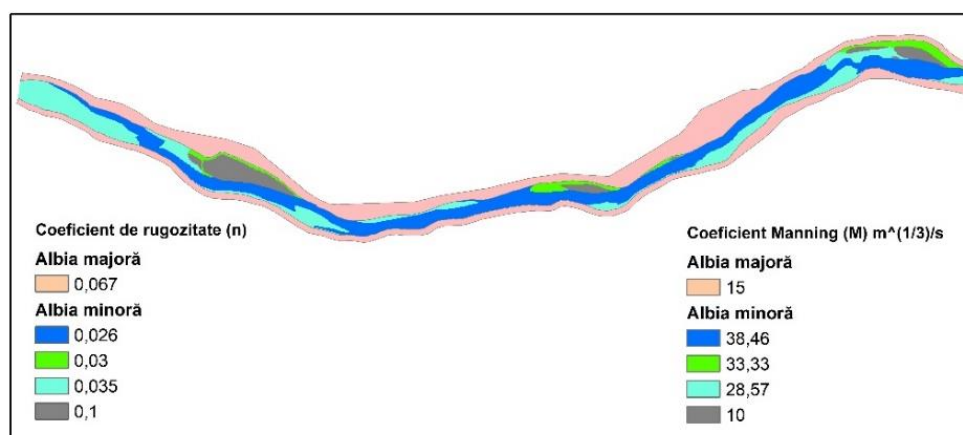


Figura 22. Coeficienții de rugozitate pentru albia majoră, albia minoră și insule

3.5.3. Importul datelor geospațiale și generarea MESH în Mike 21

În Mike Zero (denumirea interfeței grafice DHI din care se accesează toate modulele disponibile: Mike HYDRO, Mike 11, Mike 21, Mike 3, Mike Flood, Mike SHE etc.), se selectează *New* → *File* → *Mesh Generator*.

Primul pas în obținerea grilei flexibile (triunghiulare) de elemente finite îl reprezintă setarea proiecției cartografice, și anume “Stereo_70” în cazul acestui studiu.

Următorul pas constă în importarea limitelor domeniului de lucru în *Mesh Generator*: *Data* → *Import Boundary*, apoi se selectează fișierele .xyz (exportate anterior din mediul GIS) pentru ostroave, insule fluviale și pentru albia majoră. La “*Boundary properties*” se selectează “*X, Y, Connectivity and Z*” (Figura 23).

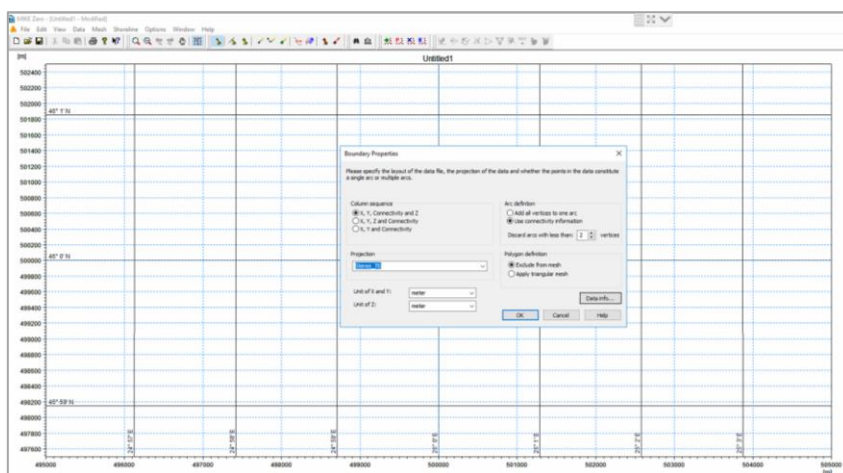


Figura 23. Setarea proiecției și a tipului de fișier .xyz

Foarte important de menționat faptul că se va bifa “*Exclude from mesh*” pentru toate ostroavele și insulele fluviale și „*Apply triangular mesh*” doar pentru cursul principal, deoarece se presupune că apa nu curge peste acele formațiuni insulare acoperite cu vegetație.

După editarea vertecșilor și nodurilor limitelor domeniului, se va genera grila de elemente finite astfel: *Mesh* → *Mesh Generation* (figura 24), cu următoarele setări:

- **Maximum element area (aria maximă a elementului):** 5000 m²;
- **Smallest allowable angle (cel mai mic unghi admis):** 30;
- **Maximum number of nodes (număr maxim de noduri):** 80000.

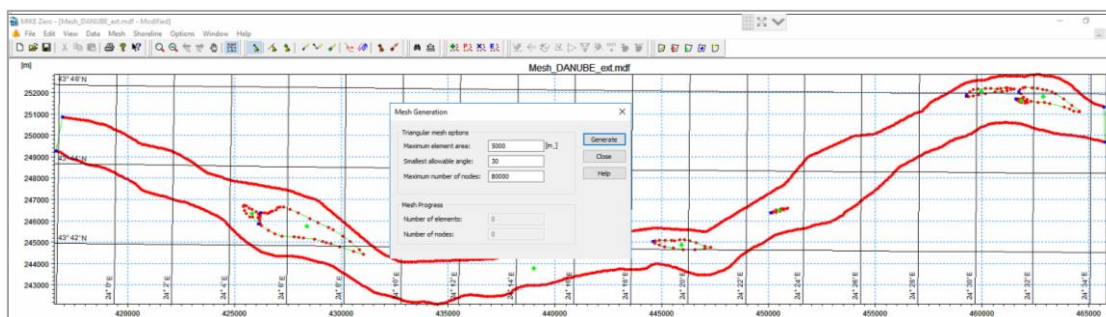


Figura 24. Generarea rețelei de elemente finite

Prin această operație, domeniul modelului este reprezentat printr-o rețea de elemente finite triunghiulare interconectate (Figura 25). O astfel de rețea este generată automat de sistemul de calcul, iar rezoluția modelului este controlată prin specificarea ariei maxime pe care un element individual o poate ocupa în rețea. De exemplu, dacă suprafața maximă a elementului a fost setată la 5000 m², atunci fiecare element din rețea va avea o suprafață de cel mult 5000 m². Rezoluția rețelei poate varia în diferite părți ale domeniului modelat (la final am aplicat și funcția “Smooth Mesh”). Pe măsură ce se reduce mărimea celulei, crește atât numărul de elemente din model, cât și timpul de calcul necesar simulării modelului.

