

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumat



Conducători de doctorat:

Prof. univ. dr. ing. Constantin MOLDOVEANU

Prof. univ. dr. ing. Radu DROBOT

Doctorand:

Ing. Elena-Andreea SAVU

București

2021

CUPRINS

PREFAȚĂ.....	IV
CAPITOLUL 1. ASPECTE INTRODUCATIVE	1
1.1. Rolul Dunării în istoria poporului român	1
1.2. Problema navigației pe Dunăre în prezent.....	3
1.3. Scopul și obiectivele cercetării în contextul științific actual	7
CAPITOLUL 2. SCR FOLOSITE PE SECTORUL COMUN DE DUNĂRE DINTRE ROMÂNIA ȘI BULGARIA.....	8
2.1. Noțiuni generale privind sistemele de coordonate de referință	8
2.2. Sistemul național de referință și coordonate S42 și legătura cu ETRS89	9
2.3. Sistemul Geodezic Bulgar 2005 (BGS 2005).....	10
2.4. Sisteme de referință pentru altitudini	10
CAPITOLUL 3. INFRASTRUCTURA GEODEZICĂ DIN ZONA DE FRONTIERĂ ROMÂNIA-BULGARIA	13
3.1. Rețele geodezice	13
3.2. Probleme de infrastructură geodezică pe sectorul comun de Dunăre dintre România și Bulgaria	13
3.3. Tipuri de măsurători geodezice executate în vederea modelării transportului sedimentar pe Dunăre.....	14
CAPITOLUL 4. ASPECTE TEORETICE PRIVIND TRANSPORTUL SEDIMENTAR PE DUNĂRE	15
4.1. Modelarea hidraulică - premisa pentru crearea de modele ale curgerii și transportului de sedimente.....	15
4.2. Mecanismul transportului aluvionar.....	17
CAPITOLUL 5. MODELAREA TRANSPORTULUI SEDIMENTAR PE DUNĂRE. STUDIU DE CAZ – SECTORUL DUNĂREAN BECHET-CORABIA	19
5.1. Introducere.....	19
5.2. Arealul de studiu	20
5.3. Date necesare construirii modelului matematic.....	21
5.4. Constituirea bazei de date geospațiale.....	27
5.5. Programe de specialitate utilizate	28
5.6. Construirea modelului de transport sedimentar pe sectorul dunărean Bechet-Corabia.....	29
5.7. Calibrarea și validarea modelului de transport sedimentar.....	37
CAPITOLUL 6. CONCLUZII, CONTRIBUȚII, PERSPECTIVE	41
6.1. Concluzii	41
6.2. Contribuții personale	43
6.3. Perspective.....	44
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....	45

PREFAȚĂ

În zilele noastre, Dunărea, și în special navigația pe Dunăre, joacă un rol strategic în rețeaua pan-europeană de transport, conectând un număr de cincisprezece țări prin intermediul căii sale navigabile.

România, prin Regia Autonomă “Administrația Fluvială a Dunării de Jos Galați” (AFDJ Galați), este responsabilă de întreținerea celui mai lung sector dunărean de cale navigabilă (1075 km).

În perioadele cu niveluri scăzute, din cauza dinamicii sedimentelor și a complexității regimului hidrologic al fluviului, navigația pe Dunăre se desfășoară cu dificultate, în special în aval de Sistemul Hidroenergetic și de Navigație Porțile de Fier II, unde se găsesc mai multe puncte critice pentru navigație. Aceste puncte critice necesită o monitorizare atentă, printr-o serie de măsurători topo-batimetrice interconectate într-un sistem geodezic unitar, care să respecte standardele europene și internaționale actuale.

Teza de doctorat intitulată „**Contribuții privind utilizarea măsurătorilor geodezice în vederea modelării transportului sedimentar pe Dunăre**” constituie un demers științific care tratează problematica modelării transportului sedimentar pe Dunăre, atât din punct de vedere teoretic, cât și practic, prin construirea, calibrarea și validarea unui model matematic al curgerii și transportului de sedimente. Volumul impresionant de date geodezice și hidrografice necesare modelării hidro-sedimentare a fost colectat în cadrul mai multor campanii de măsurători în teren, în timp ce datele hidrologice au fost furnizate de către Institutul Național de Hidrologie și Gospodărire a Apelor.

Din punct de vedere al conținutului, studiul este structurat în șase capitole, în care se regăsesc 155 de figuri și 17 tabele.

Primul capitol, denumit *Aspecte introductive*, reliefează importanța fluviului Dunărea în istoria poporului nostru, punând accent pe problemele de navigație întâmpinate pe Dunăre încă de pe vremea romanilor și până în prezent. Ultima parte a acestui capitol este dedicată scopului și obiectivelor cercetării.

Al doilea capitol tratează pe larg *Sistemele de coordonate de referință folosite pe sectorul comun de Dunăre dintre România și Bulgaria*, acolo unde se înregistrează cele mai mari probleme de navigație, și prezintă istoricul sistemelor de referință altimetrică utilizate pe sectorul românesc al fluviului.

Capitolul al treilea, intitulat *Infrastructura geodezică din zona de frontieră România-Bulgaria*, se focusează asupra rețelelor geodezice naționale din cele două state riverane Dunării, cu trecerea în revistă a proiectelor de cercetare relevante pentru rezolvarea mai multor probleme de infrastructură geodezică pe sectorul dunărean comun dintre România și Bulgaria, și se încheie cu prezentarea tipurilor de măsurători geodezice executate în vederea modelării transportului sedimentar.

Pornind de la elemente de dinamică și hidrometrie fluvială, continuând cu principiile modelării hidraulice, descrierea mecanismul transportului aluvionar și terminând cu măsurarea

și prelucrarea debitelor solide, **capitolul al patrulea** sintetizează principalele *Aspecte teoretice privind transportul sedimentar pe Dunăre*.

Capitolul al cincilea cuprinde studiul de caz, și anume *Modelarea transportului sedimentar pe sectorul dunărean Bechet-Corabia*. În acest capitol sunt detaliați toți pașii urmați pentru construirea, calibrarea și validarea modelului hidro-sedimentar al sectorului analizat.

Ultimul capitol, denumit *Concluzii, contribuții, perspective*, însumează concluziile care se desprind din studiul efectuat, contribuțiile personale ale autoarei, precum și perspectivele de cercetare relevante pentru studii viitoare.

* * *

La finalul celor trei ani de studii doctorale, aș dori să le mulțumesc tuturor celor care au făcut parte din această etapă importantă a vieții mele.

Adresez sincere mulțumiri domnilor profesori coordonatori, prof. univ. dr. ing. Constantin Moldoveanu și prof. univ. dr. ing. Radu Drobot, pentru răbdarea, profesionalismul și meticulozitatea cu care m-au îndrumat pe tot parcursul activității de cercetare. Procesul nu ar fi fost complet fără sfaturile, observațiile și cuvintele de încurajare primite în ultimii ani, acestea contribuind la evoluția mea profesională și personală.

Aș dori să-mi exprim respectul și recunoștința față de membrii comisiei de îndrumare, s.l. univ. dr. ing. Valentin Danciu și conf. univ. dr. ing. Tiberiu Rus, pentru sprijinul profesional și moral oferit în ultimii zece ani. Totodată, aș dori să mulțumesc întregii comisii de îndrumare pentru suportul oferit.

Aduc mulțumiri deosebite domnului președinte al comisiei de doctorat, prof. univ. dr. ing. Ioan Bica, precum și distinșilor referenți oficiali, prof. univ. dr. ing. Ichinur Omer, prof. univ. dr. ing. Cornel Păunescu și conf. univ. dr. ing. Tiberiu Rus, pentru răbdarea de a analiza prezenta lucrare.

Obținerea datelor necesare studiului nu ar fi fost posibilă fără amabilitatea AFDJ Galați, iar pe această cale țin să le mulțumesc domnilor Romeo Soare și Claudiu Duțu pentru generozitatea și atitudinea deschisă de care au dat dovadă întotdeauna.

Un rol deosebit în dezvoltarea mea profesională a avut-o activitatea desfășurată în cadrul Institutului Național de Hidrologie și Gospodărire a Apelor (INHGA). Le mulțumesc în special colegilor mei din cadrul Serviciului GIS, cei mai buni colegi pe care îi puteam avea, pentru că au fost mereu alături de mine, doamnei dr. Mary-Jeanne Adler pentru susținerea acordată, precum și colegilor din colectivele SSCHS și SHE, pentru discuțiile purtate, recomandările și încurajările oferite pe parcursul elaborării tezei. Domnului director științific dr. Viorel Chendeș îi mulțumesc pentru încrederea pe care o are în mine, pentru înțelegerea deplină de care am beneficiat în toată această perioadă, dar și pentru altruismul cu care a reușit să mă învețe o parte din tainele GIS-ului.

De asemenea, aș dori să le mulțumesc doamnei s.l. univ. dr. ing. Maria Chevereșan și colegului drd. ing. Mihai Stancu pentru împărtășirea cunoștințelor și răbdarea de a mă îndruma în domeniul modelării hidro-sedimentare, precum și pentru licența de MIKE 21 pusă la dispoziție.

Mulțumesc în egală măsură membrilor Departamentului de Geodezie și Fotogrammetrie, precum și întregului colectiv al Facultății de Geodezie din cadrul UTCB, întrucât au pus bazele formării mele profesionale.

Colegilor și prietenilor mei „geo-spațiali” le mulțumesc pentru că au fost mereu o sursă de inspirație.

Ultimele rânduri le dedic familiei, prietenilor și persoanei iubite, care mi-au fost totdeauna alături și m-au sprijinit necondiționat. Nu de puține ori m-au impulsionat să am încredere în puterile mele, iar în cele mai grele momente m-au înconjurat cu afecțiunea și înțelegerea lor. Fără ei nu aș fi devenit omul care sunt astăzi.

CAPITOLUL 1

ASPECTE INTRODUCTIVE

1.1. Rolul Dunării în istoria poporului român

Cunoscută încă din scrierile antice sub denumiri precum *Istru*¹ sau *Danubius*² și transformată de romani în axă de comunicații între centrul Europei și Pontul Euxin (*Figura 1*), Dunărea a avut un rol decisiv în evoluția istorică a poporului român. „De Dunăre - ca și de Carpați - se leagă întreaga viață a poporului nostru”, considera naturalistul Grigore Antipa (1921).

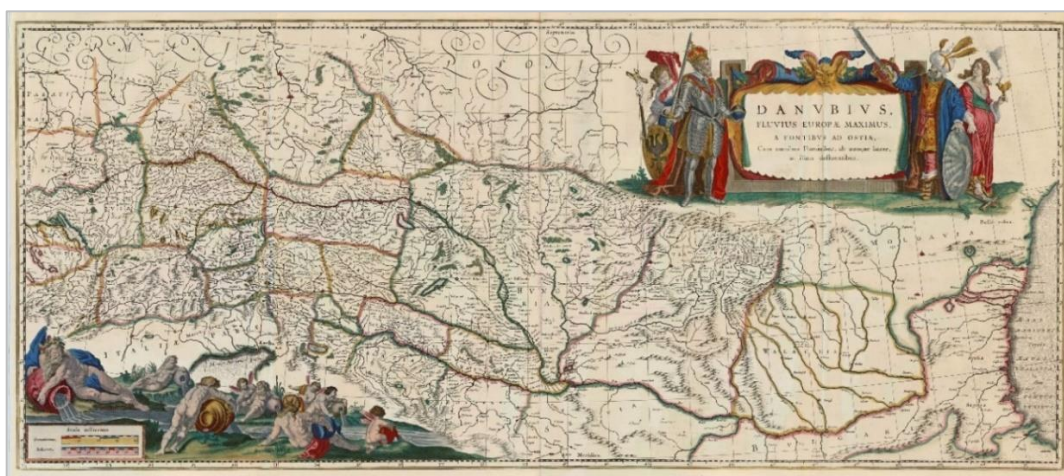


Figura 1. Hartă veche a fluviului Dunărea, 1649

Sursa: Joan Blaeu – “*Danubius, Fluvius Europae Maximus, a Fontibus ad Ostia*”, 1649

Subiect de dispută între diverse puteri europene, marele fluviu era perceput drept „o poartă deschisă către umanitate”, prin care spațiul românesc a avut privilegiul de a fi integrat în permanență „unui cadru internațional economic, dar și geopolitic” (Berindei, 1997).

După secole întregi de dominație otomană, în secolul al XIX-lea, „problema Dunării” însemna de fapt rivalitatea dintre Imperiul Austriac și Imperiul Rus pentru dominația gurilor fluviului. Pe de-o parte, Dunărea reprezenta un instrument valoros pentru Rusia în încercarea de a controla Balcanii, iar pe de altă parte, Dunărea Inferioară se afla în zona de expansiune a monarhiei habsburgice spre Orient.

Nici comercianții francezi sau britanici nu au ocolit bazinul dunărean-pontic, considerându-l o atractivă piață de desfacere pentru produsele occidentale.

¹ Istru - numele geto-grec al Dunării, în special al cursului său inferior (sursa: *Dicționarul explicativ al limbii române*, Ed. 2016).

² Danubius (*Zeul fluviilor*) - denumirea atribuită în special cursului superior și mijlociu al Dunării de către romani, preluată și de alte popoare și modificată, devenind *Donau* în limba germană, *Dunaj* în limba slovacă, *Duna* în limba maghiară, *Dunav* în limba croată, *Danube* în limba engleză și limba franceză, *Tuna* în limba turcă (sursa: wikipedia.org).

Asemenea Mării Negre, care era considerată o prelungire a Mării Mediterane către bogatele regiuni orientale, Dunărea lega interiorul continentului de Mediterană și Pontul Euxin (Figura 2).

Pentru locuitorii din preajma sa, Dunărea a reprezentat „nu doar o cale de transport și comunicație, ci și o sursă de hrană și un loc favorabil habitatului”, potrivit (Bărbăntan, 2010).



Figura 2. Harta Dunării, Austria, 1840

Sursa: William Hughes - "The Danube, from it's Source to the Black Sea with the adjacent Countries", 1840

Cele mai frumoase pagini din istoria noastră diplomatică și politică au fost scrise atunci când oamenii politici ai acelor vremuri „s-au opus și au apărut drepturile noastre pe fluviu cu energie și tenacitate” (Botez, 1919), conștienți fiind de valoarea sa geostrategică și comercială.

„Cea mai mare dintre avuțiile naturale ale țării noastre este, fără îndoială, Dunărea: și aceasta, chiar dacă nu am considera-o decât sub aspectul ei de arteră mondială de navigație și comerț. Stăpâni pe gurile ei, care sunt poarta Europei către Orient și poarta Orientului către inima Europei, stăpâni pe 36% din suprafața ei navigabilă, cu toate apele curgătoare care se varsă pe toată această lungime într-însa, stăpâni pe toate acestea, noi posedăm astfel cea mai mare comoară cu care natura darnică a putut înzestra o țară. Precum Nilul a făcut Egiptul, putem zice și noi că Dunărea a creat importanța politică și economică a României”, aprecia reputatul om politic Alexandru Lahovary (1881).

În concluzie, interesele politice și economice erau mari, iar „cine ținea în mâinile sale gurile fluviului era stăpân pe Dunăre” (Marx & Engles, 1959).

1.2. Problema navigației pe Dunăre în prezent

Al doilea fluviu din Europa ca lungime și debit, după Volga, cu o suprafață a bazinului hidrografic de 817.000 km² (Figura 3), Dunărea se caracterizează printr-un regim hidrologic deosebit de complex: după ce parcurge un traseu de 2857 km pe teritoriul a zece țări (Germania, Austria, Slovacia, Ungaria, Croația, Serbia, România, Bulgaria, Republica Moldova, Ucraina), primind în plus afluenți din alte șase țări europene, Dunărea aduce, la vărsarea în Marea Neagră, un debit mediu multianual de 6500 m³/s și aproximativ 79 mil. tone de aluviuni anual.



Figura 3. Bazinul hidrografic al fluviului Dunăre

Dintr-un total de 2415 km navigabili, România, prin Regia Autonomă Administrația Fluvială a Dunării de Jos Galați (AFDJ Galați), se ocupă de administrarea celui mai lung sector dunărean de cale navigabilă, desfășurat pe o distanță de 1075 km, de la Baziaș și până la Sulina, stabilind granița cu Serbia (pe o distanță de 235.5 km), Bulgaria (469.5 km), Republica Moldova (0.6 km) și Ucraina (53.9 km).

Pe întregul sector românesc al Dunării, AFDJ Galați este autoritatea de cale navigabilă responsabilă pentru asigurarea condițiilor minime de navigație, recomandate de Comisia Dunării. Deși se execută periodic activități de întreținere, constând în măsurători topobatimetrice și hidrologice, semnalizarea șenalului și lucrări de dragaj, acestea sunt eficiente doar o scurtă perioadă de timp. Conform (Egis, 2015), din albia Dunării Inferioare este dragat anual un volum de sedimente care variază în medie între 1,5 și 3,5 Mm³/an.

Din cauza caracteristicilor și dinamicii morfologiei albiei fluviului, cele mai mari probleme de navigație se înregistrează pe sectorul comun româno-bulgar.

Pentru dezvoltarea unor soluții tehnice complexe care să conducă la îmbunătățirea condițiilor de navigație pe Dunăre și, totodată, să aibă un impact minim asupra mediului, 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 Romano-Bulgar al Dunării și studii complementare” (propus inițial în anul 2007). Acesta se referă la sectorul de Dunăre situat aval de barajul Porțile de Fier II, de la km 845.5, și până la Silistra, la km 375 (Figura 4).

O parte dintre măsurătorile efectuate în cadrul proiectului FAST DANUBE au stat la baza realizării prezentei lucrări de cercetare.

