

## CURS VII

### Modelarea scurgerii în bazine hidrografice

#### Programe de modelare a scurgerii solide în bazine hidrografice

1. Modelul **USLE**– Universal Soil Loss Equation – se află în continuă dezvoltare din 1960, primul care l-a pus sub forma cunoscută azi a fost W.H. Wischmeier (USDA) din SUA, a fost testat pe bazine hidrografice din vestul SUA.

- se bazează pe ecuația universală a pierderilor de sol, scrisă sub diverse forme (USLE, RUSLE, MUSLE). Forma cea mai uzuală este (semnificația termenilor vezi curs IV):

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Modelul se poate utiliza pentru:

- prognozarea cantității medii de sol pierdute în decursul unui an pentru o suprafață dată și în condiții date (termenul din paranteză indică factorul care se calculează):

$$(A) = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2)$$

- determinarea lucrărilor de combatere a eroziunii solului necesare unei zone specifice și a folosinței care se pretează – se înlocuiește A cu T – limita admisibilă a pierderilor de sol:

$$(C \cdot P) = T \cdot R^{-1} \cdot K^{-1} \cdot L^{-1} \cdot S^{-1} \quad (3)$$

- estimarea pierderilor de sol la schimbarea folosinței terenului, adică a coeficientului C:

$$(A) = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot [C] \cdot P \quad (4)$$

- estimarea pierderilor de sol la schimbarea lucrărilor de combatere a eroziunii solului, adică a coeficientului P:

$$(A) = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot [P] \quad (5)$$

- prognoza cantității de sol pierdute la alte folosințe ale terenului (amplasamente ale unor construcții, păduri, zone de recreere etc):

$$(A) = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (6)$$

2. *Modelul **CREAMS*** – A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management System – dezvoltat în 1980 de Department of Agriculture (USDA) și Science and Education Administration-Agriculture Research (SEA-AR) din SUA, a fost testat în mai multe țări din SUA și Europa.

Modelul are trei componente: componenta hidrologică (scurgere, infiltrație, evapotranspirație, percolație), componenta erozională (eroziune de suprafață, eroziuni și depuneri din albi) și componenta chimică (transportul de către sedimente a substanțelor chimice din sol). Modelul poate opera pentru o singură ploaie torențială, dar poate da și prognoze pe termen lung (2 – 50 ani).

Componenta hidrologică a modelului se bazează pe relațiile dezvoltate de Williams și La Seur în 1976 – modelul scurgerii de suprafață - și pe modelul de evapotranspirație al lui Ritchie din 1972; componenta erozională se bazează pe ecuația universală a pierderilor de sol modificată MUSLE, dar este inclusă și capacitatea de transport a scurgerii de suprafață; iar componenta chimică se bazează pe descrierea proceselor de mineralizare, nitrificare și denitrificare și pe determinarea concentrației substanțelor chimice din apa încărcată cu sedimente.

Modelul se poate aplica considerând următoarele ipoteze: o singură folosință a terenului, sol relativ omogen, intensitatea ploii distribuită uniform pe toată suprafața studiată.

3. *Modelul **PERFECT*** - Productivity Erosion Runoff Functions to Evaluate Conservation Techniques - dezvoltat inițial în 1983 de Queensland Department of Primary Industries, continuat apoi de National Soil Conservation Program și de Land and Water Resources Research and Development Corporation din Australia, a fost testat cu succes în regiunile subtropicale din Australia, dar a dat rezultate bune și pentru zonele semiaride din Queensland și India.

PERFECT este un model biofizic de simulare a interacțiunilor plantă – sol – apă – management în sistemele agricole. A fost dezvoltat pentru a simula efectele majore ale managementului și factorilor de mediu asupra sistemului agricol și pentru a prognoza volumul scurgerii de suprafață, pierderile de sol, bilanțul apei din sol, infiltrațiile, sporul de recoltă și productivitatea terenurilor. Modelul conține mai multe module pentru simularea bilanțului apei din sol, pentru prognoza productivității, gradului de protecție a terenului de către vegetație, cantității de resturi vegetale, a pierderilor de sol ca urmare a proceselor de eroziune (figura 1).

