

## SIMULAREA NUMERICĂ A INUNDAȚIILOR PE RÂUL NISTRU

*Conf.dr. Viorel BOSTAN,  
student Mihail TAMBUR,  
studentă Eugenia BURLEAI*

### NUMERICAL FLOODPLAIN MODELING ON NISTRU RIVER

*In this paper a floodplain modeling on a portion of Nistru river using HEC RAS river analysis system is considered. Based on this modeling several scenarios for prevention and diminishing the inundation risks are proposed and discussed.*

#### Introducere

În iulie-august 2008, teritoriul Republicii Moldova a fost afectat de inundații pe râurile Nistru și Prut. Aceste inundații au avut un caracter excepțional și un impact socio-economic catastrofal, constând în distrugerea infrastructurii, a terenurilor arabile, degradarea mediului ambiant. Conform bilanțului oficialităților din Republica Moldova, în vara anului 2008 au fost afectate 22 de raioane din lunca râurilor

Nistru și Prut, 1183 de case au fost inundate, 7851 de persoane evacuate. Au fost distruse drumuri, fântâni, sisteme de colectare a apelor menajere, inundate 8473 hectare de terenuri agricole, inclusiv 4890 hectare de pășuni și s-au înecat peste 3000 de animale. Potrivit estimărilor oficiale, daunele constituie 120 milioane dolari (fig. 1).

Ultimul deceniu a marcat o creștere fără precedent, ca frecvență și amploare, a distrugerilor produse de inundații, sub toate formele de manifestare. Inundațiile constituie în sine fenomene hidrometeorologice naturale și sunt o componentă a ciclului hidrologic al Pământului. Inundațiile și, în special, inundațiile de proporții se consideră fenomene naturale care au marcat în trecut și continuă să marcheze profund dezvoltarea societății umane, fiind, din punct de vedere geografic, cele mai răspândite dezastre de pe glob și totodată cele mai mari producătoare de pagube materiale și umane. În același timp, inundațiile la scară mare au constituit factorul declanșator și catalizator pentru unele schimbări de proporții în modul de abordare a acestui fenomen. Tranziția de la încercările omului de a se opune local, restant și nesistematic naturii către o protecție regională și sistematică, prevenirea și estimarea riscului inundațiilor a introdus în hidrologie o nouă viziune a managementului inundațiilor.



Figura 1. Inundația din s.Purcari, r-l Ștefan Vodă

Practica mondială a demonstrat că inundațiile de cele mai multe ori nu au cum să fie evitate, însă ele pot fi prevenite, evoluția lor poate fi monitorizată și gestionată, iar consecințele negative pot fi reduse substanțial printr-un proces sistematic care include un șir de măsuri și acțiuni menite să contribuie la diminuarea riscului asociat acestor fenomene. Managementul inundațiilor poate conduce la evitarea sau diminuarea substanțială a pagubelor grație faptului că locul lor de manifestare poate fi predictibil și deseori poate fi anunțată o posibilă avertizare a locației, dimensiunii și caracterului viiturii.

Un prim pas spre elaborarea unui nou concept în managementul inundațiilor din Republica Moldova constă în crearea unui model numeric virtual și simularea în baza acestuia a diferitor scenarii de inundații pentru a determina și întreprinde un șir de măsuri eficiente de prevenire, protecție și diminuare a efectelor negative a inundațiilor. În toamna anului 2008, Academia de Științe a Moldovei s-a adresat Universității Tehnice a Moldovei cu rugămintea de a crea un grup de cercetare în acest domeniu. Astfel, Senatul UTM a decis formarea unei echipe de cercetare pe proiectul de importanță națională „Modelarea numerică a inundațiilor în Republica Moldova”, în componența căruia au fost incluși și câțiva studenți de la Facultatea de Calculatoare, Informatică și Microelectronică.

### Aplicația HEC-RAS

Dat fiind faptul că este cunoscută istoria debitului apei la barajul Dubăsari, pentru început s-a decis crearea modelului numeric hidrologic al porțiunii râului Nistru cuprins între baraj și zona de agrement Vadul lui Vodă. În urma unui studiu amplu pentru realizarea modelului computerizat s-a decis utilizarea aplicației HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) elaborat de către US Army Corps of Engineers. Aplicația HEC-RAS s-a recomandat în domeniul hidrologic ca fiind un program complex, cu multe funcționalități și, nu în ultimul rând, fiabil. Rolul aplicației descrise în această lucrare constă în posibilitatea de a analiza comportamentul dinamic al nivelului apei din albia râului Nistru, comportament cauzat de diverși factori externi. Vizualizarea comportamentului apei în zonele din vecinătatea albiei râului și efectul de protecție a digurilor riverane permit elaborarea unui șir de măsuri preventive în momentele critice.