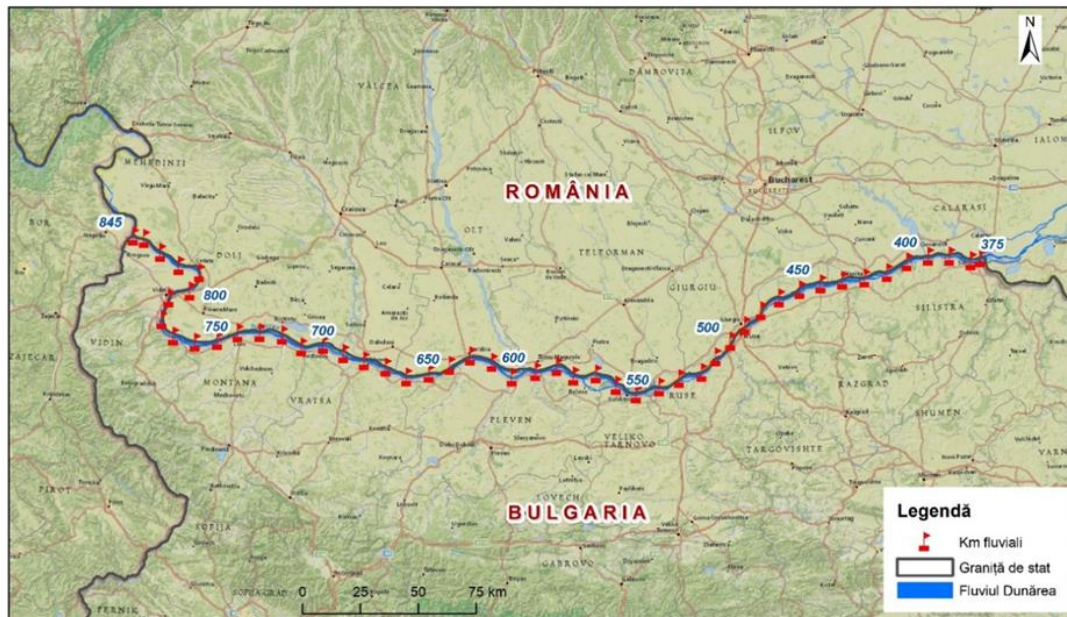


Figura 4. Arealul de studiu în proiectul FAST DANUBE

Sectorul comun de Dunăre dintre România și Bulgaria face parte din sectorul Dunării de Jos, se caracterizează printr-o curgere liberă și este influențat de modul de gestionare a apei din lacurile de acumulare ale Sistemului Hidroenergetic Porțile de Fier.

De-a lungul timpului, variațiile mari ale debitelor și nivelurilor Dunării, dublate de modificările importante ale morfologiei albiei datorate proceselor de eroziune, depunere și transport de sedimente, au determinat apariția unor **puncte critice** pentru navigație, prezentate în Figura 5.

În perioadele secetoase, corespunzătoare unui debit mai mic de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$, adâncimile minime nu mai sunt asigurate, ceea ce conduce la blocarea în port a navelor destinate transportului de marfă și, de multe ori, la desfacerea convoaielor. Astfel, mărfurile ajung la destinație cu întârzieri chiar și de două săptămâni, problemele de navigație cuantificându-se în timp pierdut și costuri suplimentare pentru transportatori.

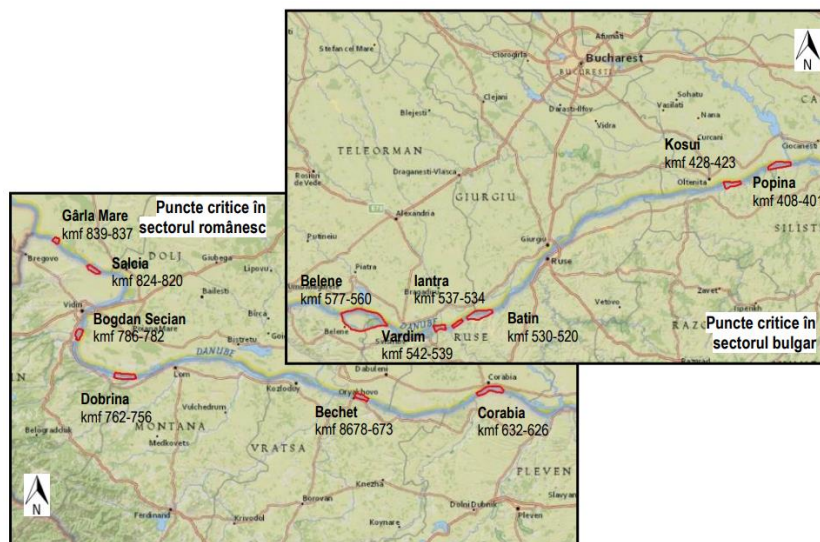


Figura 5. Amplasarea celor 12 puncte critice în sectorul românesc și în sectorul bulgăresc

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

Din datele statistice avute la dispoziție, reiese faptul că numărul mediu de zile în care erau asigurate condițiile de navigație înaintea lansării proiectului era de 280 zile/an. Obiectivul FAST DANUBE este de a crește numărul de zile în care navigația se desfășoară în condiții optime la aproximativ 340 zile/an.

În 2011, odată cu finalizarea unui studiu de fezabilitate necesar demarării FAST DANUBE, în sectorul fluvial aval de Porțile de Fier II, în secțiunea comună româno-bulgară cuprinsă între km 845.5 – km 375, au fost identificate **12 puncte critice pentru navigație** (Tabelul 1), repartizate în cinci zone critice, care necesită o monitorizare atentă, printr-o serie de măsurători topo-batimetrice.

Tabelul 1. Puncte critice pentru navigație

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

Ca urmare a studiului de fezabilitate efectuat, recomandarea Comisiei Dunării pentru sectorul româno-bulgar prevede o lățime a șenalului de 180 m, cu o adâncime minimă de 2.5 m și o rază minimă de curbură de 1000 m. Pentru zonele în care adâncimile minime nu sunt menținute (Figura 6), s-a propus reducerea lățimii șenalului până la 150 m.

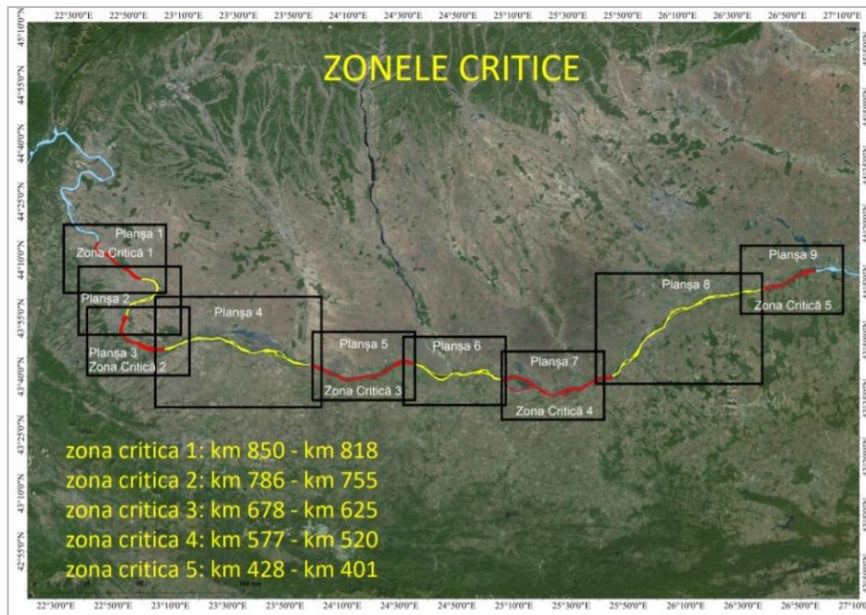


Figura 6. Amplasarea celor cinci zone critice în sectorul românesc și în sectorul bulgăresc

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

Cele **cinci zone critice pentru navigație** au fost stabilite conform Tabelului 2, ele cuprinzând minim două puncte critice.

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

Desfășurarea navigației în condiții optime este vitală pentru creșterea siguranței traficului de mărfuri, având în vedere poziția strategică a Dunării, ca parte a Magistralei Transeuropene de Navigație Rin – Main – Dunăre. Aceasta străbate în diagonală întregul continent și leagă Marea Nordului de Marea Neagră (prin intermediul canalului Rin-Main-Dunăre și a canalului Dunăre-Marea Neagră), incluzând toate porturile fluviale până la portul Constanța. Din cauza problemelor de navigație, volumele de marfă transportate pe Dunăre reprezintă doar 10-20% din cele transportate pe Rin.

Pentru ca transportul pe fluviul Dunărea să devină mai competitiv în raport cu transportul rutier, feroviar sau aerian, sunt esențiale menținerea traficului de nave în perioadele cu niveluri scăzute ale fluviului și reducerea costurilor de întreținere a șenalului navigabil.

În concluzie, elaborarea unor soluții tehnice pentru a ajunge la parametrii recomandați pentru șenalul navigabil (adâncime, lățime, rază de curbura), chiar și în contextul unor niveluri scăzute, depinde de înțelegerea comportamentului fluviului, în special pe sectoarele critice, unde modelarea transportului de sedimente este esențială.

1.3. Scopul și obiectivele cercetării în contextul științific actual

Problematica modelării transportului sedimentar pe Dunăre și îmbunătățirea, în general, a proceselor de întreținere a căii navigabile reprezintă în continuare un subiect de **actualitate**, care nu a fost epuizat prin programele și proiectele de cercetare desfășurate în trecut.

Scopul principal al acestei lucrări constă în elaborarea unui model complex hidraulic și de transport de sedimente al sectorului dunărean Bechet-Corabia, utilizând diversele tipuri de măsurători geodezice pentru determinarea elementelor necesare.

Înțelegerea proceselor morfologice ale unui râu sau fluviu în contextul modelării hidrodinamice, precum și modelarea transportului de sedimente constituie o sarcină deosebit de dificilă, care necesită o cantitate imensă de date colectate în campanii de teren și cunoștințe interdisciplinare, subiectul propus situându-se la granița dintre geodezie, hidrologie și hidraulică.

Astfel, scopului amintit în rândurile de mai sus i se subordonează o serie de **obiective**:

- I. Expunerea noțiunilor teoretice aflate la baza procesului de interconectare a lucrărilor topo-hidrografice efectuate pe fluviul Dunărea într-un sistem geodezic unitar, aliniat standardelor europene și internaționale actuale;
- II. Prezentarea infrastructurii geodezice din zona de frontieră România-Bulgaria și evidențierea rolului său în activitățile desfășurate pentru menținerea condițiilor de navigabilitate pe Dunăre;
- III. Trecerea în revistă a tipurilor de măsurători geodezice executate în vederea modelării transportului sedimentar pe Dunăre, precum și a echipamentelor folosite pentru achiziționarea datelor topo-geodezice;
- IV. Prezentarea conceptului de „modelare hidraulică” și descrierea mecanismului transportului aluvionar;
- V. Evaluarea zonei de interes (*Zona critică 3 – Bechet-Corabia*) și generarea modelului digital al acesteia;
- VI. Crearea unei baze de date geospațiale, precum și identificarea unei baze de date cartografice existente în diferite biblioteci și arhive, care să permită analiza modificărilor morfologice ale albiei Dunării pe sectorul studiat;
- VII. Utilizarea tehnicilor GIS pentru vizualizarea și prelucrarea datelor geospațiale de intrare în modelul matematic, dar și pentru transpunerea spațială în hărți a rezultatelor obținute cu ajutorul soft-ului de modelare hidraulică (MIKE 21);
- VIII. Prezentarea detaliată a etapelor necesare realizării modelului hidro-sedimentar;
- IX. Analiza zonelor cu depuneri/eroziuni obținute în urma simulării transportului sedimentar pe baza modelului elaborat;
- X. Evidențierea posibilelor surse de erori care pot influența rezultatele finale și formularea concluziilor cercetării.

Rezultatele acestui studiu se doresc a fi utile pentru viitoare cercetări științifice, iar din punct de vedere practic constituie baza pentru identificarea unor măsuri care să contribuie la stabilizarea patului albiei fluviului Dunărea (pe sectorul românesc).

CAPITOLUL 2

SISTEME DE COORDONATE DE REFERINȚĂ FOLOSITE PE SECTORUL COMUN DE DUNĂRE DINTRE ROMÂNIA ȘI BULGARIA

2.1. Noțiuni generale privind sistemele de coordonate de referință

Un sistem de coordonate de referință (SCR) este alcătuit din două componente: datum și sistem de coordonate (*Figura 7*). Datumul constituie partea fizică a unui SCR, iar sistemul de coordonate partea matematică.

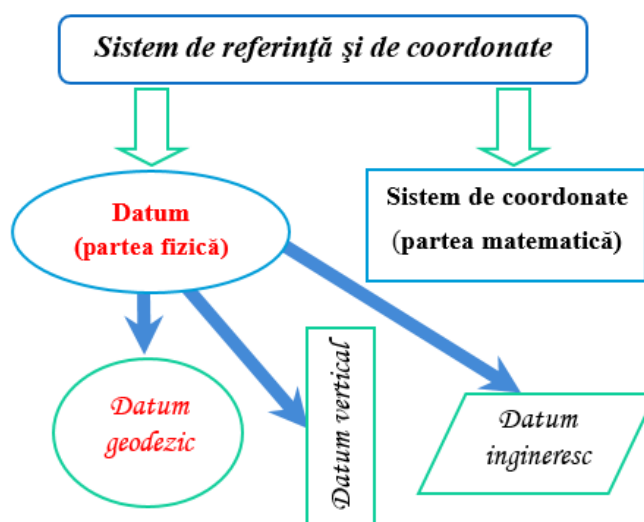


Figura 7. Componentele unui Sistem de Referință și de Coordonate

La nivel mondial, există o varietate de SCR prin care poziția geografică poate fi descrisă matematic cu ajutorul coordonatelor, însă primește valori ale acestora proprii fiecărui sistem. De aceea, în cazul sistemelor de coordonate de referință este obligatoriu ca toate coordonatele să fie certificate de unități de măsură și însoțite de o identificare *fără ambiguități* a sistemului în care sunt exprimate.

Indiferent de spațiul în care se desfășoară, activitatea geodezică are ca scop final determinarea poziției care, așa cum a fost amintit, este dată de un set de coordonate. În general, este vorba despre determinarea coordonatelor geodezice latitudine și longitudine (B, L) și a altitudinii (H) a unor puncte de pe suprafața terestră. Această activitate constă în principal din efectuarea unor măsurători de direcții unghiulare, distanțe, diferențe de nivel, observații efectuate cu ajutorul sateliților artificiali ai Pământului etc. și a unor calcule necesare obținerii coordonatelor (Rus, 2018).

De regulă, pentru fiecare țară de pe glob a fost definit cel puțin un datum, cum de altfel fiecare țară a adoptat cel puțin un sistem de proiecție pentru reprezentarea suprafeței terestre, precum și un datum vertical.

În ipoteza în care se lucrează cu date exprimate în două sau mai multe SCR, cum este și cazul sectorului comun de Dunăre dintre România și Bulgaria, este necesară cunoașterea parametrilor și algoritmilor de transformare care leagă sistemele respective, deși, pentru simplificarea calculelor, soluția ideală o reprezintă adoptarea unui SCR comun.

Din dorința de a oferi o imagine cât mai clară cu privire la sistemele de coordonate de referință utilizate pe sectorul dunărean româno-bulgar, mai întâi se impune definirea noțiunilor de *datum*, *datum vertical*, *sistem de coordonate*, *sistem de referință*, pentru a evita orice confuzie în legătură cu acestea.

2.2. Sistemul național de referință și coordonate S42 și legătura cu ETRS89

Pe teritoriul României, SCR utilizat în prezent este Sistemul S42, care are la bază elipsoidul Krasovski 1940 (cu punctul astronomic fundamental Pulkovo), iar sistemul de coordonate este definit în planul de proiecție Stereografic 1970.

La nivel european și global, cooperarea în domeniul geodeziei și cartografiei este vitală. Pe fondul dezavantajelor actuale ale S42 și perspectivelor deschise de determinările de poziție cu ajutorul sateliților artificiali, s-a considerat benefică adoptarea și în țara noastră a Sistemului de Referință și Coordonate ETRS89, pentru o gamă largă de lucrări din diferite domenii de activitate.

Pentru a realiza legătura dintre ETRS89 și S42, este necesară efectuarea unei transformări compuse de coordonate (definită conform standardelor ISO), de la sistemul de coordonate definit în ETRS89, la sistemul de coordonate Stereo '70 definit în S42 și sistemul de altitudini normale Marea Neagră 1975, legat de S42 prin anomalii cvasigeoidului.

Această transformare compusă de coordonate a fost implementată în programul de calcul TransDatRO. Aplicația se bazează pe un algoritm prezentat în mod schematic în *Figura 8* și are înglobat un model de cvasigeoid național determinat prin constrângerea modelului european EGG97, insuficient de precis pentru nevoile geodezice din țara noastră.

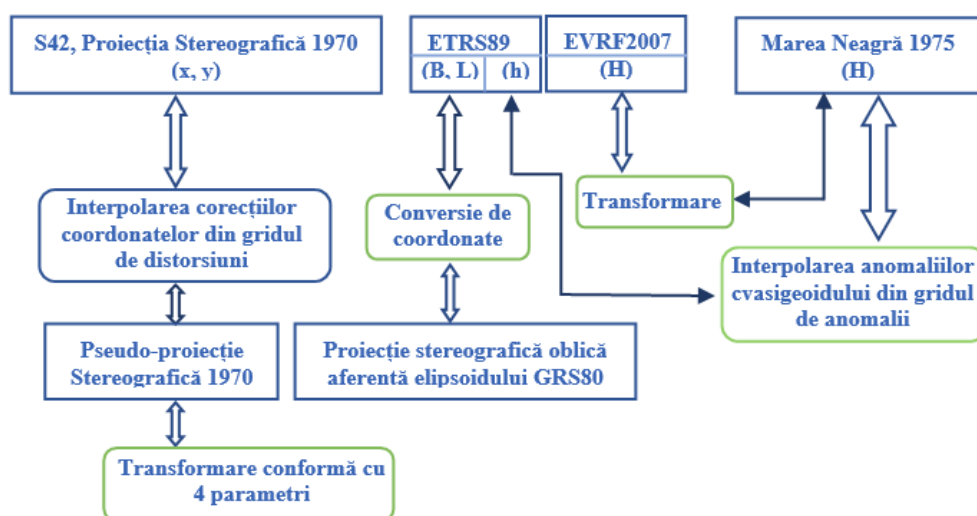


Figura 8. Legătura dintre ETRS89, EVRF2007 și sistemul geodezic de referință local S42, Sistem de altitudini Marea Neagră 1975

Sursa: (ANCPI, 2010)

2.3. Sistemul Geodezic Bulgar 2005 (BGS 2005)

Sistemul Geodezic Bulgar se aplică pe teritoriul Republicii Bulgaria sub denumirea de „**Sistemul Geodezic Bulgar 2005**” (**Bulgarian Geodetic System 2005 - BGS 2005**), unde „2005” reprezintă un indice care arată „epoca” în care coordonatele punctelor rețelei geodezice au fost stabilite în conformitate cu Ordonanța nr. 2 din 30 iulie 2010 privind definirea, implementarea și întreținerea Sistemului Geodezic Bulgar. Aceasta este implementată prin crearea și întreținerea punctelor geodezice, care sunt distribuite uniform pe întreg teritoriul Republicii Bulgaria și care constituie baza datumurilor geodezice unificate (Rus, 2018).

Pe teritoriul Republicii Bulgaria, punctele datumurilor geodezice unificate sunt determinate prin efectuarea unor măsurători de înaltă precizie (satelitare, geodezice, gravimetrice, astronomice și geomagnetice) și prin utilizarea datelor de la stațiile GNSS permanente. Aceste puncte sunt grupate în mai multe rețele geodezice: *Rețeaua națională geodezică*, *Rețeaua națională de nivelment*, *Rețeaua națională gravimetrică*, *Rețeaua de maregrafe*, *Rețeaua de stații magnetice*.