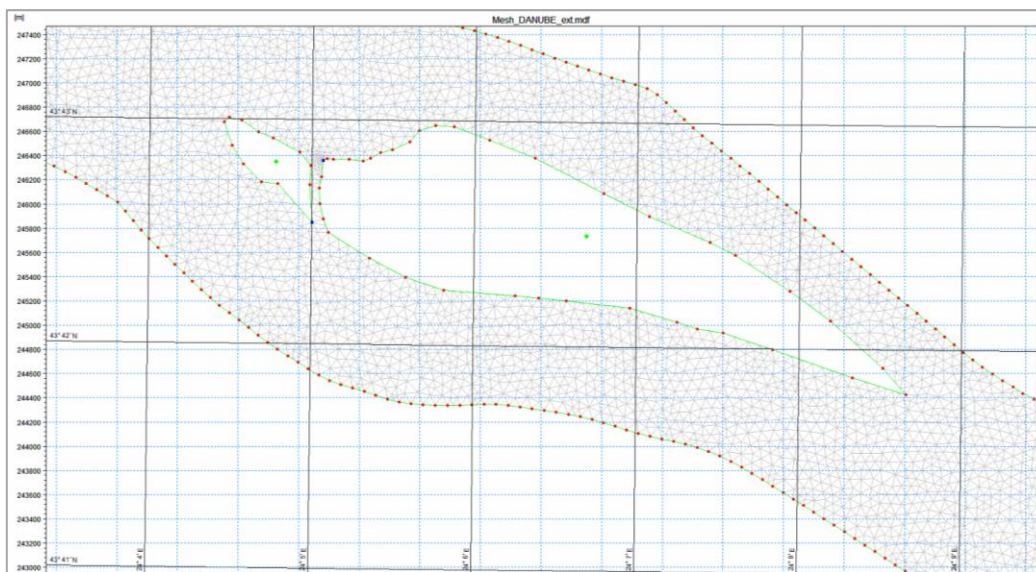


Figura 25. Rețea de elemente finite triunghiulare interconectate (Triangular Mesh)

După această etapă, au fost importate în Mesh punctele rezultate din exportul MDT-ului în format .xyz, prin accesarea instrumentului “Manage Scatter Data” din meniul Data.

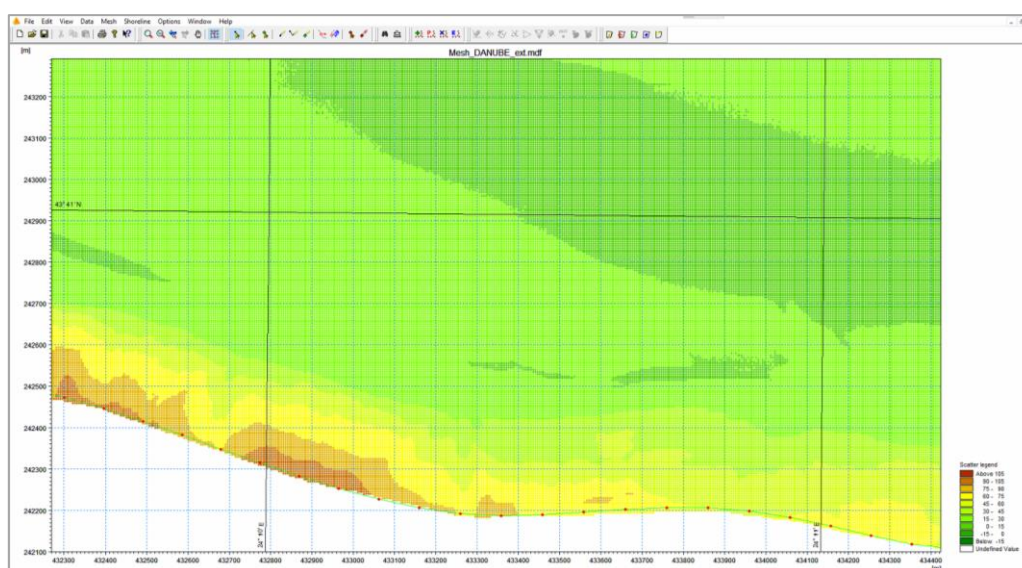


Figura 26. Importarea fișierului .xyz cu punctele extrase din MDT

Interpolarea acestor milioane de puncte utilizând funcția “*Interpolate*” din meniul “*Mesh*” reprezintă ultimul pas în obținerea fișierului de batimetrie. Cotele punctelor sunt exprimate în sistemul de altitudini Marea Neagră 1975 (figura 27).

Rezultatul a fost ulterior exportat accesând meniul *Mesh* → *Export Mesh* → *Mesh File* (*Item type* - *Bathymetry*).