Aplicația HEC-RAS 4.0 este un sistem predestinat analizei hidrologice a râurilor. Acest program permite analiza unidimensională a mișcării permanente gradual variate cu suprafață liberă și a mișcării neuniforme rapid variate cu suprafață

liberă. HEC-RAS 4.0 este un sistem soft integrat, proiectat pentru utilizare interactivă, care permite multi-tasking, și multi-user prin conectare în rețea. Sistemul conține o interfață pentru utilizator (GUI), componente separate ale analizei hidrologice, sistem de stocare a datelor, managementul funcționalităților sistemului și facilități care țin de generarea rapoartelor și vizualizărilor grafice. În cele din urmă, sistemul conține trei componente ale analizei hidrologice unidimensionale:

- a) calculul suprafeței libere a apei în cadrul unui flux permanent gradual variat;
- b) calculul suprafeței libere a apei în cadrul unui flux rapid variat;
- c) calculul modificărilor formei albiilor grație sedimentației și eroziunii acesteia.

Elementul cheie constă în faptul că toate componentele utilizează o reprezentare comună a parametrilor geometrici ai albiei râului și rutine comune de calcul geometric și hidrologic. În plus, sistemul conține câteva caracteristici de proiectare care pot fi apelate după calculul suprafeței libere a apei.

Parametrii geometrici ai unui râu constau în stabilirea conexiunilor și caracteristicilor sistemului de afluenți realizate prin introducerea parametrilor geometrici ai secțiunilor transversale, stabilirea și definirea datelor referitoare la joncțiuni (nodurile în care râul se conectează cu afluenții), includerea construcțiilor hidrologice și hidrotehnice (poduri, țevi, diguri, zăgazuri, pompe) și interpolarea secțiunilor transversale.

Modelarea comportamentului dinamic al unui râu în cadrul aplicației HEC-RAS se bazează pe ecuațiile de conservare a energiei și impulsului integrate numeric prin scheme cu diferențe finite. Modelul este unidimensional, ceea ce înseamnă că obiectul hidrologic, râul, este discretizat de-a lungul liniei sale mediane prin localizarea unui set de secțiuni transversale cu proiecția albiei râului și ariilor adiacente pe două coordonate, axa stațiilor și axa altitudinilor (adâncimilor). Într-un astfel de model nu este luată în considerație direcția vitezei volumului de apă. În cazul mișcării permanente gradual variate, determinarea nivelului apei în cadrul fiecărei secțiuni transversale considerate se realizează printr-un procedeu iterativ, rezolvând numeric ecuația energiei. Aceasta din urmă, pentru două secțiuni transversale adiacente este:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e,$$

unde  $Y_1$  și  $Y_2$  sunt înălțimile nivelului apei în secțiunile transversale adiacente  $S_1$  și  $S_2$ ,  $Z_1$  și

$Z_2$  sunt altitudinile patului albiei,  $V_1$  și  $V_2$  sunt vitezele medii ale apei,  $\alpha_1$  și  $\alpha_2$  sunt coeficienții de pondere a vitezei,  $g$  este accelerația gravitațională, iar  $h_e$  este pierderea de energie. Pierderea de energie se determină din relația

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|,$$

unde  $L$  reprezintă distanța ponderată dintre secțiuni,  $\bar{S}_f$  este panta de frecare reprezentativă dintre secțiuni și  $C$  este coeficientul de pierdere prin contracție sau extindere. Distanța ponderată și panta reprezentativă pentru secțiunile adiacente sunt calculate prin relațiile

$$\bar{S}_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2,$$

$$L = \frac{L_s \bar{Q}_s + L_m \bar{Q}_m + L_d \bar{Q}_d}{\bar{Q}_s + \bar{Q}_m + \bar{Q}_d},$$

unde  $K$  este pierderea la transport,  $L_s$ ,  $L_m$  și  $L_d$  sunt distanțele medii dintre secțiuni pentru malul stâng, canalul principal și malul drept, respectiv, iar  $\bar{Q}_s$ ,  $\bar{Q}_m$  și  $\bar{Q}_d$  reprezintă fluxul apei dintre secțiuni pentru malul stâng, canal și malul drept. Pierderea la transport și fluxul pentru fiecare subdiviziune a secțiunii (malul stâng, canal, malul drept) se calculează după cum urmează:

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3},$$

$$Q = KS_f^{1/2},$$

unde  $n$  este coeficientul de rugozitate Manning a subdiviziunii,  $A$  este aria fluxului de apă în subdiviziune și  $R$  este raza hidraulică. Pierderea totală la transport într-o secțiune se obține însumând pierderile la transport în subdiviziuni. Coeficientul compus de rugozitate Manning se calculează din relația

$$n_c = \left( \frac{\sum_{i=1}^N P_i n_i^{1.5}}{P} \right)^{2/3},$$

unde  $P$  este perimetrul umed al canalului principal,  $P_i$  este perimetrul umed al subdiviziunii  $i$ , iar  $n_i$  este coeficientul de rugozitate Manning al subdiviziunii.