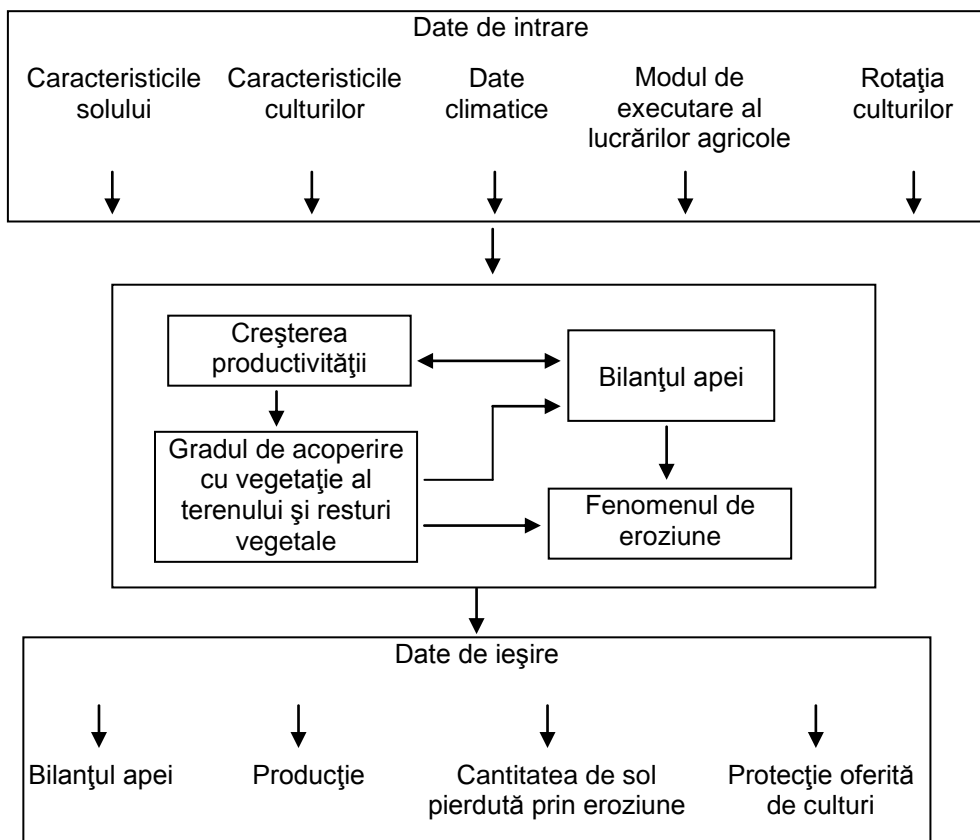


Fig.1 Modulele PERFECT

Ecuțiile modului referitoare la eroziune se bazează pe relația MUSLE și sunt:

$$E = (16.52 - 0.46COVER + 0.0031COVER^2) LS.K.P. \frac{Q}{10} \quad COVER < 50\% \quad (7)$$

$$E = (-0.0254 COVER + 2.54) LS.K.P. \frac{Q}{10} \quad COVER \geq 50\% \quad (8)$$

unde: E – pierderea de sol la o ploaie torențială (t/ha); Cover – gradul de acoperire al solului dat de vegetație (%); Q – volumul scurgerii; K – coeficientul de erodabilitate al solului; LS – factorul dat de lungime și pantă; P – coeficientul dat de lucrările de combatere a eroziunii solului.

Pentru calculul lui LS se folosesc relațiile:

$$LS = \left[ \frac{\lambda}{72.6} \right]^{(\beta/1+\beta)(10.8 \sin(\theta)+0.03)} \quad \text{Slope} < 9\% \quad (9)$$

$$LS = \left[ \frac{\lambda}{72.6} \right]^{(\beta/1+\beta)(16.8 \sin(\theta)-0.5)} \quad \text{Slope} \geq 9\% \quad (10)$$

$$\lambda = 3.281\sqrt{\text{LENGTH}^2 + \text{AHT}^2} \quad (11)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\text{AHT}}{\text{LENGTH}}\right) \quad (12)$$

$$\text{AHT} = \frac{\text{SLOPE} \cdot \text{LENGTH}}{100} \quad (13)$$

unde: SLOPE - panta versantului (%); LENGTH - lungimea versantului (m);  $\beta$  – raportul dintre microrigole și suprafața dintre microrigole, definit de utilizator.