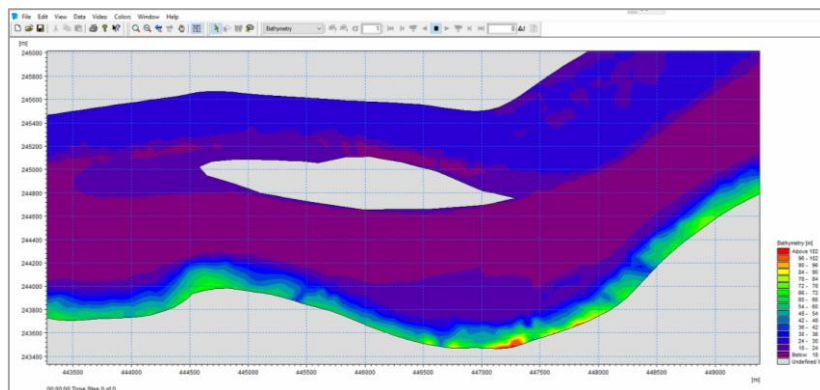


Figura 27. Fișierul Mesh pentru batimetria sectorul dunărean Bechet - Corabia

În mod asemănător, a fost importat în *Mesh* fișierul .xyz cu coeficienții Manning de rugozitate – *bed resistance* (creat în *ArcMap*): *Data* → *Manage Scatter Data* (figura 28).

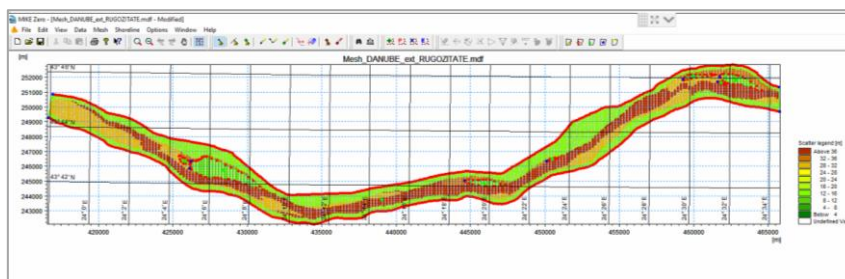


Figura 28. Importarea fișierului .xyz cu coeficienții Manning de rugozitate

Aceste valori au fost interpolate, iar rezultatul a fost exportat ca *DFSU Data-file* (din meniul *Mesh* → *Export Mesh*), un format specific *Mike*, cu precizarea “*Manning’s M*” pentru *Item type*.

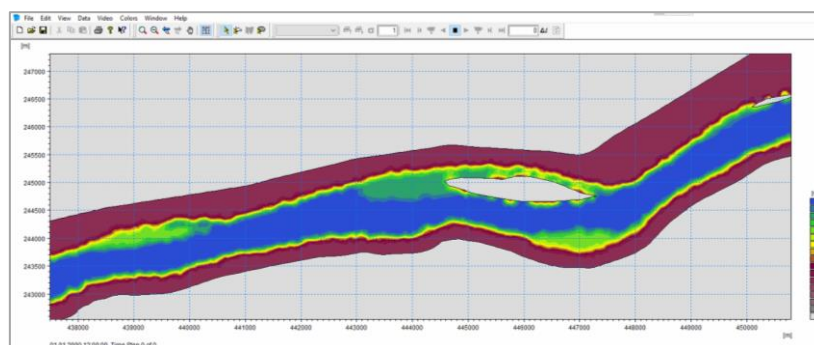


Figura 29. Fișierul .dfsu pentru rugozitatea sectorului dunărean Bechet - Corabia

3.5.4. Introducerea condițiilor la limită

Stabilirea condițiilor la limită (*Boundary conditions*) pentru model se referă la:

- Introducerea hidrografului debitelor în secțiunea din amonte (s.h. Bechet) corespunzător perioadei de simulare;
- Introducerea cheii limnimetrice în secțiunea din aval (s.h. Corabia), valabilă la nivelul anului 2017.

De asemenea, a fost necesară introducerea unei condiții inițiale (*Initial Condition*), care constă în:

- Introducerea unui debit constant în secțiunea din amonte - și s-a optat pentru debitul mediu pentru anul 2017 de la s.h. Bechet ($4461 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Introducerea cheii limnimetrice în secțiunea din aval (s.h. Corabia).

Pentru a stabili aceste condiții la limită utilizând *Mike*, se impune crearea unor fișiere *.dfs0*, atât pentru hidrograful debitelor de la s.h. Bechet (*Figura 30*), cât și pentru cheia limnimetrică de la s.h. Corabia (*Figura 31*).

a) Pentru debite:

- Din *Mike Zero* se selectează *New* → *File* → *Time Series (.dt0, .dfs0)* → *Blank Time Series*, iar în fereastra care se deschide se fac următoarele setări (în limba engleză) pentru tipul axei, data de început, pasul de timp, numărul de pași de timp, denumirea fișierului, tipul înregistrării, unitatea de măsură:
 - **Axis Type:** *Equidistant Calendar Axis (axă de timp echidistantă)*;
 - **Start time:** 23.04.2017 (au fost consultate rapoartele de pe site-ul proiectului *Fast Danube* pentru a verifica perioadele în care s-au efectuat măsurătorile batimetrice în acest sector (<http://www.fastdanube.eu/>);
 - **Time step:** 1 day;
 - **Number of Time Steps:** 44;
 - **Name:** *Debite Bechet*;
 - **Type:** *Discharge (debit)*;
 - **Unit:** m^3/s ;

Debitele introduse în fișierul *.dfs0* corespund celor din perioada de simulare a modelului (23.04.2017 – 05.06.2017).