În cazul mișcării (permanente) neuniforme rapid variate, pentru determinarea suprafeței libere a apei în fiecare secțiune se utilizează ecuația conservării impulsului redusă la forma

$$\frac{Q_2 \beta_2}{g A_2} + A_2 \bar{Y}_2 + L \left( \frac{A_1 + A_2}{2} \right) (S_0 - \bar{S}_f) = \frac{Q_1 \beta_1}{g A_1} + A_1 \bar{Y}_1,$$

unde  $\beta$  reprezintă coeficientul impulsului,  $\bar{Y}$  este adâncimea măsurată prin centrul de greutate a secțiunii,  $Q$  este fluxul, aceste mărimi fiind calculate pentru secțiunile adiacente  $S_1$  și  $S_2$ .  $S_0$  și  $\bar{S}_f$  reprezintă panta medie dintre secțiuni și panta reprezentativă.

Informația despre râu și zona de inundare se extrapolează pe întreaga arie utilizând nivelul suprafeței libere a apei și fluxul calculate pentru fiecare secțiune.

### Elaborarea modelului numeric și analiza hidrologică

Pentru realizarea modelului numeric și simulării computaționale a inundațiilor pe râul Nistru s-a utilizat următorul set de date inițiale: harta topografică a zonei de interes, istoria debitului de apă pentru perioada de timp de interes, limita maxima a apei în cazul inundațiilor istorice de proporții mari, locația exactă și caracteristicile tehnice ale digurilor din vecinătatea râului, podurilor și altor componente de infrastructură hidrotehnică, coeficienții de rugozitate Manning. În cazul proiectului dat, inițial, au fost prelucrate hărțile topografice a zonelor Dubăsari – Coșnița și Coșnița – Vadul lui Vodă la scara 1:50000. Pentru a crea un model funcțional și adecvat s-au folosit aplicațiile geografice și hidrologice: ArcGis 9.1, HEC-Geo-RAS și HEC-RAS 4.0 (fig. 2).

Prima etapă a modelării a constat în crearea modelului geometric și localizarea secțiunilor transversale prin intermediul suitei de aplicații ale geografiei informaționale ArcGis elaborate de ESRI. Avantajul acestor aplicații constă în posibilitatea creării unui model compatibil cu HEC-RAS, compatibilitate realizată prin intermediul modulului HEC-Geo-RAS. În cadrul aplicațiilor ArcGis, hărțile topografice ale zonei de interes au fost transformate dintr-un model raster într-un model vectorizat. Această transformare a permis exportul datelor reale. Dat fiind faptul că în anii precedenți, conform observațiilor, nivelul apei în timpul inundațiilor catastrofale nu s-a ridicat mai mult de 8-10 m deasupra nivelul normal al râului, iar oglinda apei râului Nistru în zona de interes se afla în medie la altitudinile de 10-12 m, au fost vectorizate liniile de nivel corespunzătoare altitudinilor de 15, 20, 25, 30, 35 și 40 m. În continuare au fost vectorizate și proiectate peste zona de interes următoarele straturi: linia mediană a râului, malurile, linia fluxului principal al apei în timpul inundației, digurile, zonele ineficiente, obstacole permanente și, în final, secțiunile transversale.