Sistemul Geodezic Bulgar 2005 include (Rus, 2018):

- ✓ parametrii geodezici fundamentali calculați în conformitate cu Sistemul Geodezic de Referință 1980 (GRS80);
- ✓ sistemul de coordonate geodezic ETRS89, epoca 2005.0;
- ✓ sistem altimetric implementat prin reperele de nivelment ale Rețelei Naționale de Nivelment incluse în Rețeaua Europeană Unificată de Nivelment (UELN) și definite în Sistemul de Referință Vertical European (EVRS), prin utilizarea datelor despre forța gravitațională într-un sistem gravimetric unificat (IGSN 1971);
- ✓ proiecția cartografică Universal Transverse Mercator (UTM) și sistemul de coordonate rectangulare introdus prin aceasta, denumit "CS2005" (Cadastral System 2005).;
- ✓ diviziunea pe hărți și sistemul de nomenclatură bazat pe harta internațională a lumii, la o scară de 1: 1000000, așa cum a decis Congresul de Geografi din Londra, 1909.

2.4. Sisteme de referință pentru altitudini

Deoarece în trecut nu existau metode precise de determinare a geoidului, suprafața medie a mărilor și oceanelor a fost utilizată pentru a aproxima suprafața geoidului. Fiind vorba de o diferență de ordinul metrilor între cele două suprafețe, nivelul mediu al mărilor și oceanelor a părut a fi o alegere eficientă și ușor de folosit la realizarea planurilor și hărților. Fiecare țară a stabilit ca nivel mediu al mării o locație exactă: pentru Olanda – Amsterdam, pentru Grecia - Salonic, Anvers pentru Belgia, în Anglia, Ordnance Datum a fost determinat la Newlyn din înregistrările care se extind din mai 1915 până în aprilie 1921, în Franța suprafața de referință a fost determinată la Marsilia etc. (Imbroane, 2013).

Din cauza variațiilor în câmpul gravific al Pământului, „zero” la Marea Neagră nu coincide cu „zero” la Marea Mediterană, la Oceanul Atlantic sau alte mări și oceane ale planetei.

Necesitatea definirii sistemelor de referință altimetrică a apărut în a doua jumătate a secolului al XVIII-lea, când au început să se elaboreze hărți hidrografice cu batimetria mărilor și oceanelor și hărți topografice cu izolinii de nivel.

Un sistem de referință pentru altitudini este definit în mai mulți pași:

- alegerea unei suprafețe de referință;
- adoptarea unei definiții în sens fizic sau geometric care să descrie poziția punctelor de pe suprafața terestră față de suprafața de referință aleasă;
- precizarea unui punct „zero” fundamental considerat a fi nivelul mediu general al mărilor deschise și oceanelor, obținut prin observații îndelungate și la care se raportează toate lucrările de nivelment care folosesc datumul respectiv.

Deoarece nivelul mării suferă modificări permanente, datumul are o valabilitate temporară.

Sistemul de altitudini normale cu punct „zero” fundamental Marea Neagră 1975

În prezent, în România este adoptat Sistemul de altitudini normale cu punct „zero” fundamental Marea Neagră 1975 (ediția 1990), amplasat în Constanța.

De-a lungul timpului, în țara noastră au fost utilizate mai multe puncte „zero” fundamental: „zero” Marea Neagră Sulina, „zero” Marea Adriatică, „zero” Marea Baltică (folosit cel mai des). Legătura dintre aceste suprafețe de referință a constituit dintotdeauna o provocare atât pentru geodezi, cât și pentru specialiștii din domenii precum hidrologie, hidrotehnică sau geografie.

Punctul „zero” fundamental a fost considerat reperul fundamental de tip I - DTM din Capela Militară din Constanța, a cărui altitudine a fost determinată prin intermediul lucrărilor de nivelment geometric, care s-au repetat în anii 1962, 1963, 1964, 1970, 1972, și cu ajutorul determinărilor gravimetrice (Ghițău, 1983).

Pentru a scoate în evidență variația nivelului de referință, cât și pentru o stabilitate mai mare în timp a punctului fundamental, altitudinea absolută a fost transferată de pe malul mării la aproximativ 53 km N-NV de Constanța, între localitățile dobrogene Tariverde și Cogeaalac, într-o zonă cu sisturi verzi (zonă stabilă tectonic). Astfel, s-a construit „punctul fundamental al rețelei de nivelment”, iar conectarea acestuia cu maregrafele de la Marea Neagră s-a realizat printr-o rețea de poligoane de nivelment geometric de înaltă precizie, ce asigură legătura și cu maregrafele de la Varna și Burgas din Bulgaria.

Centrul Național de Geodezie, Cartografie, Fotogrammetrie și Teledetecție a efectuat noi măsurători în rețeaua națională de nivelment și, evident, o nouă prelucrare a rețelei. Întrucât precizia obținută a fost mai bună decât cea atinsă de DTM, a fost denumită rețea de ordinul „zero”. De asemenea, această rețea conține un număr mai mare de poligoane decât rețeaua de ordinul I realizată de DTM. Deoarece sistemul de altitudini a rămas același (Sistem normal de altitudini cu punct zero fundamental Marea Neagră 1975), dar s-au recalculat altitudinile și pentru reperele rețelelor de nivelment de ordin II, III și IV, această oficializare poartă numele de „**Ediția 1990**”.

Prin intermediul soft-ului TransDatRo, există posibilitatea transformării cotelor din sistemul național de referință (Sistemul de altitudini normale cu punct „zero” fundamental Marea Neagră 1975 - ediția 1990, amplasat în Constanța) în Sistemul de Referință Vertical European (EVRS), cu rezultate satisfăcătoare ($\pm 10-12$ cm) pentru zonele în care există model de cvasigeoid (gravimetric) determinat.

Sistemul de altitudini normale „Marea Baltică”

În mod similar cu definirea și implementarea sistemului de altitudini normale Marea Neagră 1975, în țările din Estul Europei (inclusiv România) s-a folosit sistemul de altitudini normale „Marea Baltică”, având drept punct fundamental sau zero la Marea Baltică – Kronstadt.

În prezent, o serie de țări din această zonă încă mai folosesc la nivel național acest sistem de altitudini sau noi realizări ale acestuia, inclusiv Bulgaria.

Conform Agenției de Cadastru, Cartografie și Geodezie a Bulgariei, din punct de vedere altimetric, în țara vecină se utilizează în prezent atât Sistemul de Altitudini Marea Baltică 1982, cât și Sistemul de Referință Vertical European (EVRS)/EVRF2007 (Amsterdam).

Diferența dintre înălțimile determinate în sistem Marea Baltică și sistem Marea Neagră, măsurată pentru punctul de referință din Varna, este de -24 cm (Rus, 2018).

Istoricul sistemelor de referință altimetrică utilizate pe sectorul românesc al Dunării și legătura dintre acestea

În ultimii 150 de ani, cu ajutorul mirelor hidrometrice s-a putut acumula un fond important de date veridice asupra regimului nivelului apei Dunării, Deltei și Mării Negre.

Pentru referențierea hărților cu curbe de nivel, în bazinul hidrografic al Dunării au fost adoptate trei sisteme de referință: Marea Adriatică, Marea Baltică și Marea Neagră. În sistemul hidrografic al Mării Negre există mai multe suprafețe de referință: Sulina, Constanța, Varna, Odesa, Sevastopol, Kerci, Poti, Batumi ș.a.

Pe teritoriul țării noastre, primele măsurători de nivel pe Dunăre s-au efectuat de către Austria la Orșova, în anul 1838, prin intermediul unei mire hidrometrice a cărei origine era referențiată altimetric la suprafața Mării Adriatice. A doua miră hidrometrică a fost instalată la Drencova, în anul 1854, având originea raportată tot la Marea Adriatică (INHGA, 2019).

Pentru o informare cât mai exactă în legătură cu originea și situația mirelor hidrometrice dispuse în lungul Dunării, au fost consultate jurnale ale stațiilor hidrometrice sau planuri de activitate întocmite de specialiștii INHGA, precum și diverse publicații naționale. La final, s-a constatat că originea mirelor hidrometrice amplasate pe sectorul românesc al Dunării este raportată atât la suprafața de referință „zero” Marea Neagră Sulina, cât și la suprafața „zero” Marea Baltică Kronstadt și parțial la suprafața de referință „zero” Marea Adriatică Trieste (mirele hidrometrice de la Baziaș, Moldova Veche, Drencova, Svinița, Orșova și Turnu Severin) (Comitetul de Stat al Apelor, 1965).

Aceast subcapitol prezintă istoricul utilizării principalelor sisteme de referință utilizate pe Dunăre și, mai mult, reprezintă o trecere în revistă a relațiilor de legătură dintre acestea. Deși au fost determinate în trecut, unele dintre ele au fost transpuse în format GIS, pentru a facilita transformările.

- *Legătura dintre suprafețele de referință Marea Neagră „Sulina” și Marea Neagră „Constanța”;*
- *Legătura dintre suprafețele de referință Marea Neagră „Constanța” și Marea Baltică „Kronstadt”*

CAPITOLUL 3

INFRASTRUCTURA GEODEZICĂ DIN ZONA DE FRONTIERĂ ROMÂNIA-BULGARIA

3.1. Rețele geodezice

Indiferent de tipul lucrării executate în domeniul geodeziei, se presupune existența unor puncte cu coordonate cunoscute pe care să se sprijine lucrarea respectivă. Totalitatea acestor puncte constituie o infrastructură cunoscută sub denumirea de **rețea geodezică**.

O rețea geodezică este formată din mulțimea punctelor situate pe suprafața pe care se desfășoară o lucrare, a căror poziție este cunoscută într-un sistem unitar de referință (Moldoveanu, 2002).

Poziționarea absolută sau relativă a acestor puncte a constituit dintotdeauna o problemă fundamentală a geodeziei, abordată în funcție de tipul rețelei, de destinația sa sau de mărimea zonei acoperite. În consecință, într-o rețea nu pot fi întâlnite toate tipurile posibile de măsurători (Moldoveanu, 2011).

Pentru atingerea acestui obiectiv, geodezia stabilește normele și metodologia necesare executării de măsurători și determinări de înaltă precizie care urmează a fi prelucrate în mod riguros, încât la final să rezulte poziționarea corectă a punctelor din punct de vedere planimetric, dar și altimetric. Astfel, poziția unui punct geodezic în spațiu se definește în raport cu două suprafețe distincte: pe de-o parte elipsoidul de referință, pentru coordonatele latitudine (B) și longitudine (L), sau planul de proiecție, pentru coordonatele x, y, iar pe de altă parte geoidul sau cvasigeoidul, pentru determinarea altitudinii (h), în funcție de sistemul adoptat oficial.

La momentul actual, tendințele sunt de omogenizare a coordonatelor spațiale tridimensionale, atât din punct de vedere al sistemului de coordonate, cât și al suprafeței (unice) de referință (de regulă, elipsoidul de referință).

În cadrul acestui subcapitol au fost prezentate:

-  *Rețeaua geodezică de stat a României;*
-  *Rețeaua geodezică de stat a Bulgariei;*
-  *Rețeaua Geodezică Națională Spațială a României;*
-  *Rețeaua Națională GNSS a Bulgariei.*

3.2. Probleme de infrastructură geodezică pe sectorul comun de Dunăre dintre România Și Bulgaria

Indiferent de numărul sistemelor altimetrice de referință utilizate în trecut, lipsa unei rețele de sprijin în lunca Dunării și în zonele adiacente acestora a făcut imposibilă, ani la rând, achiziția de date pe sectorul dunărean românesc într-un sistem unitar. Mai mult, de-a lungul întregului fluviu Dunărea coexistau nu doar mai multe sisteme altimetrice de referință (Marea

Neagră Sulina, Constanța, Varna, Odessa, Marea Baltică, Marea Adriatică), ci și mai multe sisteme de proiecție și mai mulți elipsoizi de referință.

Toate aceste probleme au condus la necesitatea realizării unui sistem adecvat pentru efectuarea măsurătorilor pe toată lungimea Dunării, în acord cu cerințele europene de transport pe coridorul VII (Dunărea, inclusiv pe Canalul Dunăre-Marea Neagră), la nivelul standardelor adoptate pe plan european și internațional: IHO S-44, S-57, 7008/1996 etc.

În acest scop, printr-un proiect al AFDJ Galați finalizat în anul 2015, a fost proiectată și materializată o rețea de puncte (144) de-a lungul sectorului românesc al Dunării (la aproximativ 15 kilometri unul față de celălalt), denumită „**AFDJ2014**”, pentru care s-au determinat altitudinile în sistemul național (precizat anterior), cu posibilitatea de a face transformarea în sistemul european de altitudini, dar și în sistemul de altitudini utilizat în Bulgaria.

Rețeaua de bază pentru lucrările hidrografice este alcătuită din borne și mire uzate fizic. Majoritatea mirelor sunt de tip înclinat, amplasate pe taluzurile malurilor albiei și sunt alcătuite din plăci de metal sub forma unor rigle gradate în centimetri. În condițiile în care cotele absolute ale „zero”-urilor mirelor hidrometrice de pe Dunăre diferă între ele în funcție de suprafața de referință la care s-au raportat, nici determinările cotelor suprafeței libere a apei nu puteau fi realizate în același sistem altimetric. Această problemă a fost parțial rezolvată printr-un proiect al Ministerului Mediului, Apelor și Pădurilor intitulat „**Danube WATER Integrated Management**”, încheiat tot în 2015, prin care s-a stabilit un sistem de referință și coordonate comun pentru stațiile hidrometrice care monitorizează nivelul Dunării pe sectorul comun de Dunăre dintre România și Bulgaria. Totodată, pentru zona de studiu s-a determinat și poziția „zero” a mirelor hidrometrice de pe malurile Dunării în noul SCR.

Pentru îmbunătățirea și extinderea căilor navigabile, cât și pentru monitorizarea dinamicii albiei fluviului, era și este necesară interconectarea lucrărilor topo-hidrografice într-un sistem geodezic comun, și anume ETRS89 pentru planimetrie și EVRS/EVRF2019 pentru altimetrie. O soluție pentru respectarea acestor standarde europene și internaționale actuale a constat în realizarea unui model de cvasigeoid local pe sectorul comun de Dunăre dintre România și Bulgaria, urmată de determinarea parametrilor de transformare între sisteme geodezice de referință folosite pe sectorul comun româno-bulgar și furnizarea algoritmului de calcul și a parametrilor transformării, toate aceste obiective fiind atinse în cadrul proiectului **FAIRway Danube - „Implementarea Master Planului pentru Reabilitarea și întreținerea șenalului pe Dunăre”** (2015-2020).

3.3. Tipuri de măsurători geodezice executate în vederea modelării transportului sedimentar pe Dunăre

În domeniul geodeziei, a fost înregistrată o creștere a preciziei poziționării de aproximativ un ordin de mărime la fiecare deceniu, pornindu-se de la o precizie de aproximativ 1-10 metri la mijlocul anilor 1970, și ajungându-se până la aproximativ 1 milimetru în prezent.

Acest progres extraordinar se datorează nu numai inovațiilor tehnologice, ci și coordonării comunității științifice prin intermediul serviciilor geodezice globale. De asemenea, cercetarea științifică în acest domeniu a condus la îmbunătățiri semnificative ale exactității datelor geodezice.

Din punct de vedere tehnic, pentru efectuarea măsurătorilor geodezice pe fluviul Dunărea sau în lungul său, în momentul de față sunt utilizate atât metode și tehnici clasice de măsurare (triangulație, trilateratie, nivelment), cât și tehnologii spațiale și electronice extrem de avansate (GNSS, LiDAR etc.). La colectarea datelor trebuie să se țină cont de precizia solicitată, ea având un rol esențial la alegerea echipamentului și a metodelor de măsurare (Niemeier & Rohde, 1982).

Măsurătorile batimetrice pot fi privite ca o extindere în spațiul acvatic a măsurătorilor terestre și se află în interdependență cu acestea. Deosebirea este că, în majoritatea cazurilor, măsurătorile batimetrice se realizează utilizând o platformă mobilă (navă, șalupă, barcă), iar instrumentele și aparatura sunt adaptate condițiilor de lucru pe apă. Dintre acestea, au fost prezentate în cuprinsul lucrării:

- ✚ *Sonarul interferometric cu scanare laterală (Interferometric Side Scan Sonar);*
- ✚ *Ecosonda mono-fasciculară (Single Beam Echosounder);*
- ✚ *Sistemele multi-fasciculare (Multibeam Echosounder);*
- ✚ *Sistemul ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).*

CAPITOLUL 4

ASPECTE TEORETICE PRIVIND TRANSPORTUL SEDIMENTAR PE DUNĂRE

4.1. Modelarea hidraulică - premisa pentru crearea de modele ale curgerii și transportului de sedimente

În viziunea autorilor (Wang & Wu, 2004), procesele de sedimentare și modificările morfologice pe râuri sunt printre cele mai complexe și puțin înțelese fenomene din natură. Râurile transportă, odată cu masa de apă, cantități importante de materiale solide de diferite forme și dimensiuni.

„Prin spălarea suprafeței bazinelor și prin antrenarea din subteran de substanțe dizolvate, apa râurilor se încarcă cu particule solide și substanțe dizolvate” (Diaconu & Șerban, 1994).

Regimul hidrologic al râurilor și implicit al fluviului Dunărea este o rezultată a factorilor naturali (condițiile climatice, litologia, relieful, solul și învelișul vegetal) și antropici, care interferează în întregul bazin hidrografic (Mitof, 2016).

Potrivit (Bondar, 2010), în ultimul secol se observă o serie de modificări în regimul scurgerii apei și aluviunilor Dunării, ca urmare a influențelor naturale și antropice.

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 transportului de sedimente și a morfologiei albiilor.

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 (Cioc & Tatu, 1981).

O problemă fundamentală a 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 (Diaconu, et al., 1978).

Conform (Trofin, 1974), mișcarea cu suprafață liberă din albiile râurilor se poate clasifica în funcție de modul în care variază în timp și în spațiu parametrii hidraulici (debit, viteză, adâncime, pantă, suprafață și perimetru ud), așa cum se arată în *Figura 9*.