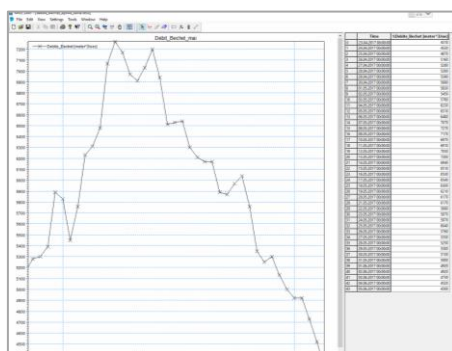


Figura 30. Fișier .dfs0 cu hidrograful debitelor (s.h. Bechet)

b) Pentru cheia limnimetrică:

- Din *Mike Zero* se selectează *New* → *File* → *Time Series (.dt0, .dfs0)* → *Blank Time Series*, iar în fereastra care se deschide se fac următoarele setări:
- **Axis Type:** *Relative Item Axis*;
- **Number of Time Steps:** 467 (câte rânduri sunt în cheia limnimetrică în format .xls);
- **Axis Units:** m;
- **Name:** *Cheie Corabia*;
- **Type:** *Water level (nivelul apei)*;
- **Unit:** m;

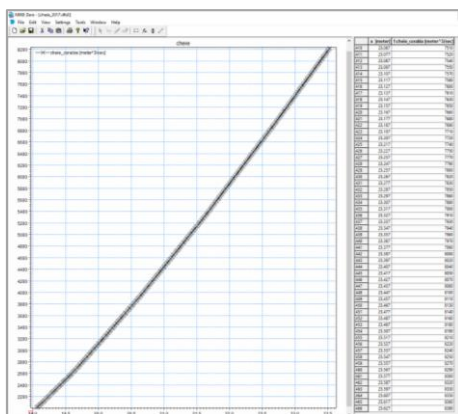


Figura 31. Fișier .dfs0 cu cheia limnimetrică valabilă pentru anul 2017 (s.h. Corabia)

Fișierul .dfs0 cu cheia limnimetrică valabilă pentru anul 2017 la s.h. Corabia va fi folosit atât pentru rularea condiției inițiale (cu debit constant), cât și pentru condiția la limită din aval a modelului final.

3.5.5. Setarea modelului Mike 21 Flow Model (FM)

După prelucrarea tuturor datelor și pregătirea fișierelor în formate specifice *Mike 21*, pentru a seta modelul *Mike 21 FM*, au fost urmați pașii: *Mike Zero* → *Mike 21* → *Flow Model FM*, apoi se va deschide fereastra din figura 32:

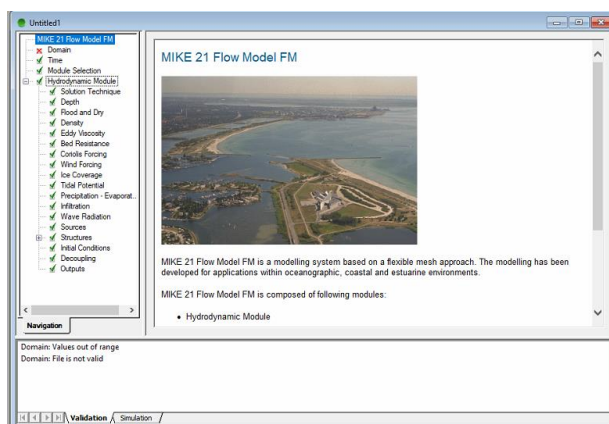


Figura 32. Modulul Mike 21 FM

Aici vom introduce următoarele informații și seturi de date:

- **Domain (domeniul de lucru):** fișierul .mesh creat anterior pentru batimetria sectorului dunărean Bechet – Corabia;
- **Time (perioada de timp):** 23.04.2017 – 05.06.2017, însemnând 44 de zile, cu un pas de timp de 30 s, rezultând un număr total de pași de timp de 123840;
- **Modul selection (modulul selectat):** Hydrodynamic.

➤ Modulul Hydrodinamic a fost setat astfel:

- **Solution technique (soluția tehnică):** Low order, fast algorithm (în acest fel simularea este mai rapidă);
- **Flood and dry:** Drying depth – 0.01m; Wetting depth – 0.1 m;
- **Density (densitatea):** Barotropic;
- **Eddy Viscosity (vâscozitatea Eddy):** Constant eddy formulation;
- **Bed resistance (rugozitatea):** Manning number – a fost introdus fișierul .dfsu creat anterior;
- **Initial condition (condiția inițială):** a fost selectat fișierul .dfsu rezultat la simularea cu debit constant ($4461 \text{ m}^3/\text{s}$) în amonte și cheia limnimetrică în aval; Item: Surface elevation;
- **Boundary conditions (condițiile la limită):** în amonte se introduce fișierul .dfs0 cu hidrograful debitelor (s.h. Bechet) – Type: Specified discharge, Format: Strong formulation, Varying in time; iar în aval fișierul .dfs0 cu cheia limnimetrică valabila pentru anul 2017 la s.h. Corabia – Type: Specified level, Format: Rating Curve.
- **Output items (rezultatele obținute – figura 33):** Surface elevation, Total water depth, Current Speed, U velocity, V velocity.