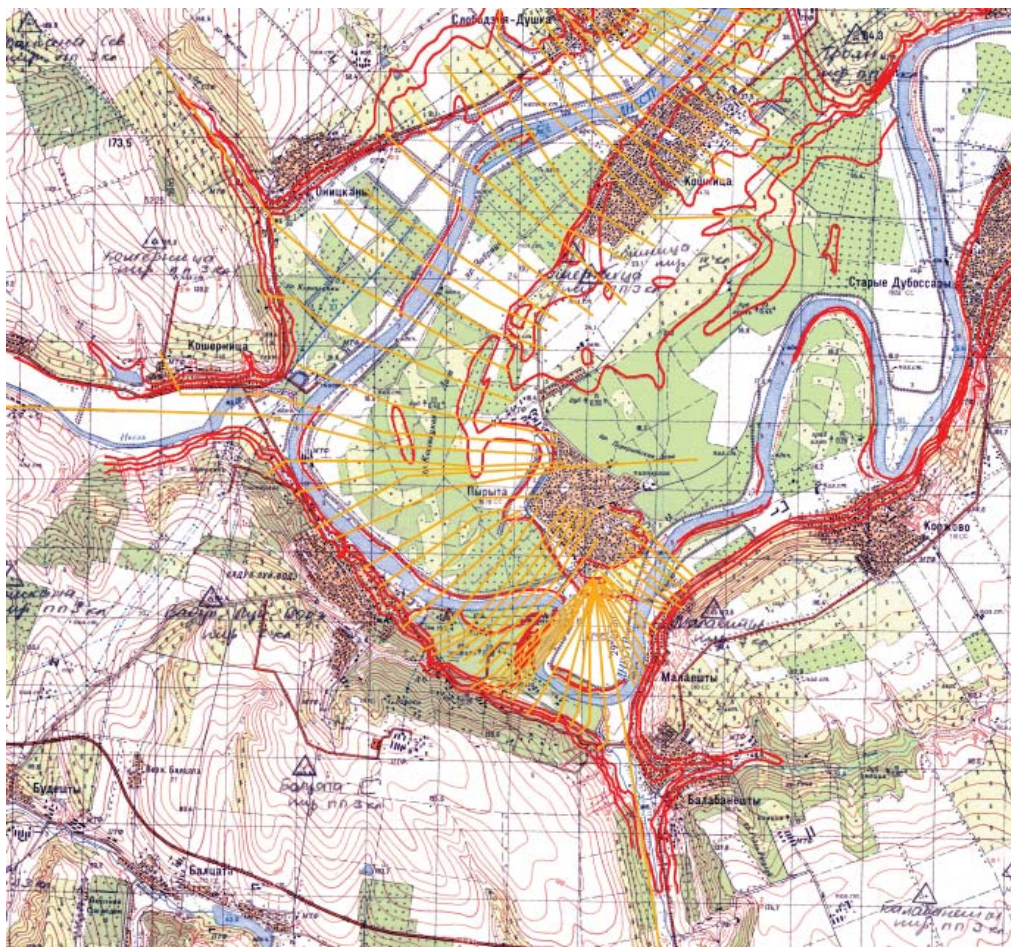


Figura 2. Segmentul Coșnița–Vadul lui Vodă cu toate straturile

Următoarea etapă a constat în exportul modelului din ArcGis în HEC-RAS, editarea și completarea acestuia. Dat fiind faptul că zona de interes se întinde pe o distanță de aproximativ 35 km de-a lungul râului Nistru, au fost considerate 108 secțiuni transversale. O secțiune transversală este prezentată în fig.3 și fig.4. Această secțiune conține un dig în partea stânga. Plaja este situată în partea dreaptă unde liniile de nivel ajung maxim la o altitudine de 20 m. Evident că această regiune risca să fie inundată.

Distanța medie între secțiuni s-a luat de 100-200 m, în regiunile critice sau la cotituri distanța fiind de 50 m. Fiecare secțiune este descrisă prin 50-100 puncte, iar în cazul secțiunilor mai lungi până la 200 puncte. De asemenea, modelul conține două poduri, 57 km de diguri cu înălțimi de 3-5 m și 8 zone ineficiente (zone inundate care nu contribuie la transportul fluxului de apă). Modelul descrie nu numai albia râului, ci și zonele adiacente, lățimea acestora variind în limitele 300-3000 m. Valorile coeficienților de rugozitate Manning s-au luat în funcție de caracterul albiei, al reliefului și vegetației din vecinătatea râului. Așa cum în marea majoritate albia râului este nisipoasă, acest coeficient a fost luat de 0,035, iar zonele din vecinătatea râului poartă un

caracter forestier sau pășune, de aceea pentru malurile drepte și stânga valoarea medie a coeficientului de rugozitate Manning s-a luat 0,03-0,04.