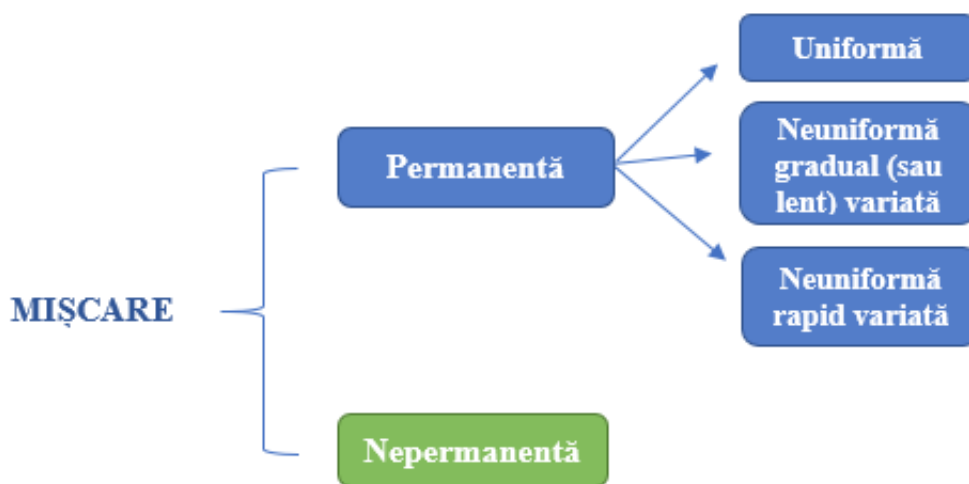


Figura 9. Clasificarea tipurilor de mișcare cu suprafață liberă

Tipul de curgere este influențat în mod direct de modificările suferite de albia râului.

În general, curgerea în albiile deschise are un caracter nepermanent, din cauza modului de alimentare a cursurilor de apă, dar și din cauza neuniformităților frecvente în albie.

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.

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 literatura de specialitate, ecuațiile fundamentale ale mișcării nepermanente în albiile 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:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0; \quad (4-1)$$

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot V)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 \right) + g \cdot A \cdot S_f = 0; \quad (4-2)$$

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:

$$Q = A \cdot V = Q(x, t) \quad (4-3)$$

Soluționarea exactă a sistemului de ecuații Saint-Venant (4-1), (4-2), în sensul obținerii valorilor necunoscute (variabilelor dependente) în toate punctele planului variabilelor independente este practic imposibilă.

4.2. Mecanismul transportului aluvionar

Aluviunile din patul și malurile cursurilor de apă se găsesc permanent sub acțiunea unui sistem foarte complex de antrenare și rezistență, în funcție de intensitatea cărora se realizează „starea generală de antrenare hidrodinamică”, ce include repausul, inițierea, dezvoltarea și stingerea transportului particulelor/maselor aluvionare (Ichim, et al., 1989).

Sistemul de forțe este constituit, în principal, de forța hidrodinamică de antrenare, care tinde să pună în mișcare particulele aluvionare, și forțele de rezistență, care se opun antrenării hidrodinamice, constituite din greutatea proprie submersă a particulelor (predominante în cazul aluviunilor necoezive), forțele de coeziune de natură fizico-chimice (predominante în cazul aluviunilor coezive) și forțele de contact dintre particulele necoezive, datorate întrepătrunderii și interacțiunii particulelor învecinate și aflate într-o stare mai slabă sau mai accentuată de încleștare.

Starea generală de antrenare hidrodinamică a aluviunilor este determinată de raportul stabilit în timp și spațiu dintre forțele de antrenare și cele de rezistență, sau de raportul momentelor celor două tipuri de forțe față de un centru de răsturnare/contact dintre particulele aluvionare. Când regimul curgerii fazei lichide determină atingerea unor valori subunitare ale raportului forțelor sau momentelor ce solicită particulele aluvionare, este realizată faza inițială a stării generale de antrenare, și anume starea de repaus, corespunzătoare condițiilor de echilibru stabil al particulelor. Când regimul curgerii fazei lichide determina creșterea intensității forței hidrodinamice de antrenare a particulelor până în jurul valorilor ce egalizează intensitatea forțelor de rezistență, astfel încât să rezulte valori aproximativ unitare pentru raportul forțelor sau momentelor care solicită particulele aluvionare, este atinsă starea critică de antrenare, corespunzătoare condițiilor de echilibru instabil al particulelor.

Această stare determină ușoare mișcări pulsatorii ale particulelor, care efectuează unele salturi locale, de lungime redusă, de ordinul lungimii particulelor, urmate de reșezarea lor pe suprafața patului albiei și de atingerea, din nou, a stării de echilibru instabil.

Odată atinsă starea critică de antrenare, creșterea intensității forței hidrodinamice de antrenare determină începutul mișcării particulelor aluvionare la nivelul patului albiei, situație caracterizată prin valori supraunitare ale raportului forțelor sau momentelor ce solicită particulele.

Această mișcare se dezvoltă, cel puțin în primele momente, prin alunecare sau rostogolire (când rezultanta celor două forțe formează un unghi negativ față de suprafața patului) sau prin efectuarea unor salturi după traiectorii curbilini de lungimi din ce în ce mai mari, în funcție de intensitatea antrenării (când rezultanta forțelor formează un unghi pozitiv cu suprafața patului). Mișcările sunt urmate de momente și perioade temporale în care particulele se reasează și se „odihnesc” pe suprafața patului, continuând apoi procesul de mișcare, în mod similar și cu antrenarea unui număr sporit de particule, pe măsura creșterii intensității forței hidrodinamice de antrenare.

Aceasta este forma de dezvoltare a **transportului aluvionar de fund**, definit ca transport de fază solidă ce se dezvoltă în imediata vecinătate a patului albiei de curgere și în care mișcarea particulelor aluvionare are loc prin alunecare, rostogolire și salt.

Faza incipientă a transportului aluvionar de fund o constituie transportul aluvionar prin „spălare”, care afectează în special cele mai fine particule, ce provin din eroziunea solului din bazinul de recepție al cursului de apă și care au, de regulă, diametre mult mai mici decât cele ale materialelor albiei și malurilor.

În situația în care regimul curgerii fazei lichide determină creșterea în continuare a intensității forței de antrenare, astfel încât să se ajungă la valori mult supraunitare pentru raportul forțelor sau momentelor care acționează particulele aluvionare, mișcarea prin salt a acestora se accentuează, lungimea și amplitudinea salturilor este mai mare, cu perioade prelungite de timp, pe durata cărora particulele părăsesc patul albiei și se mențin în stare suspensională în masa de lichid. Această menținere a particulelor în suspensie pe durate prelungite de timp este favorizată de intensitatea și de fluctuațiile turbulenței curgerii fazei lichide, a cărei creștere conduce, în final, la dezvoltarea **transportului aluvionar în suspensie**.

Sub această formă a transportului fazei solide sunt antrenate atât particulele aluvionare mai mari din patul albiei, cât și particulele mult mai fine, care sunt spălate, astfel, încât, practic, se produce un permanent schimb reciproc de fază solidă între masa de lichid încărcată aluvionar și masa aluvionară de la suprafața patului de curgere. Este evident faptul că transportul în suspensie se întrepătrunde cu cel de fund și cel realizat prin spălare.

Din cauza acestui mecanism fizic complex, nu este posibilă delimitarea clară între aceste modalități de dezvoltare a transportului aluvionar în albiile cursurilor de apă, motiv pentru care este preferată noțiunea, mai largă, de *transport aluvionar total*, dezvoltat pe întreaga adâncime de curgere și definit ca suma transportului aluvionar de fund și în suspensie.

Odată dezvoltat transportul aluvionar pe întreaga adâncime a albiei, regimul hidrologic și hidraulic al curgerii fazei lichide determină gradual, la scaderea vitezei, descreșterea forței hidrodinamice de antrenare sau creșterea forțelor de rezistență și este atinsă starea de „sedimentare/depunere” a aluviunilor.

Deducerea ecuațiilor transportului de sedimente a constituit preocuparea mai multor autori, precum: Engelund-Hansen (1967); Ackers-White (1973); Smart-Jaeggi (1983); Engelund-Fredsøe (1976); Van Rijn (1984), Meyer-Peter & Müller (1948); Sato, Kikkawa & Ashida (1957); Ashida & Michiue (1972); Lane-Kalinske (1941); Yang (1973) etc.

CAPITOLUL 5

MODELAREA TRANSPORTULUI SEDIMENTAR PE DUNĂRE. STUDIU DE CAZ – SECTORUL DUNĂREAN BECHET-CORABIA

5.1. Introducere

În general, la modelarea sectoarelor lungi de râu, cele mai utilizate sunt modelele unidimensionale (1D), care au la bază ecuațiile curgerii uniforme și pe cele ale curgerii uniform-variate. (Nistoran, et al., 2008) consideră că aceste modele prezintă următoarele avantaje: simplitatea calculelor, ușurința parametrizării, calibrarea facilă, număr mai mic de date necesare pentru calibrare/validare. 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 se regăsesc parametri precum rugozitatea definită pentru fiecare secțiune de calcul. În general, acești coeficienți de rugozitate iau valori diferite pentru albia minoră și pentru albia majoră, sau pot varia pe verticală. Calibrarea lor înseamnă de fapt ajustarea în limite acceptabile ale valorilor acestora cu scopul de a reproduce cu acuratețe nivelurile înregistrate în 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. În plus, 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 (Nistoran, et al., 2008). Modelele 2D integrează ecuațiile Saint-Venant mediate pe adâncime, prin metoda elementului finit.

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 (Văduva, 2012). Modelele 3D sunt capabile să reproducă vârtejurile secundare din meandre și variațiile pe verticală ale mărimilor hidraulice. Ele rezolvă ecuațiile Reynolds și oferă o descriere mai bună a turbulenței și transportului sedimentar inițiat de către aceasta, însă calibrarea acestor modele necesită măsurători foarte detaliate ale câmpului curgerii.

Modelarea hidro-sedimentară reprezintă un instrument de predicție a comportamentului unui râu/fluviu pe termen scurt sau lung, care ajută la studierea fenomenelor de eroziune sau depunere, precum și la cuantificarea transportului de sedimente și modificărilor intervenite în patul albiei.

Modelele hidro-sedimentare tratează separat partea de curgere a apei curate de fenomenul de difuzie-advecție asociat transportului sedimentar, considerând albia deformabilă. Aceste modele au în componență și ecuația de continuitate pentru materialul sedimentar și iau în calcul cantitatea de aluviuni intrată, fiind capabile să prognozeze un debit solid la ieșire (capacitatea de transport a curentului) și să cuantifice procesele de agardare și degradare (evoluția deformării) ale patului albiei pe sectorul respectiv. Aceste modificări morfologice pot

fi calculate fie în condiții de echilibru, pentru un set dat de condiții staționare ale parametrilor hidraulici și materialului sedimentar, fie în condiții nestaționare, prin folosirea anumitor funcții matematice (Programul AMTRANS, 2006).

În unele cazuri, pentru simplificarea calculelor se poate utiliza o singură clasă granulometrică (luată ca fiind diametrul mediu al curbei granulometrice, d_{50}), iar cu ajutorul funcțiilor matematice poate fi prognozat debitul solid, fie pentru transportul târât, fie pentru cel în suspensie, fie pentru ambele.

5.2. Arealul de studiu

Zona selectată (Figura 10) pentru crearea unui model complex hidraulic și de transport de sedimente se referă la sectorul dunărean situat între stațiile hidrometrice Bechet (km 678) și Corabia (km 625).

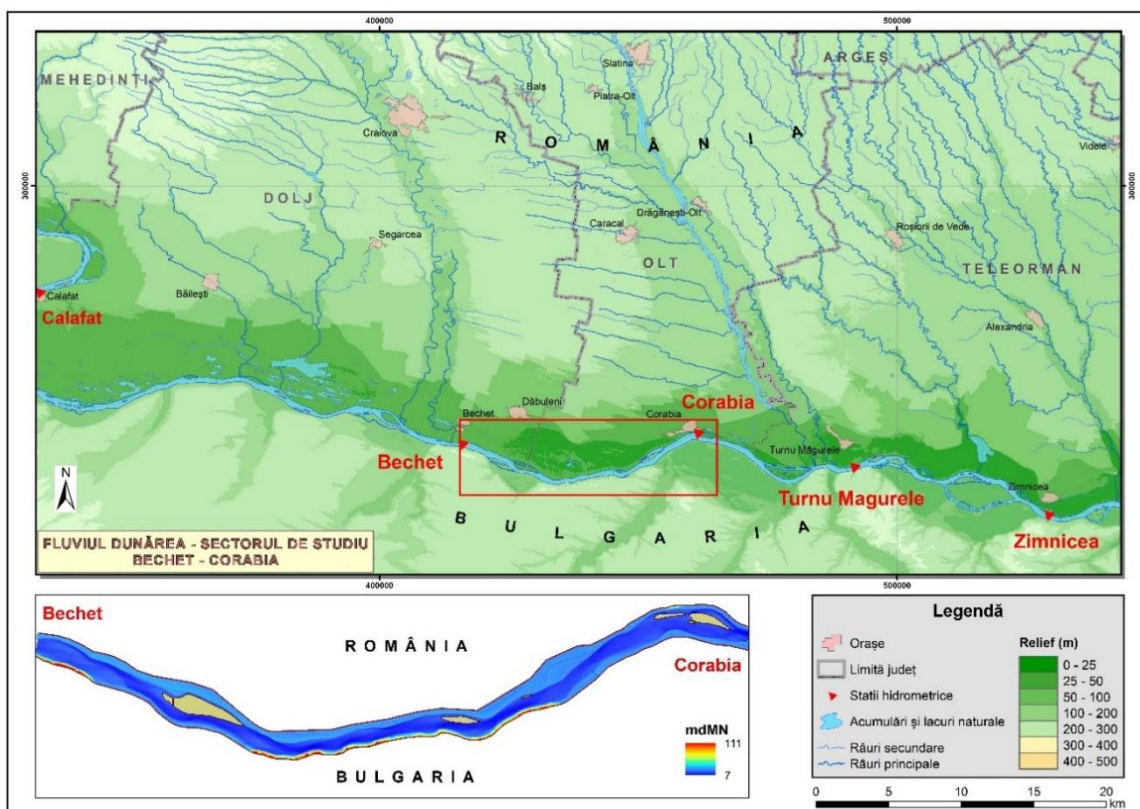


Figura 10. Zona de studiu

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.

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).



Infrastructura geodezică de pe zona critică 3 – Bechet-Corabia

Pe sectorul dunărean analizat, Bechet-Corabia (*zona critică 3*), există șase locații (*figura 11*) în care au fost amplasate borne din rețeaua de sprijin AFDJ2014 (86-91) - *Lotul 4*.

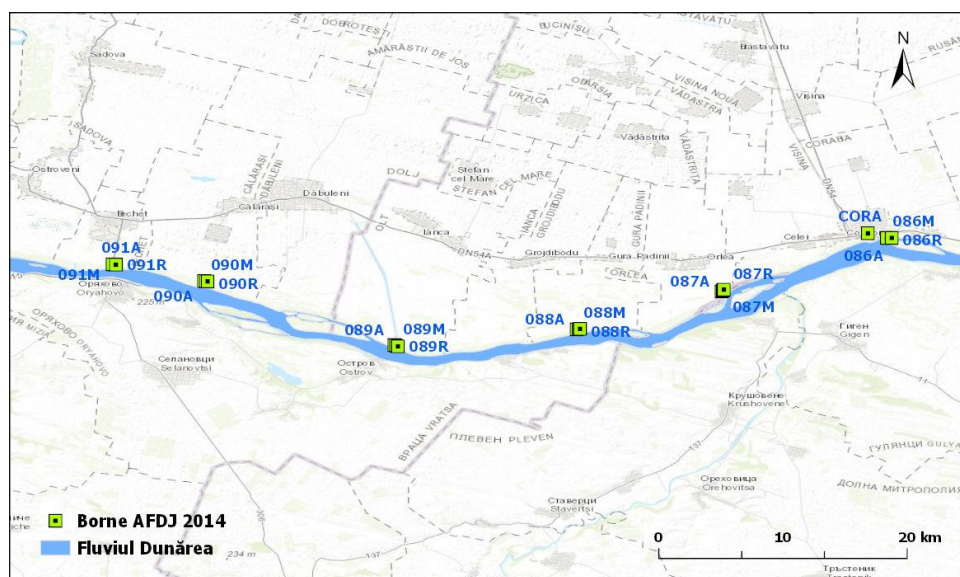


Figura 11. Rețeaua de sprijin AFDJ2014 pe sectorul Bechet-Corabia

Această rețea de sprijin stă la baza redeterminării corecte a cotei „zero” 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 și transportului de sedimente.

5.3. Date necesare construirii modelului matematic

Calitatea modelării matematice și reprezentarea spațială a rezultatelor acesteia sunt strâns legate de datele de intrare utilizate. Calitatea acestor date este extrem de importantă, deoarece 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.



Date și produse rezultate în urma campaniilor de măsurători în teren

a) Date colectate prin scanări LiDAR

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 distanța de 250 m față de primul mal ferm (zonele de nisip au fost incluse în corpul de apă).

Pentru construirea modelului matematic al curgerii și transportului de sedimente al sectorului Bechet-Corabia, au fost utilizate datele rezultate în urma primei campanii de măsurători, puse la dispoziție de AFDJ Galați. Pentru validarea modelelor au fost necesare datele rezultate în urma celei de-a doua campanii de măsurători.

b) 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: prima în lunile aprilie-mai 2017 (68 de zile – din aval, de la Călărași, în amonte, la Porțile de Fier II), iar a doua în lunile iulie-august 2017 (47 de zile – din amonte, de la Porțile de Fier II, spre aval, la Călărași).

▪ **Date hidrografice**

Pentru colectarea datelor hidrografice au fost utilizate trei ambarcațiuni 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 (eng. *swath width*).

Pentru efectuarea măsurătorilor batimetrice s-a preferat utilizarea sonarelor interferometrice, în defavoarea celor multifasciculare (multibeam), din următoarele considerente:

- Sonarele interferometrice au capacitatea de a cartografi și malurile până la suprafața apei mulțumită unghiului mare de transmitere a fasciculelor (240 grade);
- Comparativ cu sonarele multifasciculare clasice, sonarele interferometrice oferă o acoperire de până la de două ori mai mare și sunt mult mai eficiente în ceea ce privește timpul necesar și implicit costurile aferente;
- Sonarele interferometrice asigură mai mult de 5000 de puncte măsurate în lungul fâșiei scanate (*swath*), pentru fiecare *ping* (emisie de unde acustice). Pentru gama de adâncimi prevăzută pentru măsurători se emit minim 10 ping-uri/s, ceea ce înseamnă 7-8 ping-uri/metru liniar de profil, rezultând 400-800 puncte măsurate/mp;
- Adâncimea se măsoară până la suprafața apei de la o distanță sigură de navigare față de diguri sau obstacole subacvatice;
- Sonarele interferometrice sunt concepute îndeosebi pentru a opera în ape cu adâncimi mici și foarte mici, în timp ce sonarele multifasciculare clasice oferă o acoperire redusă în aceste zone.
- Sonarele interferometrice utilizate pot înregistra viteze de până la 7 noduri (circa 13 km/h), mai mult decât un sonar multifascicul convențional.

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 (Constantinescu, et al., 2007).

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

Datele hidrografice, hidrodinamice și cele privind sedimentele au fost colectate simultan.