4. Modelul **EPIC** – Erosion - Productivity Impact Calculator, dezvoltat în 1983 de Williams, J.R., P.T. Dyke și C.A. Jones (USDA) din SUA. Este un model de simulare pentru prognoza efectelor pe termen lung a diverselor forme de eroziune asupra productivității terenurilor [Williams et al, 1983]. Modelul este folosit în peste 60 de țări din Asia, America de Sud și Europa. Modelul necesită date de intrare date de GIS – topografice – date climatice, de asemenea necesită date referitoare la soluri, folosințe ale terenurilor. Și acest model are mai multe module referitoare la: eroziunea solului, analiză economică, procese hidrologice, climatice, nutrienți, dinamica dezvoltării plantelor, managementul terenului.

5. Modelul **AGNPS** – Agricultural NonPoint Source – a fost dezvoltat în 1988 de către USDA în colaborare cu Minnesota Pollution Control Agency, a fost testat pe bazine hidrografice din nordul și centrul SUA, cu rezultate bune. Scopul principal pentru care a fost creat este acela de a prognoza calitatea apei (influențată de surse de poluare difuză – transportul substanțelor chimice de către particulele de sol provenite din eroziunea de suprafață) din bazinele hidrografice cu folosință predominant agricolă și pentru a evalua influența efectelor diferitelor folosințe ale terenului asupra calității apei. Schema modelului este:

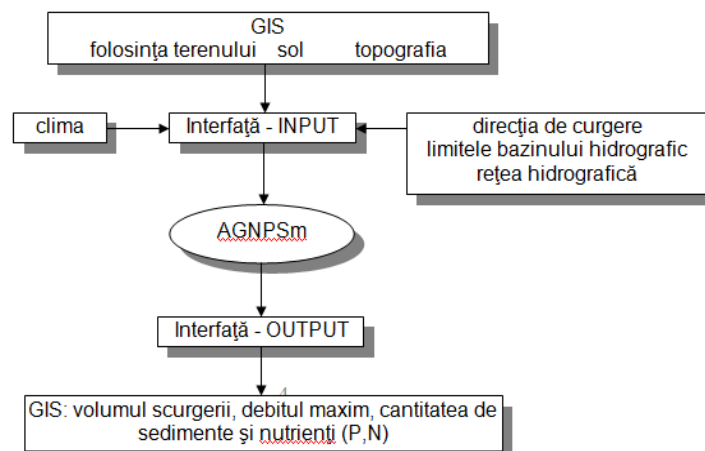


Fig.2 Schema modelului AGNPS

Pentru a putea aplica modelul de prognoză e nevoie de discretizarea bazinului hidrografic, se împarte suprafața bazinului hidrografic în elemente pătrate cu aceeași suprafață (figura 3). Pentru fiecare element trebuie determinați 22 de caracteristici (panta medie a terenului, panta medie a albiei, textura solului, folosința terenului, nivelul de fertilizare cu îngrășăminte chimice etc.).

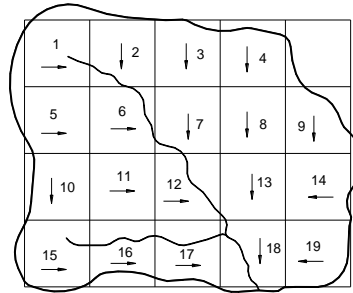


Fig.3 Discretizarea bazinului hidrografic

Modelul se bazează pe următoarele ecuații:

- modulul hidrologic are la bază metoda curbelor SCS, dezvoltată de USDA în 1972 – care determină volumul scurgerii de suprafață la o singură ploaie torențială, în funcție de grupa hidrologică de sol și folosința terenului (curbe  $V = V(P)$ ), cu formula:

$$V = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad (14)$$

unde:  $V$  – volumul scurgerii de suprafață;  $P$  – înălțimea precipitației;  $S$  – cantitatea maximă de apă reținută pe versant.