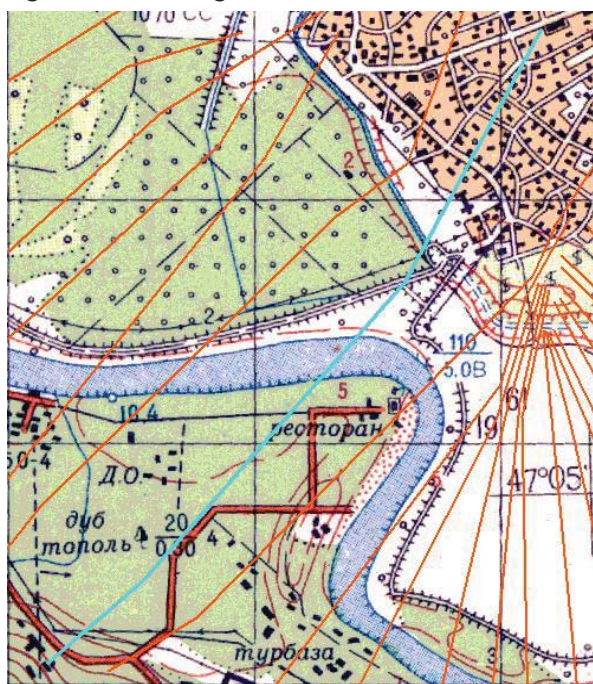


Figura 3. Amplasarea unei secțiuni de la Vadul lui Vodă pe harta topografică



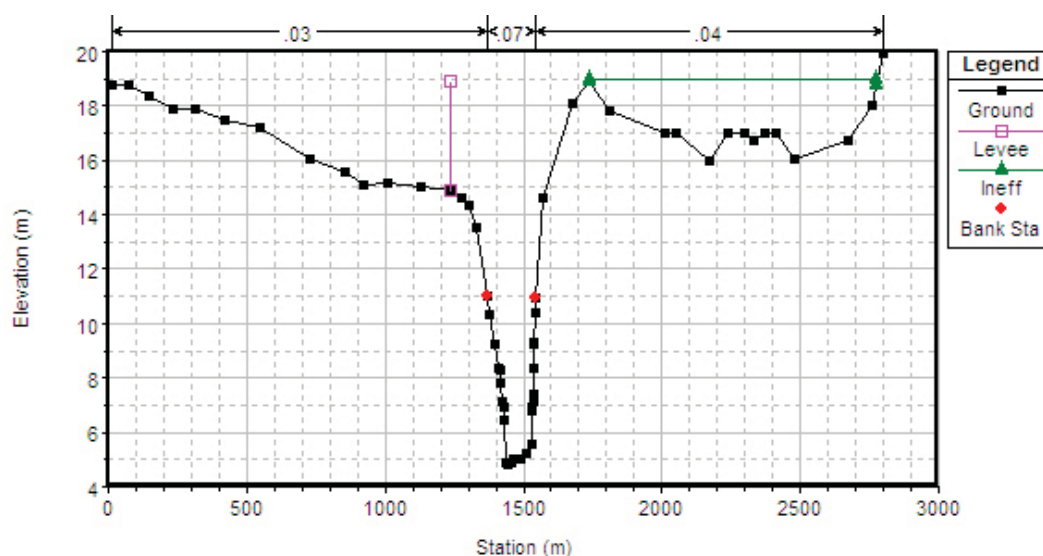


Figura 4. Secțiunea transversală de la Vadul lui Vodă

A treia etapă a constat în analiza hidrologică a râului care necesită descrierea istoriei debitului apei pentru perioada de timp de interes. Debitul inițial al apei la barajul Dubăsari a fost setat ca fiind debitul corespunzător stării normale a râului cu valoarea de  $314 \text{ m}^3/\text{s}$ . Potrivit datelor obținute de la Apele Moldovei, în perioada de criză, pentru a evita ruperea

simularea numerică și observațiile reale se datorează în primul rând inexactității parametrilor topografici și celor disponibili ale albiei râului, hărțile topografice utilizate fiind din anii 1980 și la o scară insuficientă. Cu alte cuvinte, datele topografice, altitudinile, distanțele, caracteristicile digurilor de pe aceste hărți nu corespund exact realității. Pe de

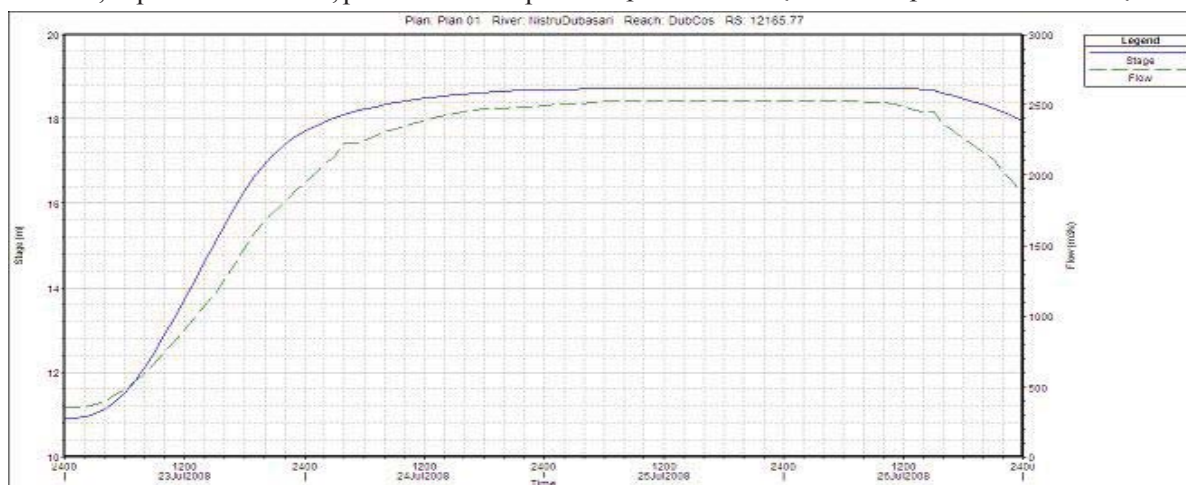


Figura 5. Istoria debitului de apă de la barajul Dubăsari

barajului de la Dubăsari, debitul maxim a ajuns la  $2600 \text{ m}^3/\text{s}$ . Acest scenariu a fost implementat în modelul hidrologic prezentat în fig.5. De asemenea, au fost introduse condițiile la limită (înclinarea pantei la ultima secțiune transversală).