■ Modelul digital al zonei de studiu

Modelul digital al sectorului dunărean Bechet-Corabia (53 km lungime) a fost obținut pe baza datelor culese prin tehnologie LiDAR (Light Detection and Ranging), combinate cu date topo-geodezice și batimetrice, rezultând un MDT unitar de înaltă rezoluție (50 cm x 50 cm), care acoperă întreaga zonă de studiu (*Figura 12*) - albia minoră a fluviului și 250 m stânga-dreapta de la primul mal ferm.

În etapa de procesare a datelor, malurile și insulele dunărene au fost digitizate pe baza datelor LIDAR. În zonele cu adâncimi mici, unde scanările nu au putut fi efectuate, golurile rămase între gridul LIDAR și gridurile batimetrice au fost completate cu date interpolate utilizând soft-ul Surfer. Gridul interpolat rezultat a fost ulterior integrat celui inițial.

Acest MDT de înaltă rezoluție spațială este vital pentru construirea modelului hidro-sedimentar.

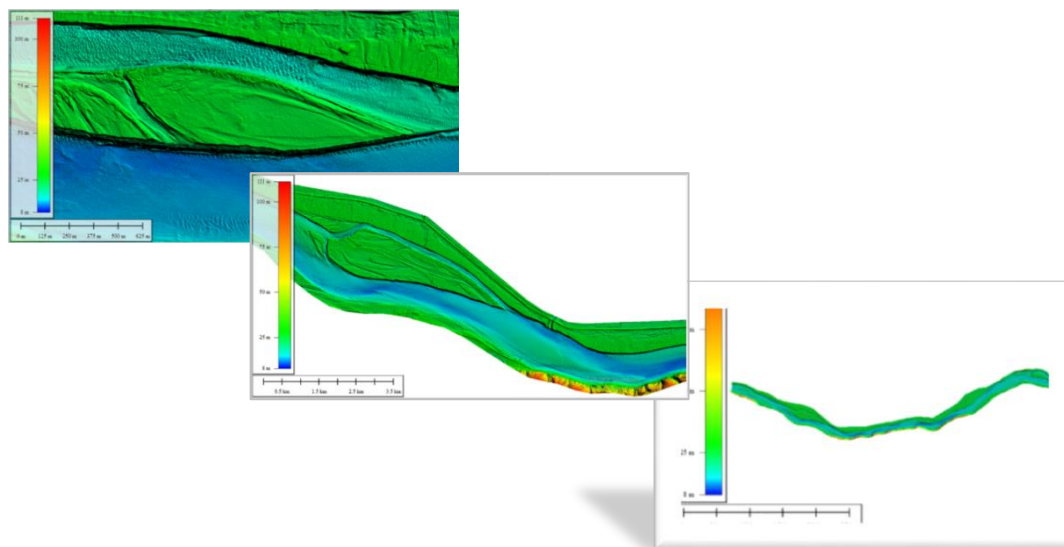


Figura 12. Vizualizarea și analiza MDT unificat pentru zona critică 3 (Bechet-Corabia), folosind soft-ul Global Mapper

■ Date hidrodinamice

Măsurătorile hidrodinamice au fost realizate folosind două echipamente acustice Doppler (ADCP - Acoustic Doppler current profiler) Teledyne RDI RiverRay 600 (*Figura 13*). Acestea ajustează mărimea celulei de măsurare în funcție de adâncimea apei. Dimensiunea

celulelor a fost limitată la 50 cm. Cele două sisteme ADCP au fost tractate de către catamarane pentru scanări (Figura 14).



Figura 13. Sistem ADCP Teledyne RDI RiverRay 600



Figura 14. Tractarea sistemelor ADCP în timpul măsurătorilor

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

Pe *zona critică 3* – Bechet - Corabia s-au realizat 124 de profile hidrodinamice (Figura 15), executate la o echidistanță de aproximativ 500 m pe brațul navigabil, iar pe brațele secundare au fost realizate profile la intrarea pe braț, la mijloc și la ieșirea de pe braț.



Figura 15. Poziția profilelor hidrodinamice pe zona critică 3 (Bechet-Corabia)

■ Date despre sedimente

Pentru fiecare zonă critică, inclusiv pentru zona critică 3 - Bechet-Corabia, în cadrul proiectului FAST DANUBE, s-au realizat două campanii de sondaje ale sedimentelor, care au vizat colectarea de informații cu privire la dimensiunea particulelor și la proprietățile fizico-mecanice ale sedimentelor.

➤ *Sedimente în suspensie*

Sedimentele în suspensie au fost analizate in-situ (nu s-au prelevat probe fizice) cu ajutorul unui granulometru laser denumit LISST (Figura 16), un instrument de ultimă generație

special dezvoltat pentru determinarea la fața locului a dimensiunii granulelor sedimentului în suspensie și a concentrației totale (Bogen, et al., 2003).



Figura 16. Instrumentul LISST-200X în timpul utilizării

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

Pe sectorul critic Bechet-Corabia, analiza celor 1315 probe de sedimente în suspensie colectate indică faptul că proporția de sedimente fine (cu diametru mai mic de 0.063 mm) din albia fluviului este foarte mică, sub 3% din total, iar cantitățile semnificative tind să apară doar în anumite zone restrânse, cum ar fi canalele secundare. Întrucât ele nu constituie o componentă semnificativă a morfologiei fluviului în zona de interes, în acest studiu nu se impune modelarea sedimentelor coezive. Aceste particule fine reprezintă de fapt sedimente „spălate” sau în suspensie, ele neavând contact cu patul albiei.

➤ **Sedimente de pe fundul albiei**

Pe sectorul critic Bechet-Corabia s-au efectuat 74 de profile din care s-au extras sedimente din albia fluviului cu ajutorul unui greifer Hydrobios tip Van Veen de 25 kg, operat cu un trolu electric (Figura 17).



Figura 17. Greiferul Hydrobios și troluul electric utilizate pentru prelevarea probelor din albie

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

În total au fost prelevate 279 de probe (Figura 18), pentru care s-au întocmit curbe granulometrice (Figura 19) și s-au calculat parametrii statistici ai distribuției granulometrice.



Figura 18. Puncte de prelevare a probelor de sedimente (sectorul dunărean Bechet-Corabia)

Analiza probelor s-a efectuat în laborator, unde au fost sitate prin intermediul unei baterii de site cu dimensiuni ale ochiurilor de 2, 4, 8, 16 și 32 mm. Frațiunile cu pietricele au fost cântărite individual, iar procentul lor a fost înregistrat într-un tabel. Frațiunea mai mică de 2 mm a fost analizată separat, pentru a determina distribuția și parametrii granulometrici. Analizele au fost efectuate cu ajutorul unui analizor de dimensiuni ale particulelor cu laser denumit Malvern 3000.

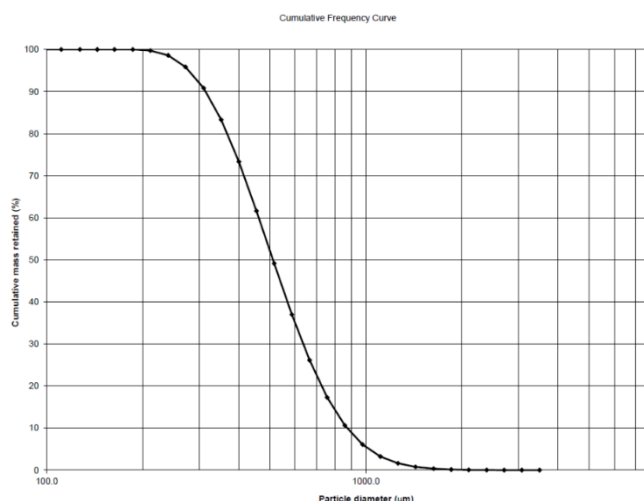


Figura 19. Exemplu de curbă granulometrică efectuată pentru o probă de sedimente din albie

c) Date hidrologice

Datele hidrologice necesare construirii, calibrării și validării modelului hidro-sedimentar au fost obținute cu sprijinul Institutului Național de Hidrologie și Gospodărire a Apelor (INHGA) și al AFDJ Galați - S.C.N. Giurgiu.

Toate datele colectate au fost procesate prin metode statistico-matematice (Microsoft Excel 2014) sau metode specifice mediului GIS (cartografice, geostatistice).

Datele hidrologice constau în:

- Debite lichide medii zilnice și niveluri medii zilnice de la stațiile hidrometrice Bechet și Corabia pentru anul 2017 (sursa: arhiva INHGA);
- Cheia limnimetrică (în format tabelar) de la stația hidrometrică Corabia valabilă pentru anul 2017 (sursa: arhiva INHGA).
- Valoarea cotei „zero” miră corespunzătoare s.h. Corabia (sursa: arhiva INHGA);
- Curbe granulometrice ale probelor prelevate din patul albiei și din curentul de apă (sursa: FAST DANUBE);
- Diametrul D_{50} al granulelor aluvionare din albie și în suspensie (sursa: FAST DANUBE);
- 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 pe baza fișierului shapefile *Corine Land Cover (2012-2018)* cu acoperirea terenului.

d) 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, printre care se remarcă: substratul litologic (geologia), relieful, solurile, utilizarea terenului, elementele climatice, apele freatice.

5.4. Constituirea bazei de date geospațiale

Etapă de documentare s-a finalizat cu realizarea unei baze de date digitale geospațiale în format specific Sistemelor Informaționale Geografice - SIG (Geographic Information System - GIS), care să conțină informații cât mai detaliate privind fluviul Dunărea în general și sectorul Bechet-Corabia în special.

Datele geospațiale pot fi încadrate, în principal, în două categorii de reprezentare/modele de date: vector și raster.

În lucrarea de față, au fost utilizate următoarele seturi de date geospațiale în format raster:

- Modelul digital al terenului cu rezoluție spațială 0.5 m (sursa: AFDJ – proiect FAST DANUBE);
- Ortofotoplanuri cu rezoluția spațială de 0.5 m, ediția 2013-2017 și 2017-2019 (sursa: ANCPI, 2020);
- Planurile Directoare de Tragere (1889-1916) – sursa geo-spatial.org;
- Imagini satelitare Sentinel 2, Landsat 8, MODIS etc. de diferite rezoluții. Într-o primă fază, datele satelitare nu reprezintă imagini, ci matrici care conțin valori ale nivelului radiației electromagnetice, măsurate în diferite benzi spectrale (sursa: <https://www.sentinel-hub.com/explore/sentinel-playground>).

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

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

DATE DIGITALE PRIMARE	FORMAT	SURSA DATELOR
<i>Borne geodezice de sprijin</i>	<i>Vector; punct</i>	<i>AFDJ Galați (proiect “BORD”)</i>
<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; poligon</i>	<i>geo-spatial.org</i>
<i>Limită județe</i>	<i>Vector; poligon</i>	<i>geo-spatial.org</i>
<i>Granița de stat</i>	<i>Vector; linie</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 2017-2019);</i>
<i>Albia majoră</i>	<i>Vector; linie</i>	<i>Vectorizare ortofotoplanuri cu rezoluția de 0,5 m (ediția 2017-2019);</i>
<i>Talveg</i>	<i>Vector; linie</i>	<i>AFDJ Galați (proiect “FAST DANUBE”)</i>
<i>Profile transversale</i>	<i>Vector; linie</i>	<i>AFDJ Galați (proiect “FAST DANUBE”)</i>
<i>Probe sedimente</i>	<i>Vector; punct</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 2017-2019);</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>

5.5. Programe de specialitate utilizate

Pentru efectuarea analizelor statistice și a calculelor necesare acestui studiu, mai multe seturi de date au fost prelucrate cu ajutorul soft-ului Microsoft Excel.

Digitizarea, prelucrarea și exportul datelor necesare modelării hidro-sedimentare, precum și calculul volumelor și transpunerea spațială a datelor și a informațiilor în schițe și hărți, au fost realizate utilizând aplicații GIS/CAD: ArcMap 10.5, ArcGIS PRO 2.1, ArcScene 10.5.1, Global Mapper v18, AutoCAD 2016.

Modelul hidraulic 2D al zonei critice 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.

Modelul hidrodinamic 1D, necesar procesului de calibrare a coeficienților de rugozitate, a fost construit cu ajutorul modulului **MIKE HYDRO River** din pachetul **MIKE 21**.

Pentru simularea transportului de sedimente a fost utilizat modulul **MIKE Sand Transport (ST)**.

5.6. Construirea modelului de transport sedimentar pe sectorul dunărean Bechet-Corabia

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.

Întregul flux de lucru este prezentat în *Figura 20*. Metodologia și tehnicile utilizate sunt perfect replicabile pentru orice alt sector de râu, cu restricțiile legate de disponibilitatea datelor de intrare.

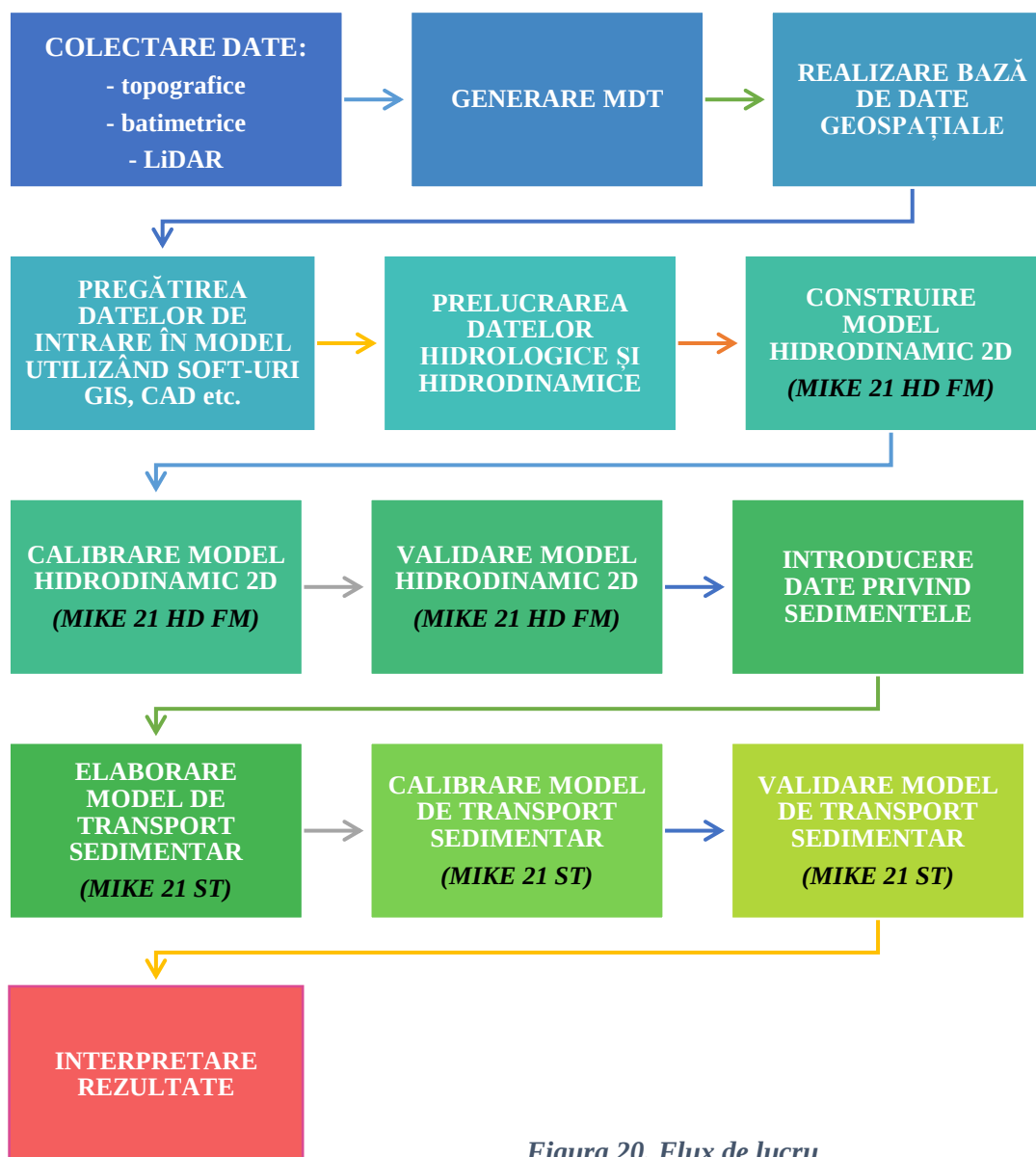


Figura 20. Flux de lucru

Etașa premergătoare elaborării modelului de transport sedimentar o reprezintă realizarea modelului hidrodinamic (sau hidraulic) 2D. 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.

Crearea modelului hidrodinamic 2D cu ajutorul MIKE 21 FM

După prelucrarea tuturor datelor geospațiale utilizând aplicații GIS și pregătirea fișierelor în formate specifice soft-ului MIKE 21, în modulul MIKE 21 FM se introduc următoarele informații și seturi de date:

- **Domain (domeniul de lucru):** fișierul *.mesh* creat anterior pentru batimetria sectorului *dunărean Bechet – Corabia*; rețeaua de elemente finite triunghiulare interconectate (denumită Flexible Mesh) a fost definită astfel:
 - **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.
- **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 Module (modulul hidrodinamic)*.
 - Pentru obținerea modelului hidrodinamic 2D, se setează **Modulul Hidrodinamic (Hydrodynamic Module)** astfel:
 - **Solution technique (soluția tehnică):** *Low order, fast algorithm* (în acest fel simularea este mai rapidă);
 - **Flood and dry (condiții de „inundare/secare” a celulelor gridului):** *Drying depth (secare) – 0.01m; Wetting depth (inundare) – 0.1 m;*
 - **Density (densitatea):** *Barotropic (barotropică);*
 - **Eddy Viscosity (vâscozitatea de tip Eddy):** *Constant Eddy formulation (vâscozitate de tip Eddy constantă);*
 - **Bed resistance (rugozitatea):** *Manning number* – a fost introdus fișierul *.dfs0* creat anterior;
 - **Initial condition (condiția inițială):** a fost introdus fișierul *.dfs0* rezultat la simularea cu debit constant (4461 m³/s) în amonte și cheia limnimetrică în aval;
 - **Boundary conditions (condițiile la limită):** în amonte se introduce fișierul *.dfs0* cu hidrograful debitelor (s.h. Bechet), iar în aval fișierul *.dfs0* cu cheia limnimetrică valabilă pentru anul 2017 la s.h. Corabia.

Modelul a fost rulat, în regim nepermanent, aproximativ 38 de ore. La finalul simulării s-au calculat, pentru fiecare pas de timp și în fiecare element finit al rețelei modelului, următorii parametri:

- **cota suprafeței liberă a apei în raport cu MN75 (Surface elevation)** – Figura 23;
- **adâncimea apei (Total water depth)** – Figura 5.24;
- **viteza curentului (Current speed)** – Figura 5.25;
- **direcția vitezei** (componentele U și V – *U velocity, V velocity*) – Figura 5.26 și Figura 5.27.