- debitul maxim al scurgerii se determină cu relația Smith – Williams, [Smith et al, 1980]:

$$Q_{\max} = 3.79A^{0.7}I^{0.16} \left( \frac{V}{25,4} \right)^{0.903A^{0.017}} \left( \frac{L^2}{A} \right)^{-0.19} \quad (15)$$

unde:  $A$  – suprafața bazinului hidrografic;  $I$  – panta medie a albiei;  $L$  – lungimea versantului după linia de cea mai mare pantă.

- pierderile de sol prin eroziunea de suprafață se calculează cu USLE, 1978
- depunerea materialului solid transportat de scurgerea de suprafață se calculează cu relația dezvoltată de Foster (1981) și Lane (1982) [Lane, 1982]:

$$D(x) = \frac{w}{q(x)} [q_s(x) - g_s(x)] \quad (16)$$

unde:  $D(x)$  – rata de depunere a sedimentelor ( $\text{kg/s.m}^2$ );  $w$  – mărimea hidraulică a particulelor ( $\text{m/s}$ );  $q(x)$  – debitul lichid pe unitatea de lățime ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $q_s(x)$  – debitul solid pe unitatea de lungime ( $\text{kg/s.m}$ );  $g_s(x)$  – capacitatea de transport efectivă a scurgerii de suprafață ( $\text{kg/s.m}$ ).

- capacitatea de transport se determină cu relația lui Bagnold [*Bagnold, 1966*]:

$$g_s = e_t \cdot k \cdot \tau \cdot \frac{v_a}{w} \quad (17)$$

unde:  $e_t$  – coeficient;  $k$  – factor de transport efectiv;  $\tau$  – efortul tangențial ( $\text{kg/m}^2$ );  $v_a$  – viteza medie a apei.

6. Modelul **EUROSEM** - European Soil Erosion Model - a fost dezvoltat în scopul modelării proceselor de eroziune de pe versanți pentru determinarea măsurilor de protecție a solului împotriva eroziunii. Schema logică a modelului este prezentată în figura 4. [*Morgan et al, 1998*]

Ecuatiile modelului (figura 5):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} - e(x, t) &= q_s(x, t) \\ \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= i - f - r \end{aligned} \quad (18)$$

unde:  $C$  – concentrația sedimentelor;  $A$  – aria secțiunii transversale a curgerii;  $Q$  – debitul lichid;  $q_s$  – aportul lateral, pe unitatea de lungime, de sedimente ( $\text{m}^3/\text{s.cm}$ ) (atunci când ecuația se aplică scurgerii pe suprafața versantului  $q_s = 0$ );  $e$  – rata de antrenare a particulelor solide pe unitatea de lungime (particulele dislocate de picăturile de ploaie și antrenate de scurgerea de suprafață);  $x$  – distanța;  $t$  – timpul;  $q$  – aportul lateral, pe unitatea de lungime, de debit lichid;  $i$  – intensitatea ploii;  $f$  – intensitatea infiltrației;  $r$  – interceptia.

#### **Domenii de aplicabilitate:**

- se poate aplica pe orice tip de bazin hidrografic
- modelul conține mai multe module (calculul interceptiei, energiei cinetice a picăturilor de ploaie, calculul volumului scurgerii, capacității de transport a scurgerii de suprafață etc), fiecare modul fiind dezvoltat atât cât permite stadiul cercetării în prezent.



7. Modelul **WEPP** - Water Erosion Prediction Project - este un model de prognoză a proceselor erozionale din bazinele hidrografice [*WEPP User`s Manual, 1995*], dezvoltat de USDA Forest Service, Agricultural Research Service, Natural Resources Conservation Service, Department of Interior's Bureau of Land Management și de Geological Survey din SUA, este cel mai folosit în ultimul timp, se află în permanentă dezvoltare începând cu anul 1985.