#### Diseminarea rezultatelor

Rezultatele simulării au fost în concordanță cu observațiile de pe teren înregistrate până la viitură și în timpul acesteia, fig.6-8. Astfel, nivelul maxim al apei a fost înregistrat în regiunea zonei de agrement Vadul lui Vodă fiind de  $18,75 \text{ m}$ . Observațiile de pe teren, înregistrate în perioada preconizată în aceeași regiune, indică nivelul maxim al apei de  $19,25 \text{ m}$ . Diferența de doar  $0,5 \text{ m}$  dintre valorile obținute prin

altă parte, simulările efectuate s-au bazat pe debitul maxim de  $2600 \text{ m}^3/\text{s}$ , deși ulterior organele abilitate au vehiculat un alt debit, de  $2850 \text{ m}^3/\text{s}$  (conform datelor serviciului de stat hidrometeo). De asemenea, nu au fost disponibile datele referitoare la vegetație și tipul solului din vecinătatea râului, aceste date fiind necesare pentru determinarea cât mai exactă a coeficienților de rugozitate Manning. Din punctul de vedere al preciziei și stabilității metodelor numerice utilizate, calculul numeric a fost stabil cu o eroare relativă minimă (de  $0,5 \text{ m}$ ).

#### Trei scenarii de reducere a consecințelor negative

În urma cercetărilor efectuate au fost elaborate trei scenarii de prevenire a viiturii și reducere a