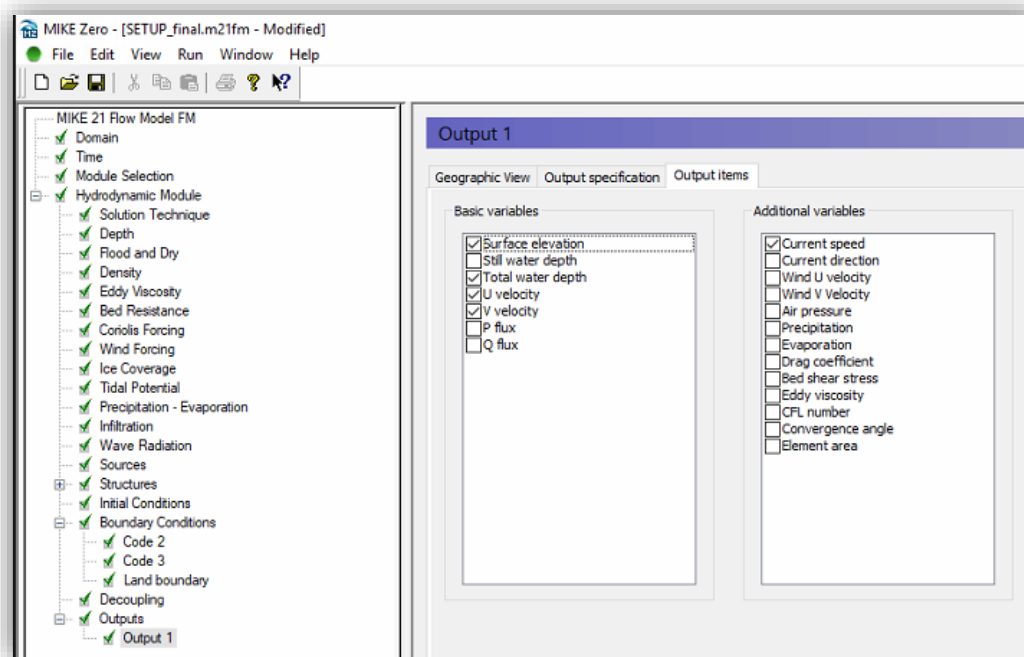


Figura 33. Rezultatele simulării

4. REZULTATE ȘI CONCLUZII

La finalul simulării (de aproximativ 38 ore) au fost calculate, pentru fiecare pas de timp și în fiecare element finit al rețelei modelului: nivelul apei raportat la MN75 (*Surface elevation*) – figura 34, adâncimea apei (*Total water depth*) – figura 35, viteza curentului (*Current speed*) – figura 36 și direcția vitezei (componentele U și V – *U velocity*, *V velocity*) – figura 37 și figura 38. Aceste informații sunt stocate într-un fișier în format *.dfsu*.

Etimologic, conceptul de „simulare” provine din latinescul *simulatio*, care reprezintă capacitatea de a reproduce, a imita sau a reprezenta un fenomen.

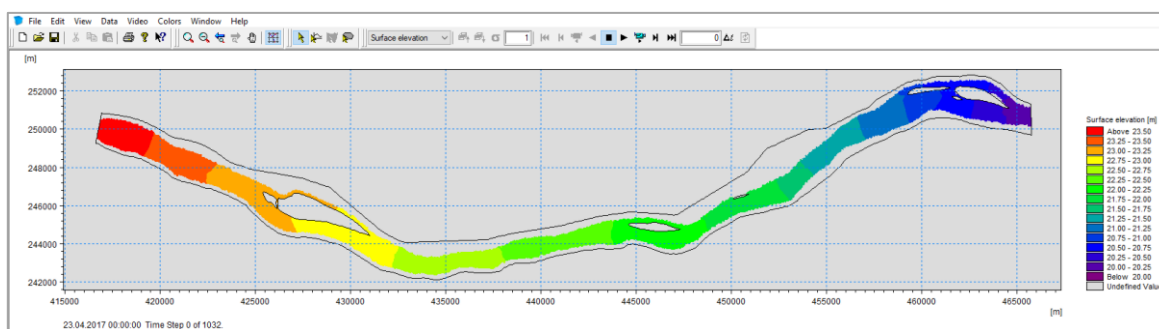


Figura 34. Nivelul Apei (*Surface elevation*)

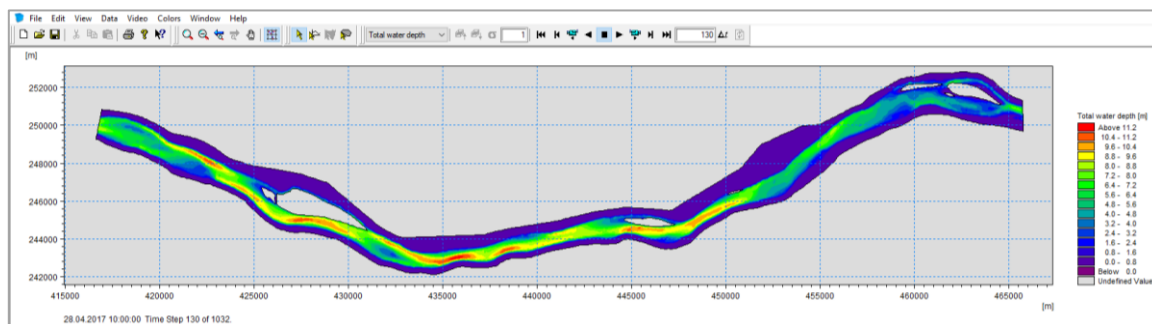


Figura 35. Adâncimea apei (*Total water depth*)