Aceste rezultate sunt stocate într-un fișier în format *.dfs0* și pot fi vizualizate, interogate și prelucrate cu ajutorul modulelor MIKE Zero Data Manager și MIKE Zero Data Viewer.

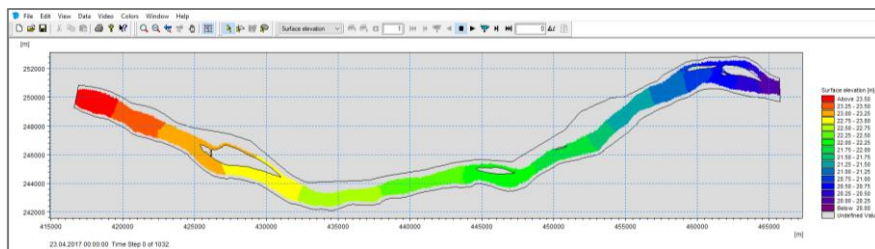


Figura 23.1 Cota suprafeței libere a apei (Surface elevation)

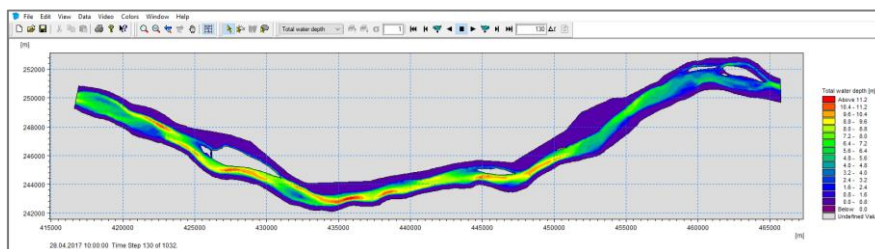


Figura 24. Adâncimea apei (Total water depth)

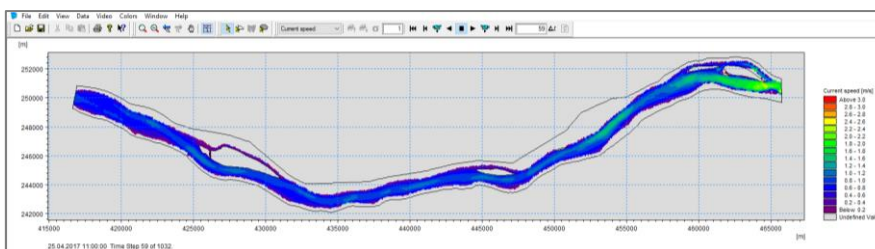


Figura 25. Viteza curentului (Current speed)

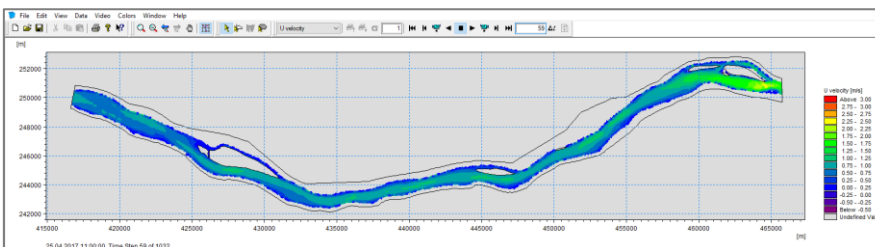


Figura 26. Componenta U a vitezei (U velocity)

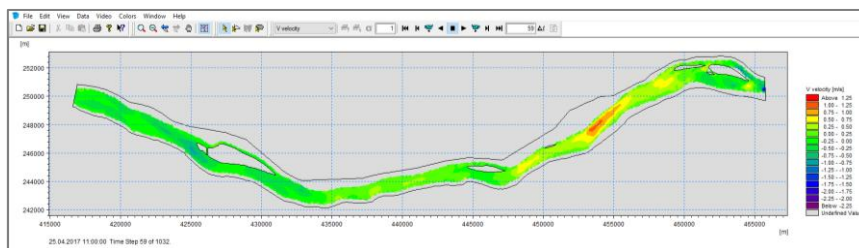


Figura 27. Componenta V a vitezei (V velocity)

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

Calibrarea modelului hidrodinamic 2D

În general, **calibrarea modelului hidrodinamic** 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 aval.

□ 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, conform *Figurii 28*. Rugozitatea depinde de dimensiunea particulelor care compun patul albiei.

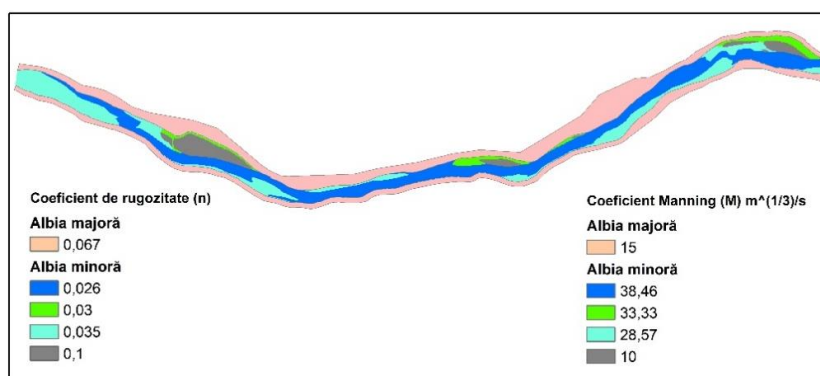


Figura 28. Coeficienții de rugozitate stabiliți pentru albia majoră, albia minoră și insule

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 29*).

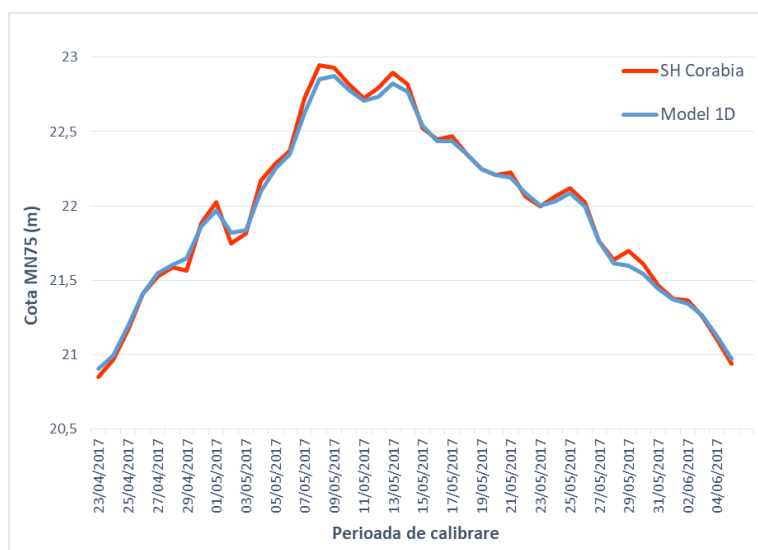


Figura 29. Calibrarea modelului hidrodinamic 1D

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 30). Prin obținerea acestor valori, se consideră că modelul a fost calibrat cu succes.

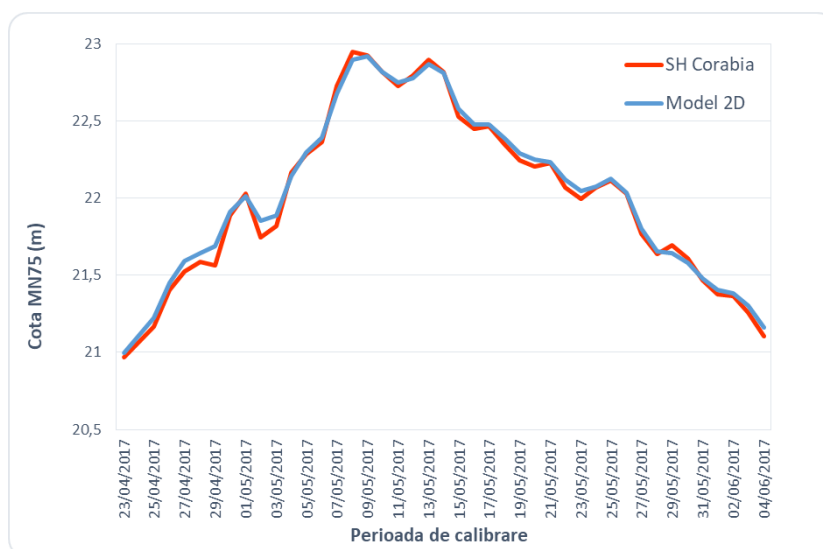


Figura 30. Calibrarea modelului hidrodinamic 2D

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 pe baza a două seturi de date din perioade diferite față de perioada de calibrare (Figura 31).

□ Prima validare s-a efectuat simulând debitele zilnice înregistrate la stația hidrometrică Bechet în **perioada 03.03.2017 – 31.03.2017**.

□ A doua validare s-a efectuat introducând în modelul hidrodinamic 2D hidrograful debitelor zilnice înregistrate în perioada **16.09.2017-15.10.2017** la s.h. Bechet.

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.

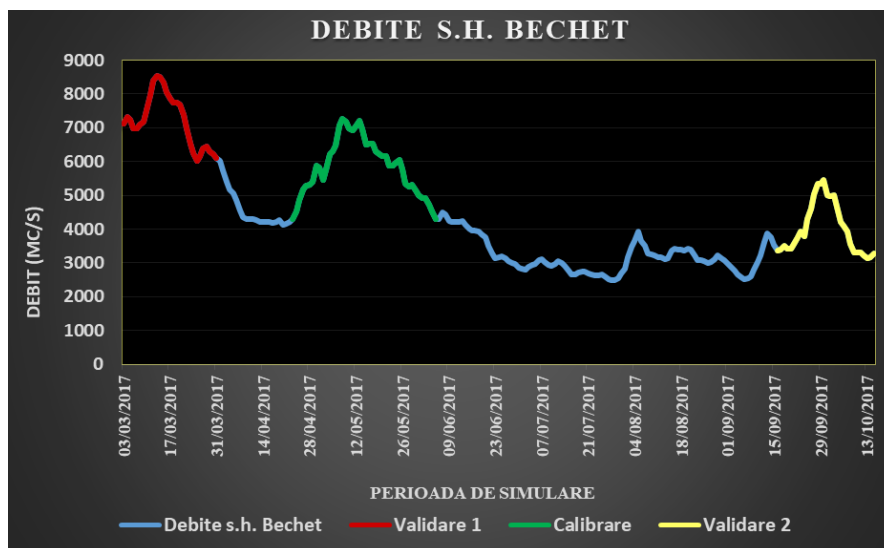


Figura 31. Hidrograful debitelor de la s.h. Bechet pentru perioada de calibrare și cele două perioade de validare

Modelarea transportului sedimentar pe sectorul dunărean Bechet-Corabia

Fluviul Dunărea se înscrie în tabloul general al râurilor importante din Europa afectate de activitățile antropice (începute încă din secolul al XVII-lea) care contribuie la modificări substanțiale asupra regimului hidrologic și morfologiei albiei minore. Cele mai importante lucrări antropice efectuate de-a lungul timpului pe Dunăre sunt: construcțiile hidrotehnice, realizate atât în amonte de sectorul analizat, cât și pe râurile afluate fluviului, lucrările de îndiguire, lucrările de dragare pentru menținerea navigației, dar și pentru extragerea nisipului în scop comercial, barjele scufundate și exploatarea vegetației forestiere (Marin, 2017). Lucrările hidrotehnice influențează regimul hidrologic prin reținerea unei cantități semnificative de sedimente.

În intervalul 1921-1960, anterior construirii marilor baraje, debitul mediu de aluviuni în suspensie pe Dunăre a atins 67,6 mil.tone/an, în perioada 1970-1980 s-a redus cu 39%, iar în deceniul 1980-1990 a ajuns la 29,2 mil.tone/an (Chirica, 1992).

Sistemele Hidroenergetice și de Navigație Porțile de Fier I și II, construite în colaborare cu partenerii sârbi, au avut un impact major asupra regimului hidrologic al fluviului, conducând la diminuarea cantităților de aluviuni prin reținerea acestora în spatele lor.

În ceea ce privește simularea transportului de sedimentele necoezive (nisipuri, pietrișuri etc.), a fost utilizat modulul **MIKE Sand Transport (ST)** din pachetul MIKE 21 FM, cuplat cu un model de morfologie (**Morphology**), pentru actualizarea cotelor din patul albiei pe parcursul rulării modelului.

Pe baza diametrului D_{50} al granulelor aluvionare (extras din rapoartele generate cu ajutorul programului GRADISTAT), s-a realizat fișierul *.dfsu* prezentat în Figura 32, esențial pentru modelarea transportului sedimentar.

Valoarea medie a parametrului D_{50} este de 0.28 mm, de unde reiese, conform (Inman, 1949), că particulele sunt ușor erodate de curenții acvatici.

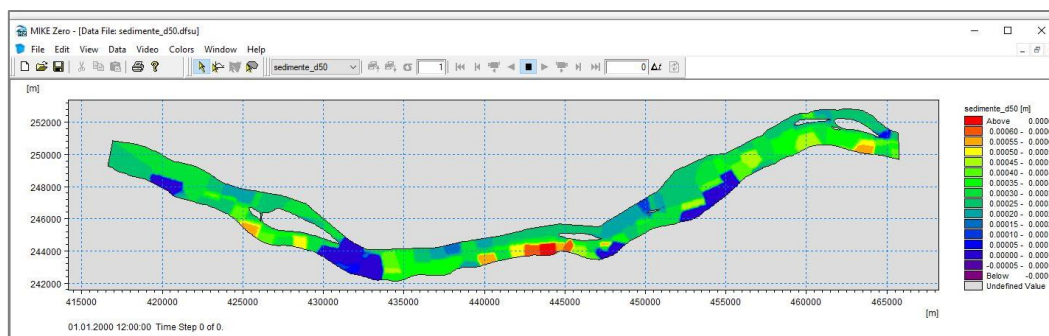


Figura 32. Fișier .dfsu cu distribuția valorilor diametrului D50 pe sectorul Bechet-Corabia

După prelucrarea tuturor datelor și pregătirea fișierelor în formate specifice MIKE 21, modulul **Sand Transport** simulează transportul de sedimente necoezive bazându-se pe următoarele informații și seturi de date:

- ✓ **Perioada de timp:** perioada de simulare a modelului de transport sedimentar a fost mai lungă decât în cazul modelării hidrodinamice, și anume 23.04.2017-05.08.2017, însemnând 103 de zile, cu un pas de timp de 30 s, rezultând un număr total de pași de timp de 299520; aceasta corespunde intervalului de timp în care s-au efectuat cele două campanii de măsurători (inclusiv perioada dintre ele), pe domeniul modelului aferent Zonei Critice 3;
- ✓ **Definirea modelului/descrierea tipului de transport:** “Pure curent/ non-equilibrium” - transportul este studiat în condiții de „curent pur/fără echilibru” (Beibei, et al., 2018); abordarea clasică în acest caz presupune aplicarea unor formule de transport și ecuații ale conservării masei diferite pentru fiecare clasă granulometrică (Church, et al., 2012);
- ✓ **Ecuația de transport sedimentar:** atât pentru transportul târât, cât și pentru aluviunile în suspensie, s-a optat pentru formula de calcul *Engelund-Hansen* (Gray & Simões, 2008);
- ✓ **Soluția tehnică:** s-a optat pentru varianta *Low order, fast algorithm* (în acest fel simularea este mai rapidă);
- ✓ **Proprietățile sedimentelor:** valoarea porozității sedimentelor a fost setată 0.4, densitatea relativă 2.65, iar la secțiunea „date despre sedimente” a fost introdus fișierul .dfsu cu distribuția valorilor D_{50} (creat anterior), pentru a exprima variabilitatea spațială a granulometriei în cadrul domeniului modelului (“varying in domain”);
- ✓ **Rugozitatea:** *Manning number* – a fost introdus fișierul .dfsu creat pentru modelul hidrodinamic;
- ✓ **Condiția inițială:** „echilibru”;
- ✓ **Modelarea morfologică:** simularea morfologiei patului albiei permite actualizarea modificărilor intervenite la nivelul albiei după etapa de modelare hidraulică, pentru fiecare pas de timp (Drobot, et al., 2011), cu evidențierea proceselor de eroziune sau depunere calculate pentru fiecare celulă a *mesh*-ului. Aceasta asigură o evoluție constantă a patului albiei, prevenind astfel destabilizarea simulării hidrodinamice.
- ✓ **Condiții la limită:** pentru morfologie, condițiile pe contur se specifică separat - la limita amonte a modelului (de intrare) se pune condiția de modificare zero a albiei, iar la limita aval a modelului (de ieșire), condiția de gradient zero pe fluxul de sedimente („zero sediment flux gradient”).
- ✓ **Rezultate obținute:** “Rate of bed level change”, “Bed level change”, “Bed level” etc.

La finalul simulării, care a durat mai mult de **6 zile**, s-au calculat, pentru fiecare pas de timp și în fiecare element finit al rețelei modelului, următorii parametri:

- **cota suprafeței libere a apei** în raport cu MN75 (*Surface elevation*) – Figura 33;
- **rata de modificare a cotei patului albiei** (*Rate of bed level change*) – Figura 34;
- **modificări în patul albiei (depuneri/eroziuni)** (*Bed level change*) – Figura 35;
- **cota patului albiei** (*Bed level*) – Figura 36.