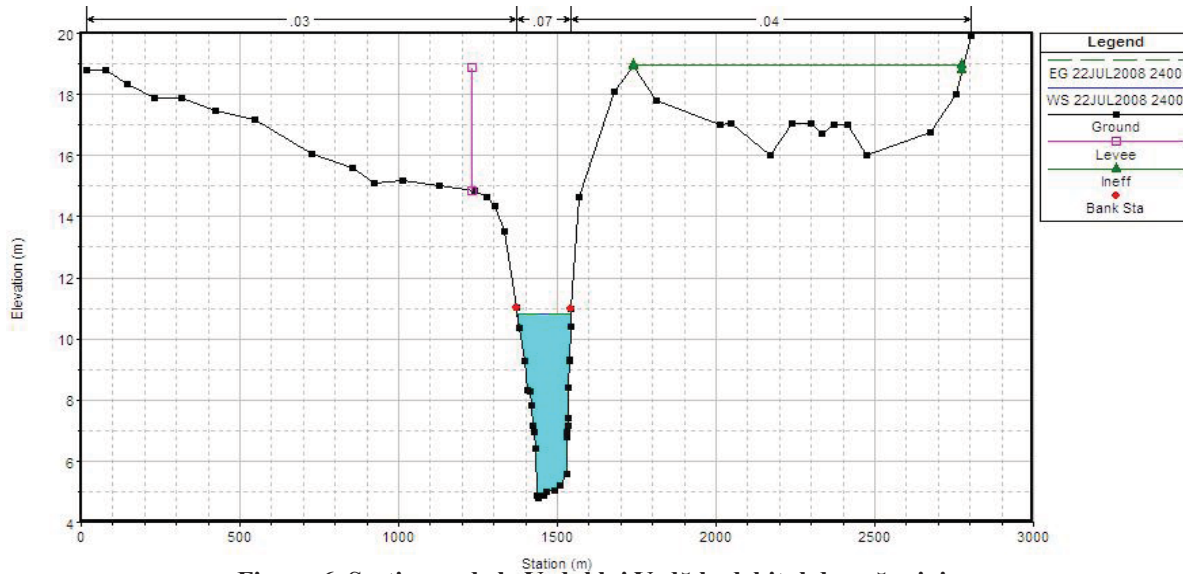


Figura 6. Secțiunea de la Vadul lui Vodă la debitul de apă minim

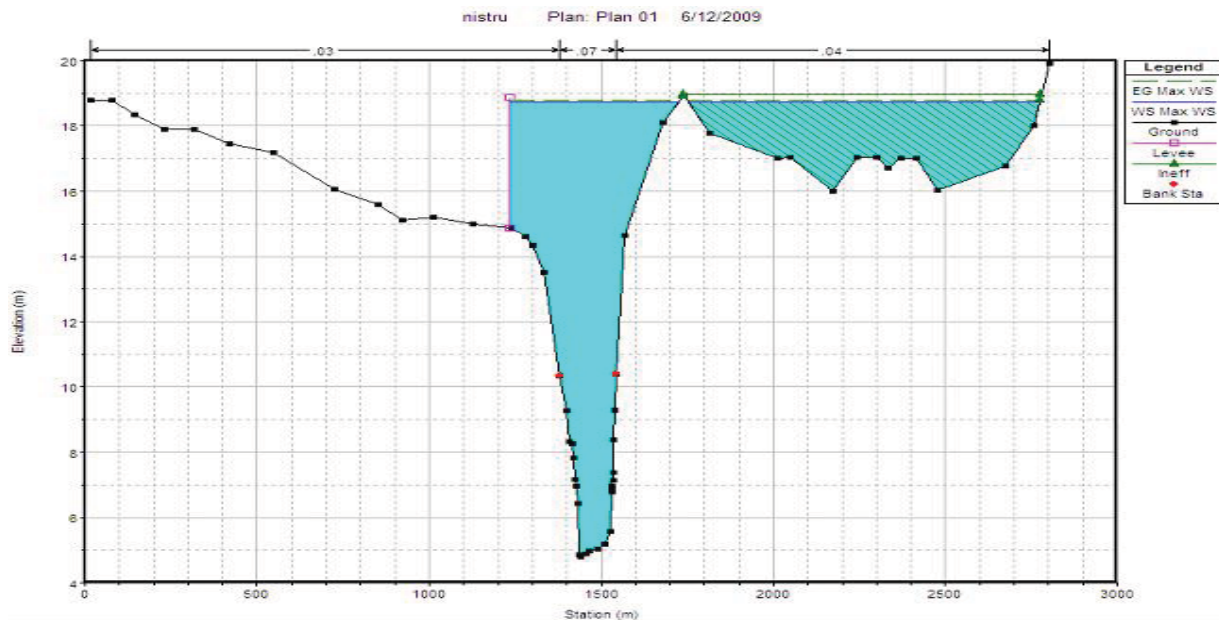


Figura 7. Secțiunea de la Vadul lui Vodă la debitul de apă maximal

consecințelor negative: inundarea deliberată a unor zone, ridicarea digurilor în zonele vulnerabile, controlul debitului apei la barajul Dubăsari.

**Scenariul I.** În cadrul acestui scenariu se preconizează inundarea deliberată a anumitor zone puțin populate ce ar conduce la un cost minim al pagubelor. În urma simulării s-a stabilit că nivelul apei în regiunea Vadul lui Vodă nu s-a redus semnificativ, dat fiind faptul că debitul de apă era mult prea mare pentru ca aceste zone să influențeze radical situația reală. Cum valea râului Nistru pe acest segment este dens populată, mărirea acestor zone este imposibilă.

**Scenariul II.** Soluția structurală de diminuare a consecințelor inundațiilor constă în amplasarea

adițională a 12,5 km de diguri cu înălțimea de până la 1,5 m, soluție care poate fi considerată mai eficientă. Simularea numerică a arătat că digurile au protejat parțial zonele de interes.

**Scenariul III.** Acesta prevede că evacuarea apei din lacul de acumulare Dubăsari urmează să înceapă cu 50 ore mai devreme, debitul maxim ajungând până la 1000 m<sup>3</sup>/s. În urma acestui scenariu, zona inundată a segmentului Dubăsari – Vadul lui Vodă ar fi fost redusă la minimum (fig.9). Considerăm că anume din cauza întârzierii evacuării apei din lacul de acumulare Dubăsari (întârziere de la 8 la 50 ore) au sporit esențial consecințele negative ale viiturii și, implicit, impactul socio-economic.