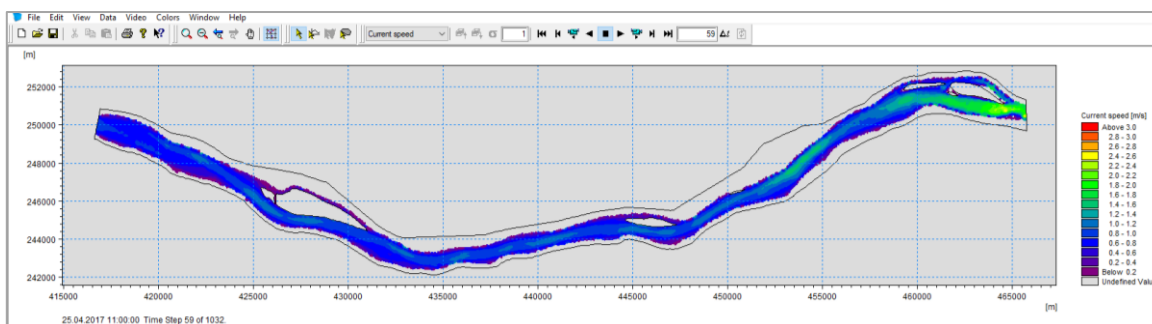
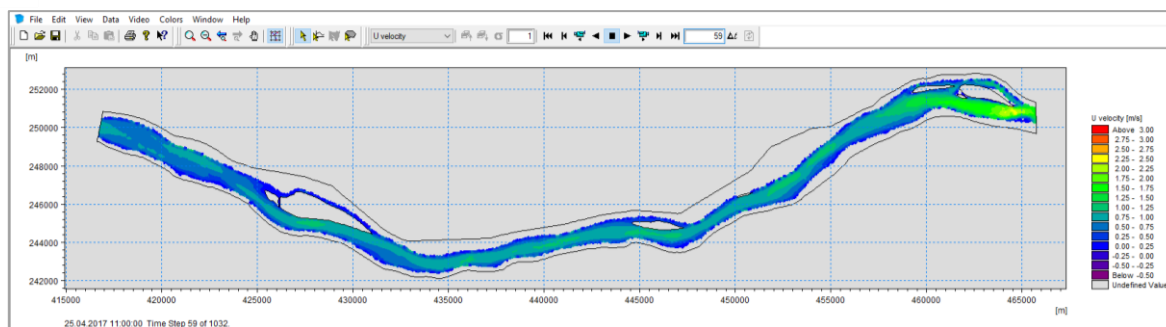
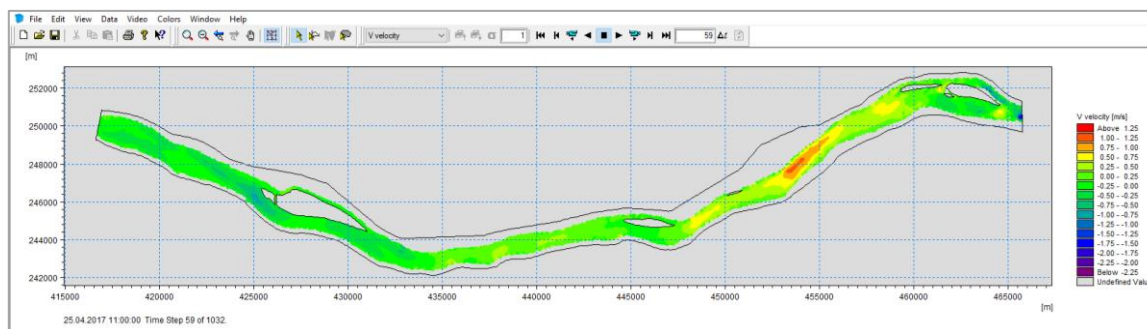


Figura 36. Viteza curentului (*Current speed*)

Figura 37. Componenta *U* a vitezei (*U* velocity)Figura 38. Componenta *V* a vitezei (*V* velocity)

Pentru a demonstra capabilitatea modelului hidrodinamic bidimensional de a reproduce cu o mare precizie comportamentul oricărui alt eveniment hidrologic similar, următoarea etapă a studiului constă în calibrarea și validarea acestuia.

Calibrarea modelului hidrodinamic 2D

În general, **calibrarea modelului** se realizează prin modificarea coeficienților de rugozitate în albia minoră, astfel încât diferențele dintre cheia limnimetrică măsurată și cheia limnimetrică modelată să fie mai mici de 10 cm.

În acest scop, a fost creat un **model hidraulic 1D** cu ajutorul modulului **MIKE Hydro River**, pe baza a 27 de secțiuni transversale extrase din MDT-ul avut la dispoziție pentru sectorul critic Bechet-Corabia și păstrând în rest aceleași date de intrare ca și pentru modelul 2D, inclusiv perioada de simulare fiind comună (23.04.2017-05.06.2017).

Valorile coeficienților de rugozitate au fost definite pe baza ortofotoplanurilor și a stratului *Corine Land Cover*, separat pentru albia majoră, insule și cursul principal. Rugozitatea depinde de dimensiunea particulelor care compun patul albiei.

După rularea modelului 1D în regim nepermanent, cu valorile *M* ajustate anterior, s-a comparat hidrograful nivelurilor zilnice simulate cu hidrograful nivelurilor zilnice măsurate la s.h. Corabia (date puse la dispoziție de către I.N.H.G.A.), diferențele între nivelul simulat și cel măsurat încadrându-se în intervalul [-10.3 cm, +7.9 cm], cu o medie a acestora de -1.6 cm (Figura 39).