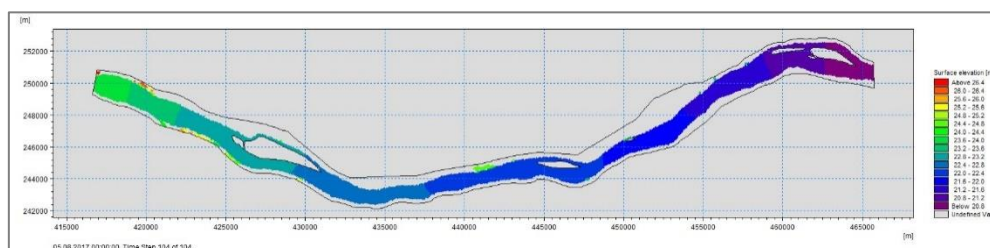


Figura 33. Cota suprafeței libere a apei (*Surface elevation*)

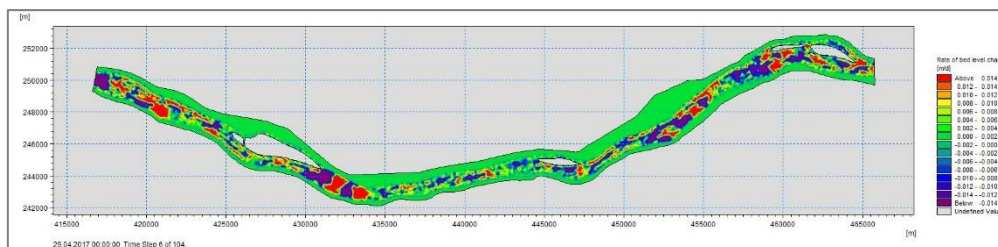


Figura 34. Rata de modificare a cotei patului albiei (*Rate of bed level change*)

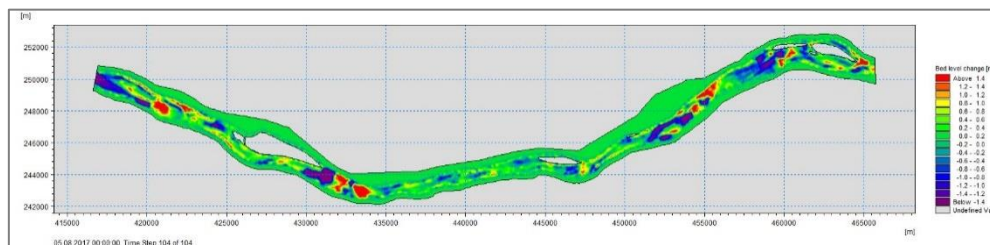


Figura 35. Modificări în patul albiei (depuneri/eroziuni) (*Bed level change*)

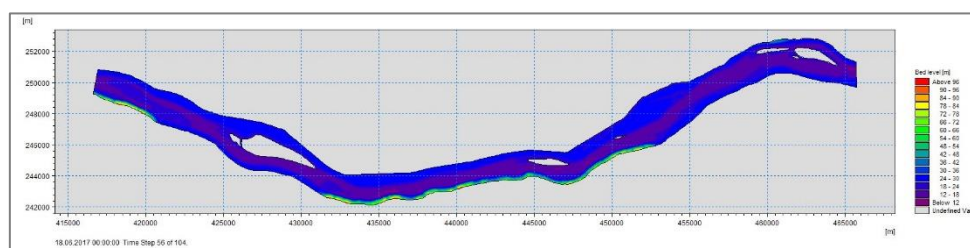


Figura 36. Cota patului albiei (*Bed level*)

Modelul hidro-sedimentar a fost elaborat cu scopul de a urmări modificările morfologice petrecute în sectorul critic Bechet-Corabia în decurs de 4 luni. Modificarea în permanență a cotei patului albiei conduce automat la modificarea informațiilor de adâncime de pe hărțile de navigație.

5.7. Calibrarea și validarea modelului de transport sedimentar

Pentru a demonstra capabilitatea modelului de transport sedimentar de a reproduce cu o mare precizie fenomenele de eroziune sau depunere pe sectorul critic analizat, următoarea etapă a studiului se referă la calibrarea și validarea acestuia.

În timpul procesului de **calibrare** au fost testate mai multe configurații ale modelului de transport sedimentar elaborat, prin schimbarea ecuațiilor transportului sedimentar și a parametrilor acestora. Performanța modelului calibrat a fost evaluată prin compararea modificărilor de cotă din albie rezultate în urma rulării modelului cu diferențele de cotă dintre cele două campanii de măsurători batimetrice.

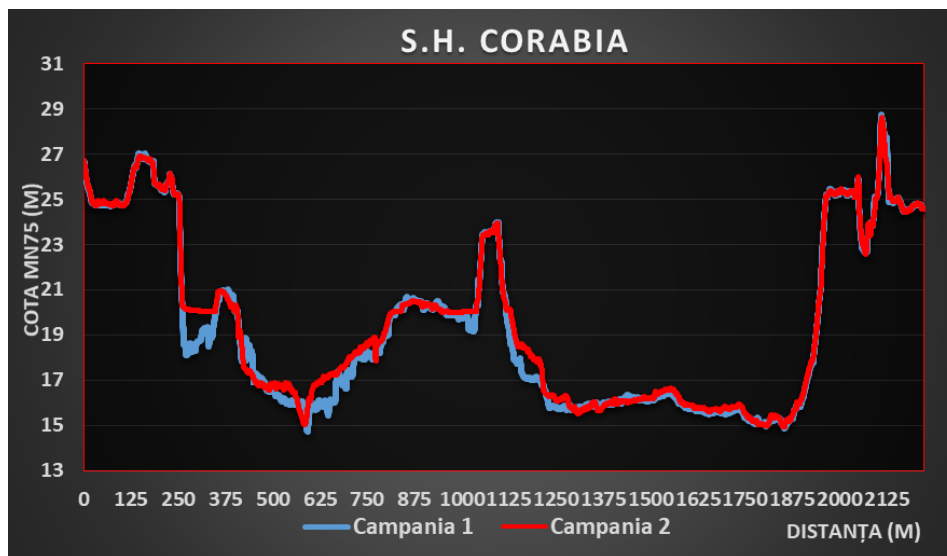


Figura 37. Exemplet de modificări ale patului albiei între cele două campanii de măsurători batimetrice: punct critic Corabia

Pe baza fișierelor de tip grid au fost reprezentate modificările de cotă din patul albiei, precum și de pe aliniamentul oricărui profil transversal din modelul digital. Modificarea cotei oferă o evaluare orientativă a eroziunilor sau depunerilor nete din albie, pe fiecare secțiune transversală, pentru a fi comparate cu rezultatele modelului de transport sedimentar.

Pe graficul din *Figura 37* este redat un exemplu de modificări intervenite între cele două campanii de măsurători batimetrice, în profil transversal, în punctul critic Corabia.

În anumite zone, cota din a doua campanie de măsurători este cu până la 2 m mai mare față de prima, ceea ce corespunde fenomenului de depunere, dar există și zone în care cota albiei este chiar și cu 1.50 m mai jos decât în prima campanie de măsurători batimetrice, putând interpreta această variație ca fiind un fenomen de eroziune.

În *Figura 38*, se poate observa că tipul și mărimea modificărilor morfologice din albie obținute prin modelare sunt similare cu cele rezultate din măsurători. Probele de sedimente prelevate în cele două campanii batimetrice indică o albie predominant nisipoasă.

Modelul elaborat relevă o corelație între cantitatea de aluviuni și viteza curentului. În zonele în care viteza scade în sector se produc depuneri, iar acolo unde viteza crește iau naștere eroziuni.

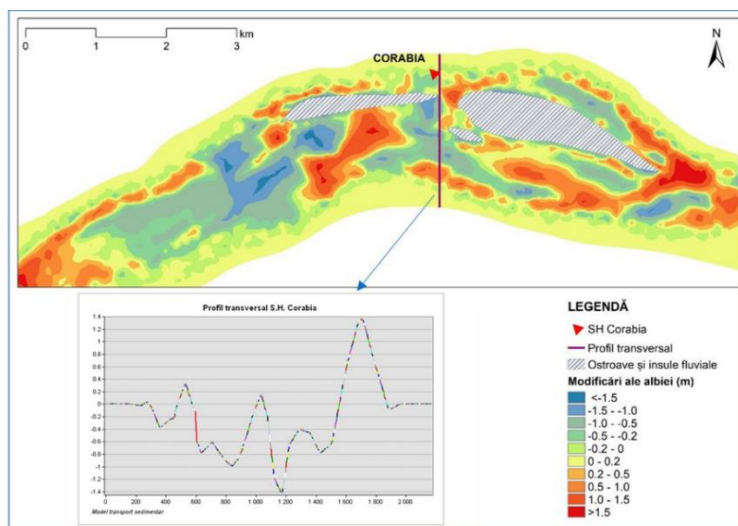


Figura 38. Rezultatul modelării transportului de sedimente în punctul critic Corabia

Modelul de transport sedimentar a fost supus unei **analize de senzitivitate**, prin care se studiază modul în care variația rezultatului numeric poate fi atribuită cantitativ unor surse diferite de variație a parametrilor de intrare (input) de bază.

În Figura 39, este ilustrat rezultatul principal al simulării modelului validat pentru perioada 23.04.2017-05.08.2017, care constă în identificarea zonelor cu depuneri, respectiv eroziuni, de pe sectorul critic Bechet-Corabia. Zonele de eroziune alternează cu cele de depunere pe toată lungimea sectorului analizat. Unele eroziuni sunt produse artificial, din cauza lucrărilor de dragaj efectuate în albie, în vederea întreținerii șenalului navigabil și pentru exploatarea nisipului și pietrișului din patul albiei.

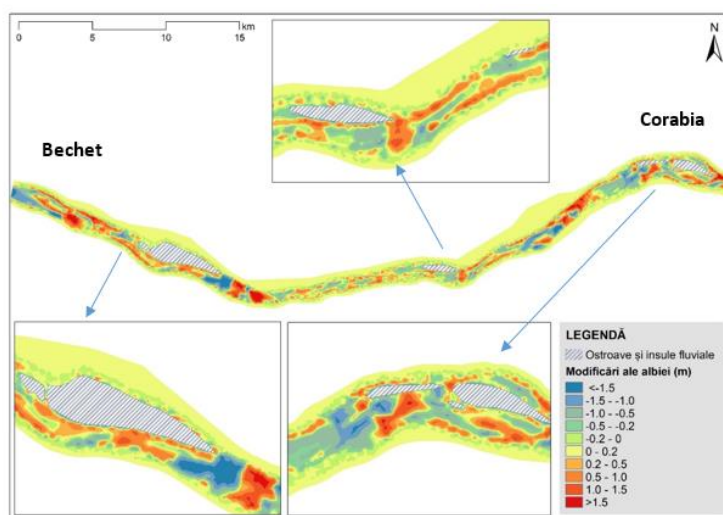


Figura 39. Zone cu depuneri și eroziuni pe sectorul dunărean Bechet-Corabia

În cazul sectorului critic Bechet-Corabia, s-a constatat, cu ajutorul calculelor efectuate prin intermediul funcțiilor ArcGIS Pro (*Surface Volume*), că volumul total depus în albia fluviului este mai mare decât volumul total erodat cu 1.05 mil. m³ (Tabelul 4). Rezultatele modelului privind modificările globale de volum în albia fluviului sunt în concordanță cu modificările aferente de volum obținute pe baza măsurătorilor batimetrice.

Tabelul 4. Volumul total depus/erodat de sedimente

<i>Zona critică</i>	<i>Suprafața (m²)</i>	<i>Volum total depus (mil. m³)</i>	<i>Volum total erodat (mil. m³)</i>
<i>Bechet-Corabia (ZC3)</i>	<i>107390484</i>	<i>16,236</i>	<i>15,191</i>

În **punctul critic Bechet** (Figura 40), albia fluviului se lărgeste de la 900 m în amonte, la 1.400 m în aval. Malurile sunt plate, acoperite cu o vegetație abundentă (arbori/arbuști). Procesele de eroziune manifestate în special pe malul stâng (între km 675 și km 678) conduc la o retragere rapidă a acestuia. În centrul albiei se evidențiază un banc de nisip care afectează buna desfășurare a navigației.

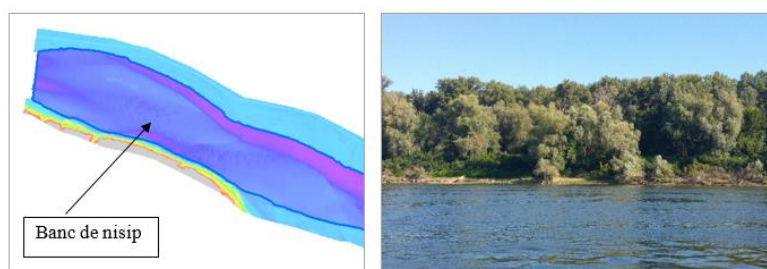


Figura 40. Punctul critic Bechet

În **punctul critic Corabia** (Figura 41), albia Dunării se lărgeste de la 900 m în amonte, la 1.600 m în aval. În partea de nord a fluviului, pot fi distinse două insule fluviale de dimensiuni mari, o insulă mai mică, precum și numeroase bancuri de nisip în canalele din jurul insulelor. Malurile sunt acoperite cu vegetație naturală și structuri hidrotehnice masive. În lungul malului stâng există puncte de ancorare. În această secțiune, atât măsurătorile, cât și modelul de transport sedimentar indică predominanța depunerilor, în special pe canalele laterale din vecinătatea malului stâng, însă există și zone cu eroziuni semnificative, atât în albie, cât și pe malul românesc al fluviului. Valorile mici ale eroziunilor pe malul drept (care este și mai înalt) indică prezența unui substrat mai dur, neerodabil în această regiune.

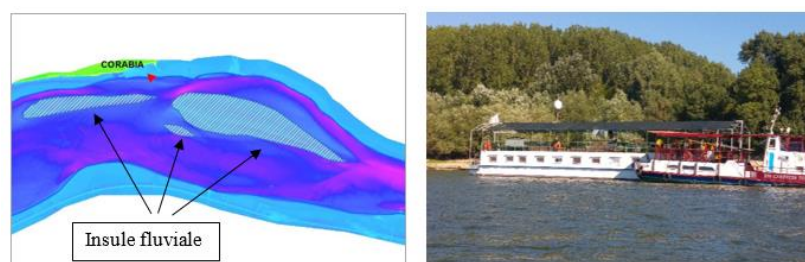


Figura 41. Punctul critic Corabia

Pe **sectorul critic Bechet-Corabia** au fost identificate în total 7 insule fluviale/ostroave, caracterizate prin vegetație abundentă (arbori și arbuști) și local inundate (Figura 42):

- ostrov în vecinătatea malului românesc, zona km 669 – 668;
- ostrov Papadia, aproape de malul românesc, între km 668 – 662+500;
- insula Grădiștea, aproape de malul românesc, între km 648 și 646;

- ostrov aproape de malul românesc, zona km 643;
- ostrov Baikal, aproape de malul românesc, între km 630 și km 631;
- insulă în vecinătatea malului românesc, între km 629 și km 628;
- insula Băloiu, între km 629 – 626.

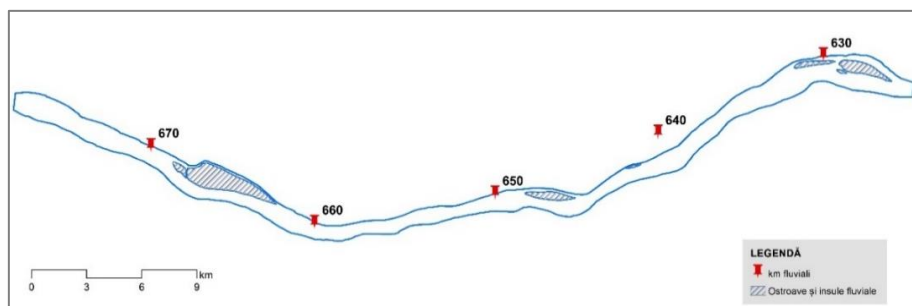


Figura 42. Insule fluviale și ostroave pe sectorul critic Bechet-Corabia

În urma unei analize efectuate în mediul GIS având ca sursă cartografică *Planurile Directoare de Tragere (1889 – 1916)*, s-a constatat că, în decurs de un secol, Dunărea a fost supusă unui proces hidromorfologic complex și continuu, rezultând o mare variabilitate spațială a patului albiei (Figura 43).

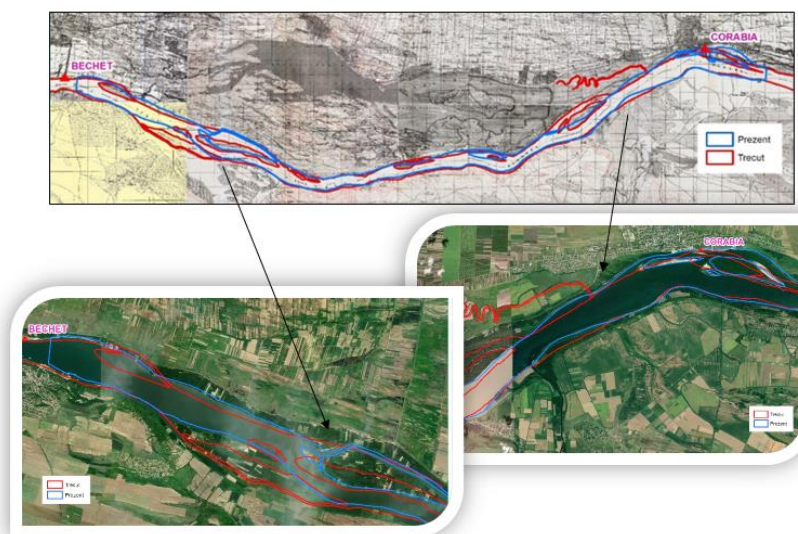


Figura 43. Modificări ale morfologiei albiei sectorului Bechet-Corabia pornind de la Planurile Directoare de Tragere, 1889-1916 (linia roșie), și până în prezent (linia albastră)

Aceste modificări morfologice puternice reprezintă de fapt o consecință a presiunilor antropice la care a fost supusă Dunărea. În timp, ele au contribuit la schimbări semnificative ale transportului sedimentar de-a lungul fluviului, conducând astfel la creșterea riscului la inundații și afectarea biodiversității în bazinul Dunării.

Aceste probleme nu pot fi rezolvate decât printr-un management eficient al sedimentelor pe întreaga lungime a fluviului Dunărea, dar și pe afluenții săi, cu evidențierea zonelor în care intervin fenomenele de eroziune și de sedimentare în albie.

„În proiectele referitoare la râuri timpul este dușmanul, prietenul și învâțătorul nostru” (Watson & al, 1999).

CAPITOLUL 6

CONCLUZII, CONTRIBUȚII, PERSPECTIVE

6.1. Concluzii

Deși în ultimele decenii s-au înregistrat progrese remarcabile în ceea ce privește studiul proceselor de curgere și transport sedimentar pe râuri și fluvii, modelarea lor reprezintă în continuare un subiect greu de abordat, care necesită un volum imens de date și cunoștințe interdisciplinare.

Obiectivul principal al acestei lucrări de cercetare a constat în obținerea unei model complex hidraulic și de transport de sedimente, pornind de la diversele tipuri de măsurători geodezice pentru determinarea elementelor necesare.

Sectorul dunărean studiat, **Bechet-Corabia**, face parte din „zonele critice” pentru navigația pe Dunăre. Acest sector de 53 km se caracterizează prin modificări importante ale morfologiei albiei, cauzate de fenomenele de eroziune, depunere și transport de sedimente. În perioadele cu niveluri scăzute, corespunzătoare unui debit mai mic de 3000 m³/s, pe anumite tronsoane nu sunt asigurate condițiile minime de navigație, recomandate de Comisia Dunării.

Această problemă poate fi rezolvată prin elaborarea unor soluții tehnice moderne pentru atingerea parametrilor recomandați pentru șenalul navigabil, însă proiectarea unor structuri este strâns legată de înțelegerea comportamentului fluviului, iar în acest sens modelarea hidro-sedimentară are un rol esențial.

O altă problemă legată de îmbunătățirea și extinderea căilor navigabile, precum și de monitorizarea dinamicii albiei fluviului, o reprezintă necesitatea interconectării lucrărilor topo-hidrografice într-un sistem geodezic unitar, care să respecte standardele europene și internaționale actuale, și anume ETRS89 pentru planimetrie și EVRS/EVRF2019 pentru altimetrie.