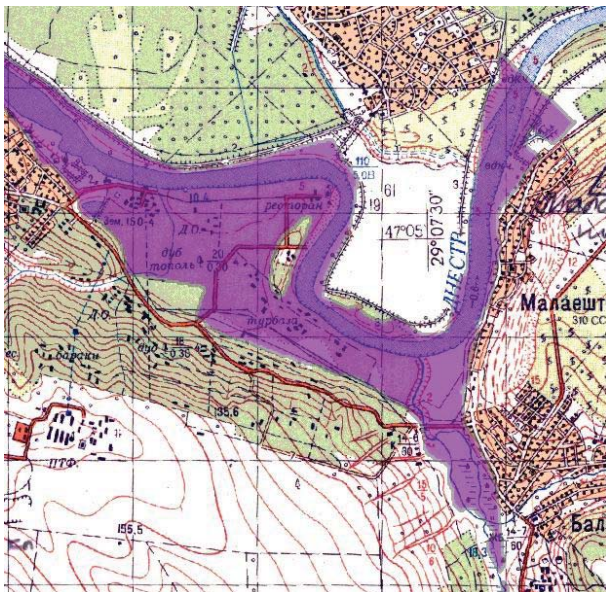


Figura 8. Zona inundată de la Vadul lui Vodă

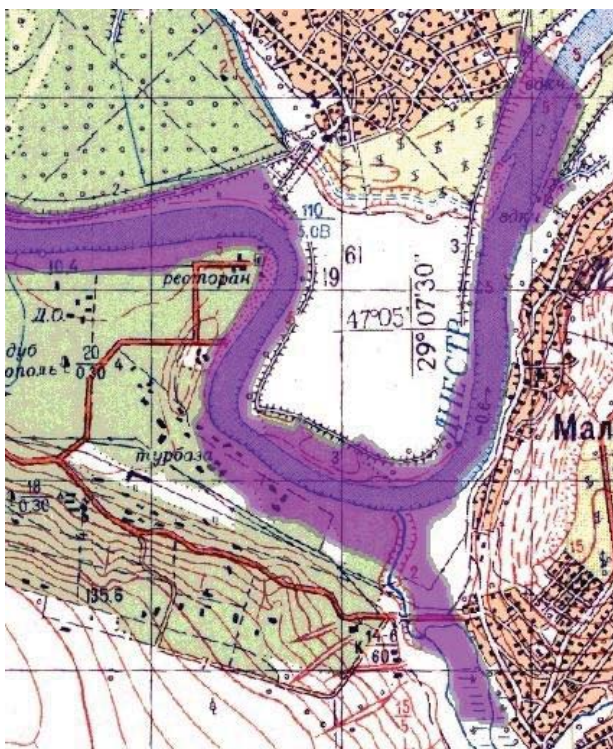


Figura 9. Zona inundată de la Vadul lui Vodă

### Concluzii

În pofida inexactității datelor inițiale, rezultatele simulării efectuate sunt în concordanță cu observațiile făcute pe teren și pot fi considerate adecvate realității. Pentru a îmbunătăți gradul de fiabilitate a modelului hidrologic și, respectiv, a rezultatelor simulării numerice, este necesar: 1. De a vectoriza hărțile topografice actualizate la scară mai mică în combinație cu efectuarea unui studiu detaliat al patului albiei râului Nistru în vederea obținerii secțiunilor transversale submersate. 2. De asemenea, trebuie incluse în model toate structurile hidrotehnice amplasate de-a lungul râului Nistru, cum ar fi stațiile de pompare a apei, lacurile

de acumulare, canalele de irigație etc. 3. Este imperios să se facă și observații pe teren pentru a detalia caracterul malurilor și terenurilor adiacente. 4. Un alt aspect ar fi extinderea modelului hidrologic prin adăugarea afluenților râului Nistru, cum ar fi r. Răuț și r. Ichel, și luarea în considerație a fluxului lateral de apă datorat precipitațiilor. 5. Considerăm că doar luând în calcul prevederile p. 1-4 putem afirma că a fost creat un model-cadru hidrologic solid pentru simularea inundațiilor pe această porțiune a râului Nistru. 6. Existența unui astfel de model va permite implementarea virtuală a diferitor scenarii de viitor pe râu, în urma analizei rezultatelor cărora va fi posibilă elaborarea măsurilor structurale și nestructurale de protecție și prevenire a efectelor dezastruoase ale inundațiilor.

Pagubele socio-economice enorme provocate de inundațiile 2008 cu certitudine ne demonstrează că cercetările în domeniu trebuie extinse ca să devină prioritate națională ca subiect de cercetare.

Pentru a identifica complexul de măsuri structurale și nestructurale, menite să excludă sau să diminueze la maximum pagubele inundațiilor, este necesar de a extinde zonele (porțiunile) râului Nistru supuse cercetărilor. Ar fi oportun ca cercetările în domeniu să demareze și pentru râul Prut, în special în zona de jos până la gurile de revărsare în Dunăre.

### Bibliografie

1. Arcement G.J., Schneider V.R., Guide for selecting Manning's roughness coefficient for natural channel and floodplains, US Survey society press, 1989
2. Barkau, R.L, 1985, A mathematical model of unsteady flow through a dendritic network, 1995
3. George Emanuel, Analytical Fluid Dynamics, Second Edition, Springer Verlag, 2000
4. David R. Markwood, Floodplain Modeling and Delineation using Hec-GeoRAS for support of HEC-RAS, December 14, 2008
5. Federal Highway Administration, Evaluating Scour at Bridges, Hydraulic Engineering Circular No. 18, U.S. department of Transportation, Washington D.C., 1995
6. Federal Highway Administration, User's MANUAL for WSPRO - A computer model for water surface profile computations, Publication No. FHWA-IP-89-07, 177p., 1990
7. Hydrologic Engineering Center, HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, U.S Army Corps of Engineers, Davis, CA, 1996
8. Hydrologic Engineering Center, HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic User's Manual, U.S Army Corps of Engineers, Davis, CA, 1996
9. Hydrologic Engineering Center, A One-Dimensional Unsteady Flow Through a Full Network of Open Channels, User's Manual, U.S Army Corps of Engineers, Davis, CA, 1995 UNET
10. V.A.Stănescu, R.Drobot, Măsuri nestructurale de gestiune a inundațiilor, Ed. HGA, București, 2002
11. P.Wesseling, Principles of computational fluid dynamics, Springer Series in computational mathematics 29, Springer, 2001