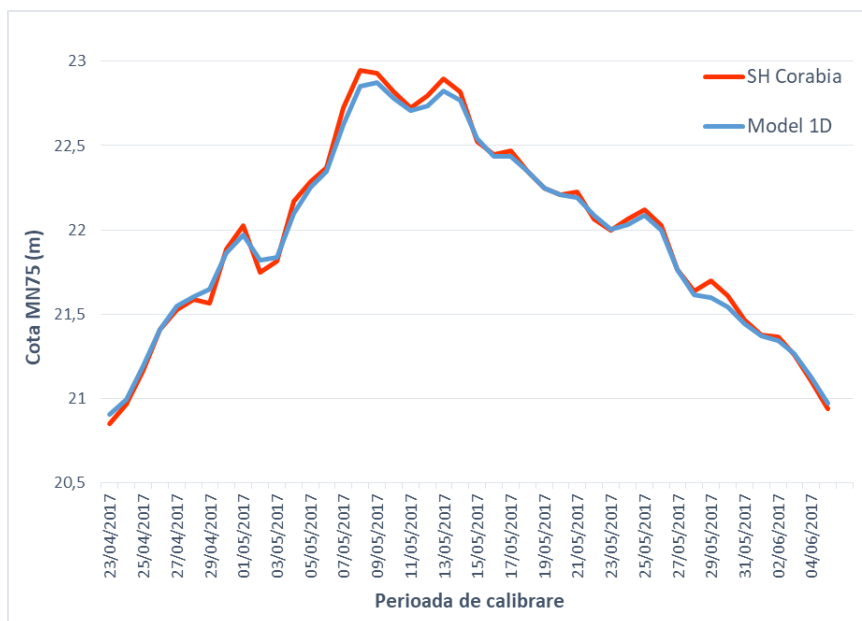


Figura 39. Calibrarea modelului hidrodinamic 1D

Pentru calibrarea modelului 2D, s-a utilizat fișierul obținut prin ajustarea valorilor coeficienților de rugozitate, în urma testelor efectuate prin modelare 1D.

Cu ajutorul modulului “*Data extraction FM*” accesat din MIKE Zero, au fost extrase, din modelul 2D, nivelurile zilnice ale apei (în sistem de altitudini MN75) corespunzătoare secțiunii s.h. Corabia, ca serie temporală, pentru a le compara cu hidrograful nivelurilor zilnice măsurate pus la dispoziție de INHGA. Diferențele între nivelurile zilnice simulate și cele măsurate s-au încadrat în intervalul $[-5.35 \text{ cm}, +12.35 \text{ cm}]$, cu o medie a acestora de $+2.25 \text{ cm}$ (Figura 40). Prin obținerea acestor valori, se consideră că modelul a fost calibrat cu succes.

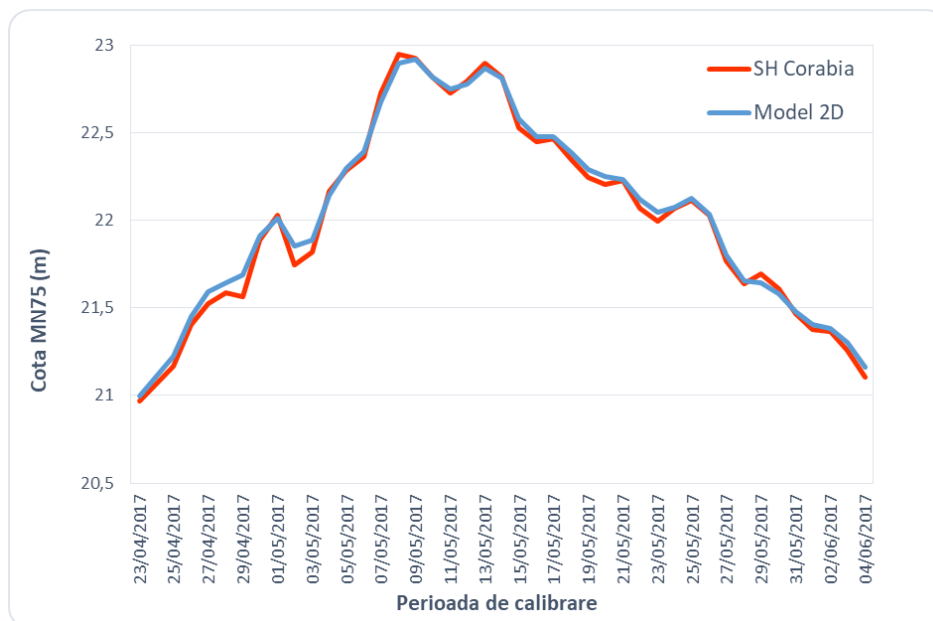


Figura 40. Calibrarea modelului hidrodinamic 2D

Validarea modelului hidrodinamic 2D

Validarea modelului hidraulic presupune utilizarea în modelarea numerică a unor seturi de date hidrologice diferite față de cele utilizate în etapa de calibrare. Pentru a demonstra stabilitatea modelului hidrodinamic bidimensional, rezultatele simulărilor trebuie să fie cât mai apropiate de datele obținute din măsurători.

În cazul de față, validarea s-a realizat simulând debitele zilnice înregistrate la stația hidrometrică Bechet în **perioada 03.03.2017 – 31.03.2017**. Debitul maxim din această perioadă de validare a fost de 8010 m³/s, iar cel minim de 6010 m³/s, față de maximum de 7270 m³/s și minimum de 4300 m³/s înregistrate în perioada de calibrare, 23.04.2017-05.06.2017.