Modificarea în permanență a cotei fundului albiei conduce automat la modificarea informațiilor de adâncime de pe hărțile de navigație. Dezvoltarea unui sistem de monitorizare și control al navigației pe Dunăre necesită corelarea nivelurilor apei cu forma și adâncimea albiei Dunării.

În cadrul mai multor proiecte de cercetare prezentate în cuprinsul lucrării, au fost identificate mai multe soluții care să contribuie la rezolvarea problemelor de infrastructură geodezică de pe Dunăre, precum:

- realizarea unei rețele de sprijin, denumită „AFDJ2014”, proiectată și materializată de-a lungul sectorului românesc al fluviului, pentru care s-au determinat altitudinile punctelor în sistemul național, cu posibilitatea de a face transformarea în sistemul european de altitudini, dar și în sistemul de altitudini utilizat în Bulgaria (proiectul „BORD” – finalizat în 2015);

- stabilirea unui sistem de referință și coordonate (SCR) comun pentru stațiile hidrometrice care monitorizează nivelul Dunării pe sectorul comun de Dunăre dintre România și Bulgaria, inclusiv cu redeterminarea poziției „zero” a mirelor hidrometrice de pe malurile Dunării în noul SCR (proiectul “Danube WATER Integrated Management” – finalizat în 2015);
- obținerea unui model de cvasigeoid local pe sectorul comun româno-bulgar, urmată de determinarea parametrilor de transformare între sistemele geodezice de referință folosite pe sectorul comun de Dunăre dintre România și Bulgaria, și furnizarea algoritmului de calcul și a parametrilor transformării (proiectul ”FAIRway Danube” – 2015-2020).

Pornind de la infrastructura geodezică de încredere, două campanii de măsurători topo-hidrografice au putut fi realizate, în anul 2017, în cadrul proiectului “FAST DANUBE” (beneficiar AFDJ Galați), care își propune elaborarea unor soluții tehnice complexe care să conducă la îmbunătățirea condițiilor de navigație pe Dunăre și, totodată, să aibă un impact minim asupra mediului. FAST DANUBE a constituit principala sursă de date a acestui studiu, alături de datele hidrologice puse la dispoziție de către INHGA.

Cantitatea imensă de date măsurate (LiDAR, batimetrie efectuată cu sonare interferometrice, profile hidrodinamice realizate cu sistem ADCP, date privind sedimentele în suspensie și din albie etc.) a constituit o provocare în ceea ce privește manipularea seturilor foarte mari de date, atât din punct de vedere al soft-urilor și licențelor utilizate, cât și din punct de vedere al componentei hardware.

Modelul hidro-sedimentar a fost elaborat cu scopul de a urmări modificările morfologice intervenite în sectorul critic Bechet-Corabia pe o perioadă de patru luni. Timpul de rulare al fiecăreia dintre cele 8 simulări efectuate pentru calibrarea și validarea modelului a fost de 6 zile. Deși s-a utilizat un calculator performant (sistem Intel(R) Xeon(R) E5-2640 (2x2.60 Hz), 64 Gb RAM), aceste tipuri de modele se pretează mai degrabă rulării pe stații grafice (Workstation) construite și pregătite să reziste solicitărilor continue pe întreaga durată a unei zile. Timpul lung de așteptare pentru obținerea fiecărui rezultat intermediar din etapa de calibrare a constituit un impediment în obținerea mai rapidă a modelului final. Au fost minim 48 de zile în care modelul a rulat continuu.

Pentru calibrarea modelelor 2D s-au folosit datele din prima campanie de măsurători (lunile aprilie-mai 2017, în total 68 de zile), în timp ce datele din a doua campanie (lunile iulie-august 2017, în total 47 de zile) au fost utilizate pentru validarea performanțelor modelelor 2D calibrate. În cazul modelării hidrodinamice, rezultatele obținute în urma calibrării și validării indică un nivel ridicat de încredere pentru cotele simulate ale suprafeței libere a apei. Acestea sunt relativ sensibile la mici ajustări ale coeficientului de rugozitate, care a fost definit diferit pentru cursul principal, insule și albia majoră.

Rezultatul final al modelării transportului sedimentar prezintă dispunerea zonelor cu probleme de pe sectorul dunărean Bechet-Corabia: pe de-o parte intervin depuneri masive de sedimente în albia fluviului, în special în punctele critice Bechet și Corabia, dar și pe canalele laterale, ceea ce împiedică desfășurarea navigației în condiții optime, iar pe de altă parte sunt

prezente numeroase zone cu eroziuni ale albiei fluviului, precum și ale malului românesc, în special din cauza substratului nisipos confirmat și de analiza probelor de sedimente prelevate (malul bulgăresc este neafectat de eroziune datorită faptului că este mai înalt și mai stâncos). Din analiza volumelor depuse/erodate, rezultă predominanța depunerilor pe acest sector critic.

Atât măsurătorile, cât și rezultatele modelului indică un transport net de sedimente relativ mic la scara intervalului de timp dintre măsurători. Această situație este în concordanță cu perioada scurtă dintre campaniile de colectare a datelor și cu nivelurile reduse ale fluviului corespunzătoare intervalului analizat.

6.2. Contribuții personale

Elaborarea acestui proiect de cercetare științifică mi-a oferit șansa de a îmbina pasiunea pentru domeniul pe care l-am studiat, cel al geodeziei, cu dorința de a evolua și de a mă perfecționa în sfera hidrotehnicii și hidrologiei, în care îmi desfășor în prezent activitatea.

Complexitatea temei abordate în cadrul tezei de doctorat a presupus studiul a numeroase lucrări științifice din domenii extrem de variate: geodezie, hidrologie, hidrotehnică, istorie, geografie sau cartografie istorică, documentarea realizându-se în mod continuu, din toamna anului 2017, până în august 2020. De asemenea, pentru îndeplinirea cu succes a obiectivelor fixate, a fost necesară parcurgerea unor cursuri de formare în domeniul modelării hidraulice și de transport de sedimente, etapă care a deschis noi orizonturi ale cunoașterii.

Originalitatea prezentei teze provine chiar din caracterul interdisciplinar al cercetării, precum și din îmbinarea metodelor specifice tehnicilor geospațiale cu cele ale modelării matematice. Mai mult, lucrarea a presupus descrierea tipurilor de măsurători geodezice executate în vederea modelării transportului sedimentar pe Dunăre, precum și a echipamentelor extrem de performante utilizate în procesul de colectare a datelor topo-geodezice.

Deși subiectul propus este unul pur tehnic, prima parte a lucrării reprezintă o incursiune în istoricul navigației pe Dunăre, aducând în prim-plan problemele de navigație întâmpinate încă din vremea romanilor și până prezent, cu accent pe zonele și punctele critice actuale. Schimbările morfologice ale albiei fluviului din ultimul secol au fost studiate în mediul GIS, pe baza materialelor cartografice vechi.

O dilemă cu care se confruntă deseori specialiștii din domeniul geodeziei, hidrologiei sau gospodăririi apelor este legată de utilizarea mai multor sisteme de referință altimetrică pe teritoriul țării noastre. De-a lungul timpului, în România au fost utilizate mai multe puncte „zero” fundamentale: „zero” Marea Neagră Sulina, „zero” Marea Adriatică, „zero” Marea Baltică. În ceea ce privește sectorul românesc al Dunării, toate hărțile batimetrice de navigație utilizează ca sistem de referință Marea Neagră cu punct „zero” fundamental Sulina. În practică, transformările de altitudini între diferite sisteme de referință altimetrică utilizate în lungul fluviului constituie și în momentul de față o adevărată provocare. Acest studiu vine în sprijinul celor care doresc să înțeleagă istoricul principalelor sisteme de referință folosite pe Dunăre și, în plus, prezintă relațiile de legătură dintre acestea. În ciuda faptului că au fost determinate în trecut, unele dintre ele au fost transpuse în format GIS pentru a facilita transformările.

Principala contribuție a acestui proiect de cercetare la rezolvarea problemelor de navigație pe sectorul dunărean Bechet-Corabia o constituie modelul hidro-sedimentar obținut, împreună cu harta dispunerii zonelor în care intervin fenomenele de eroziune, respectiv depunere de sedimente.

Elementul de noutate al studiului derivă din automatizarea fluxului de lucru pentru dezvoltarea unui model numeric, având la dispoziție cele mai moderne soft-uri de prelucrare și procesare a datelor. În același timp, **limitările** studiului sunt legate de costul foarte ridicat al licențelor soft-urilor utilizate, precum și de componenta hardware, cu rol decisiv în realizarea simulărilor.

Prezentarea detaliată a etapelor necesare obținerii modelului matematic, a pașilor urmați pentru construirea, calibrarea și validarea modelului hidro-sedimentar bidimensional, precum și traducerea termenilor de specialitate din limba engleză, reprezintă o contribuție valoroasă pentru acest domeniu, în contextul în care materialele bibliografice în limba română se găsesc într-un număr foarte limitat și sunt adesea incomplete.

Toate datele necesare construirii modelului hidro-sedimentar au fost mai întâi prelucrate prin intermediul soft-urilor GIS, CAD și de analiză statistico-matematică. De asemenea, rezultatele modelării au fost procesate și apoi prezentate sub formă de hărți tot cu ajutorul instrumentelor GIS, care oferă rapiditate și precizie în manipularea volumelor mari de date. În final, s-a realizat o bază de date geospațiale, care include atât date vectoriale, cât și raster.

6.3. Perspective

Rezultatele lucrării pot fi utile autorităților responsabile pentru îmbunătățirea condițiilor de navigație pe Dunăre, deoarece modelul hidro-sedimentar elaborat reprezintă punctul de plecare pentru implementarea unor soluții tehnice care să contribuie la asigurarea adâncimilor optime de navigație și desfășurarea transportului pe Dunăre în condiții de siguranță, pe tot parcursul anului. Continuarea efectuării măsurătorilor în teren este vitală pentru întreținerea modelului.

Indiferent de lucrările propuse (*chevroane - diguri potcoava/în arc*, epiuri, apărare de mal, realiniere șenal, dragaj, depozitare material dragat sau creare insule artificiale), la final se impune efectuarea unor simulări previzionale în contextul unei albie amenajate. Acest obiectiv ambițios nu poate fi atins fără să se țină cont de impactul lucrărilor asupra biodiversității, în special asupra florei și faunei acvatice, care trebuie protejate. Totodată, există riscul producerii unor poluări accidentale cu combustibili sau uleiuri uzate, ca urmare a funcționării barjelor, dragelor și a echipamentelor plutitoare.

Ținând cont de regimul climatic actual, o nouă direcție de cercetare poate fi elaborarea unui studiu privind evaluarea transportului sedimentar pe Dunăre în contextul schimărilor climatice cu care umanitatea se confruntă în prezent.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

1. Anderson, J. T. et al., 2008. Acoustic seabed classification: Current practice and future directions. *ICES Journal of Marine Science*, 65(6), pp. 1004-1011. 10.1093/icesjms/fsn061.
2. Bogardi, J. L., 1974. *Sediment transport in alluvial streams*, Budapest: Akademiai Kiado.
3. Bogen, J., Tharan, F. & Walling, D. E., 2003. *Erosion and sediment transport measurement in rivers: Technological and methodological advances..* Wallingford, UK: IAHS Publication 283.
4. Bondar, C., 2010. *Date privind evidențierea schimbărilor climatice și a impacturilor antropice produse asupra regimului hidrologic și morfologic al Dunării, Deltei Dunării și Mării Negre*. București: INHGA Conferința Științifică Jubiliară.
5. Budileanu, M., 2018. Evoluția gurii de vărsare Sulina pe baza modelelor numerice batimetrice. București: Ars Docendi, p. 17.
6. Chendeș, V., 2011. *Resursele de apă din Subcarpații de la Curbură. Evaluări geospațiale*. București: Editura Academiei Române.
7. Chow, V., 1959. *Open Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill, ISBN 07-010776-9.
8. Church, M., Biron, P. M. & Roy, A. G., 2012. *Gravel Bed Rivers. Processes, Tools, Environments*. s.l.:Wiley-Blackwell.
9. Cioc, D., 1975. *Hidraulică*. București: Editura Didactică și Pedagogică.
10. Diaconu, C., Blaga, O. & Lăzărescu, D., 1978. *Hidraulică și Hidrologie*, București: Editura Didactică și Pedagogică.
11. Diaconu, C. & Șerban, P., 1994. *Sinteze și regionalizări hidrologice*. ISBN/Cod: 973-31-0638-0, București: Editura Tehnică.
12. Dragomir, P., Rus, T. & Avramiuc, N., 2008. *Implementarea Sistemului de Referință Terestru European 1989 (ETRS89) în România*, București.
13. Drobot, R., 2008. URBWATER – Sistem Suport de Decizie în gestiunea situațiilor de criză generate de apă în zonele urbane. București: Editura Conspress, pp. 3-9.
14. Engelund, F. & Fredsoe, J., 1976. *A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels*. s.l.: Hydrology Research.
15. Ghițău, D., 1983. *Geodezie și gravimetrie geodezică*. București: Editura Didactică și Pedagogică.
16. Gray, J. & Simões, F., 2008. *Estimating sediment discharge*, Sedimentation Engineering-Processes, Measurements, Modeling, and Practice.. 10.1061/9780784408148.apd..
17. Ichim, I., Bătuca, D., Rădoane, M. & Duma, D., 1989. *Morfologia și dinamica albiilor de râuri*. București: Editura Academiei.

18. Ihde, J. et. al., 2002, *European Spatial Reference Systems*. Disponibil la adresa: <http://crs-geo.eu/References> [Accesat 10.03.2020].
19. Iorga, N., 1913. *Chestiunea Dunării*. Vălenii de Munte: Editura Societății „Neamul Românesc”, pp. 83-84.
20. Lemoine, F. G. et al., 1998. *The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96*, NASA Technical Report NASA/TP-1996\8-206861.
21. Lurton, X., 2010. *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*. 2nd ed. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
22. Mateescu, C., 1961. *Hidraulica*. București: Editura de Stat Didactica și Pedagogică.
23. Mayer-Gürr, T., Eicker, A. & Ilk, K., 2010. ITG-GRACE: Global Static and Temporal Gravity Field Models from GRACE Data. In: *Flechtner F. et al. (eds) System Earth via Geodetic-Geophysical Space Techniques. Advanced Technologies in Earth Sciences (2190-1643)*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10228-8_13.
24. Moisoiu, I. M., 2013. *Contribuții la culegerea datelor spațiale în bazine hidrografice prin metode geodezice și modelarea lor matematică. Teză de doctorat*. București: Universitatea Tehnică de Construcții București, Facultatea de Geodezie.
25. Moldoveanu, C., 2002. *Geodezie. Noțiuni de geodezie fizică și elipsoidală, poziționare*. București: Editura MatrixRom.
26. Moldoveanu, C., 2010. *Bazele geodeziei fizice*. București: Editura Conspress.
27. Moldoveanu, C., 2015. *Sisteme de coordonate și de referință*, București.
28. Mugnier, C. I., 2001. Grids & Datums – România. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, May, p. (p. 545–548).
29. Neuner, J., Balotă, O. & Sava, C. Ș., 2015. *Sistem topo-hidrografic inteligent pentru îmbunătățirea navigației fluviale pe sectorul românesc al Dunării*, București.
30. Olsen, N. R., 2012. *Numerical Modelling and Hydraulics*, s.l.: Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology.
31. Pail, R. et al., 2011. First GOCE gravity field models derived by three different approaches. *Journal of Geodesy*, 85, 819 (2011). <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0467-x>.
32. Pavlis, N., Holmes, S., Kenyon, S. & Factor, J., 2012. The development and evaluation of the earth gravitational model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, <http://dx.doi.org/10.1029/2011JB008916>, 117(B4).
33. Pavlis, N. K., 2011. *Geodesy and Geophysics Basic and Applied Research*, Reston: National Geospatial-Intelligence Agency (NGA).
34. Păunescu, C., Dimitriu, G. S. & Mocanu, V., 2012. *Sisteme de determinare a poziției utilizând sateliți (GNSS)*. București: Editura Universității din București.

35. Poder, K. & Hornik, H., 1989. The European Datum 1987 (ED87) - Report on the Symposium of the IAG Subcommittee for the New Adjustment of the European Triangulation (RETrig). *IAG Section 1 - Positioning, Subcommittee for the New Adjustment of the European Triangulation (RETrig)*, vol. 18.
36. Rus, T. et. al., 2019. *Developing Conversion And Transformation Parameters To Improve Navigation On Lower Danube*. Albena, Bulgaria.
37. Rus, T., Moldoveanu, C. & Danciu, V., 2014. *Geodesy Contribution to the Danube Water Project*. Albena, Bulgaria.
38. Savu, E. A., 2020. Brief History of the Height Reference Systems Used along the Romanian Sector of the Danube River. *RevCAD Journal of Geodesy and Cadastre*, vol. 28, pp. 95-104.
39. Simav, M. & Yildiz, H., 2019. Evaluation of EGM2008 and latest GOCE-based satellite only global gravity field models using densified gravity network: A case study in south-western Turkey. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, vol. 60, pp. 49-68.
40. Stănescu, V. A. & Drobot, R., 2002. *Măsuri nestructurale de gestiune a inundațiilor*. București: Editura *H*G*A*.
41. Tilleard, J. W., 2001. *River channel adjustment to hydrologic change*. PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Melbourne.
42. Torge, W., 2001. *Geodesy*. Berlin: Walter de Gruyter.
43. Trofin, E., 1974. *Hidraulică și hidrologie*. București: Editura Didactică și Pedagogică.
44. Ungureanu, V., 2005. *Geologie Marină*. București: ARS DOCENDI.
45. Vasilca, D. & Ilieș, A., 2002. Deformațiile suprafețelor în proiecțiile cartografice. *Revista de Geodezie, Nr. 1-2*.
46. Wang, S. & Wu, W., 2004. Depth-average 2D calculation of flow and sediment transport in curved channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 241-257.
47. Weiyong, Y. & Rummel, R., 2014. A comparison of GOCE Gravitational Models with EGM2008. *Journal of Geodynamics*, 73(ISSN 0264-3707), pp. 14-22.
48. ***, 2019, *Îndrumar pentru prelucrarea datelor de la stațiile hidrometrice de pe fluviul Dunărea*, Institutul Național de Hidrologie și Gospodărire a Apelor, București.
49. ***, 2016, *Science background - General concepts, ITRF & ITRS*, disponibil la adresa <http://itrf.ensg.ign.fr/general.php> [Accesat 06.10.2018].
50. ***, 2015, *Realizarea unui sistem de sprijin pentru lucrările hidrografice pe Dunăre în scopul asigurării adâncimilor minime de navigare*, Tehnogis Grup, București.