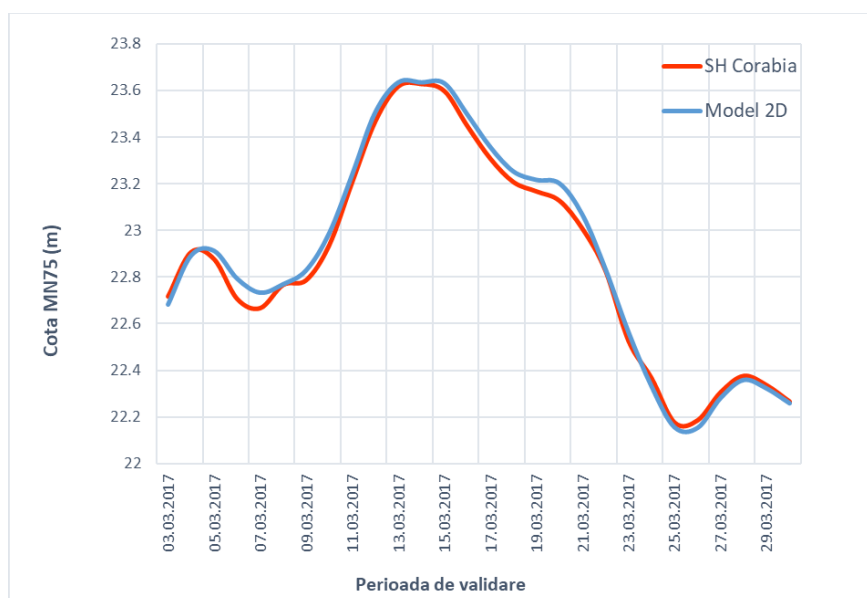


Figura 41. Validarea modelului hidrodinamic 2D (perioada 03.03.2017-31.03.2017)

La finalul simulării, care a avut un timp de rulare de 24 de ore, s-a extras hidrograful nivelurilor corespunzătoare secțiunii s.h. Corabia, cu ajutorul modulului “Time Series Comparator”, pentru a fi comparat cu hidrograful nivelurilor măsurate la stația hidrometrică în perioada 03.03.2017 – 31.03.2017. Diferențele între nivelurile zilnice simulate și cele măsurate se încadrează în intervalul [-3.44 cm, +8.76 cm], cu o medie a acestora de +2.24 cm (Figura 41).

Concluzii:

- Rezultatele obținute în urma proceselor de calibrare și validare confirmă faptul că modelul 2D elaborat poate reproduce cu un nivel înalt de încredere comportamentul oricărui alt eveniment hidrologic similar.
- Acest model hidraulic 2D constituie baza pentru realizarea unui model de eroziune pentru sectorul critic Bechet-Corabia.

BIBLIOGRAFIE

- [1] D. Cioc, G. Tatu, *Modelarea în Hidrotehnică*, Revista Hidrotehnică, pp. 207-208, 1981.
- [2] I. M. Cernica, *Contribuții la teoria algebrică a analizei dimensionale*, Sebeș, 2014.
- [3] M. Degeratu, *Analiză dimensională, similitudine și modelare*, București: Editura Academiei Oamenilor de Știință din România, 2015.
- [4] I. Bartha, V. Javureanu, N. Marcoie, *Hidraulică* - vol. II, 2004.
- [5] H. Chanson, *The Hydraulics of Open Channel Flow*, Arnold, 338 Euston Road, London NW1 3BH, UK, Londra, 1999.
- [6] C. Diaconu, O. Blaga și D. Lăzărescu, *Hidraulică și Hidrologie*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1978.
- [7] E. Trofin, *Hidraulică și hidrologie*, București, Editura Didactică și Pedagogică, 1974.
- [8] C. Mateescu, *Hidraulica*, 1961: Editura de Stat Didactica și Pedagogică, București.
- [9] D. Nistoran, I. Armaș, C. S. Ionescu, Ș. Constantinescu, C. Borcea și S. M. Teodor, *Model hidrodinamic 2D pentru analiza riscului la inundații în localitatea Sf. Gheorghe din Delta Dunării*, 2008.
- [10] R. Văduva, *Planificarea integrată a teritoriului în condiții de incertitudine a riscului la inundații*, Teza de doctorat. Universitatea Politehnica Timișoara, Facultatea de Construcții - Departamentul de Hidrotehnică, Timișoara, 2012.
- [11] B. A. Chevereșan, *Acuratețea MNT pentru definirea zonelor inundabile*, Teză de doctorat. Universitatea Tehnică de Construcții București, Facultatea de Hidrotehnică, București, 2011.
- [12] I. M. Moisoiu, *Contribuții la culegerea datelor spațiale în bazine hidrografice prin metode geodezice și modelarea lor matematică*, Teză de doctorat. Universitatea Tehnică de Construcții București, Facultatea de Geodezie, București, 2013.
- [13] D. C. Constantinescu, D. P. Constantinescu, A. Constantinescu, *Echipament pentru batimetria și cartografierea lacurilor de baraj*, Tehnologiile energiei, ianuarie 2007.
- [14] N. R. Olsen, *Numerical Modelling and Hydraulics*, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- [15] M. I. Chevereșan, *Gestiunea cantitativă a resurselor de apă în bazinul hidrografic Ialomița*, Teză de doctorat. Universitatea Tehnică de Construcții București, Facultatea de Hidrotehnică, București, 2010.
- [16] R. Manea, *Batimetrie - Note de curs*, Facultatea de Îmbunătățiri Funciare și Ingineria mediului, București, 2008.
- [17] D. Cioc, *Hidraulică*, București, Editura Didactică și Pedagogică, 1975.

Surse online:

<http://www.fastdanube.eu/official-documents>

<https://marine-research.com/>

<https://www.awi.de/en.html>

<https://www.iho.int/srv1/index.php?lang=en>

<https://www.trimble.com/>

<https://www.yellowscan-lidar.com/>

<http://geo-spatial.org/>

http://www.doctorat.tuiasi.ro/doc/SUSTINERI_TEZE/HGIM/Loghin/REZUMAT_Teza_Doctorat_Ana-Maria_Loghin_TUIASI.pdf

<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/hydrodynamic-model>