Programul se poate utiliza atât pentru modelarea proceselor de eroziune de pe un singur versant, cât și dintr-un întreg bazin hidrografic (figura 6). În cazul modelării proceselor de eroziune pe un singur versant, programul necesită 4 fișiere de intrare, referitoare la: climă, pantă, tipuri de sol și managementul terenului. În cazul modelării proceselor de eroziune pe un întreg bazin hidrografic, programul are nevoie de 7 fișiere de intrare, referitoare la: versanți, structura bazinului hidrografic, pante, tipuri de sol, managementul terenului, climă și albiei. Modelul consideră versantul brăzdat de microrigole paralele, eroziunea de suprafață se produce pe suprafețele dintre aceste microrigole, iar particulele de sol antrenate sunt transportate la vale prin microrigole de către apa de scurgere (de asemenea, se ține cont și de particulele solide antrenate în microrigole).

Datele de ieșire se referă la: modificarea pantei versanților, delimitarea zonelor de eroziune, transport și depuneri de sedimente de-a lungul pantei versanților, pierderile anuale de sol, pierderile de sol la o singură ploaie torențială, modificarea biomasei, cantitățile de sedimente reținute de structurile hidrotehnice din bazinul hidrografic etc.

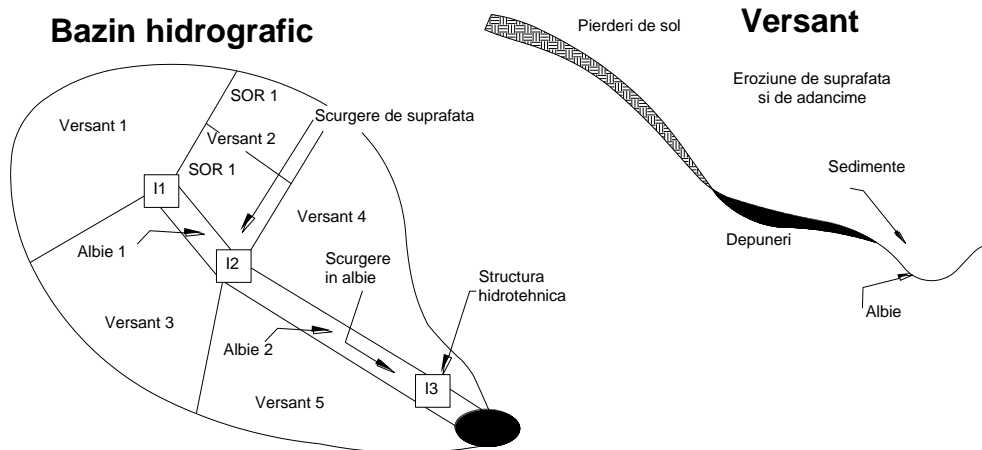


Fig.6 Modelul WEPP

Modelul are două componente de bază:

a. *Componenta erozională*

Se bazează pe ecuația de continuitate:



$$\frac{dG}{dx} = D_r + D_i \quad (19)$$

unde:  $G$  – debitul solid (kg/s.m);  $x$  – distanța de-a lungul pantei (m);  $D_r$  – rata de eroziune în microrigole (+ pentru antrenare, - pentru depunere);  $D_i$  – rata de eroziune pe suprafețele dintre microrigole (kg/s.m<sup>2</sup>).

Pentru calculul lui  $D_i$  se folosește relația:

$$D_i = K_{iadj} I_e \sigma_{ir} SDR_{RR} F_{nozzle} \left[ \frac{R_s}{w} \right] \quad (20)$$

unde:  $K_{iadj}$  – coeficient de erodabilitate pe suprafețele dintre microrigole;  $I_e$  – intensitatea efectivă a ploii (m/s);  $\sigma_{ir}$  – viteza scurgerii de suprafață (m/s);  $SDR_{RR}$  – rata de antrenare a sedimentelor (depinde de rugozitate, pantă, mărimea particulelor de sol);  $F_{nozzle}$  – factor dat de irigații (dacă e cazul);  $R_s$  – distanța dintre microrigole (m);  $w$  – lățimea microrigolelor.

Eroziunea în microrigole e divizată în două părți: antrenare și depunere. Antrenarea are loc atunci când efortul tangențial dat de scurgerea de suprafață depășește efortul tangențial critic de antrenare și atunci când debitul solid este mai mic decât capacitatea de transport. Pentru calculul ratei de antrenare din microrigole se folosește relația:

$$D_r = D_c \left( 1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (21)$$

unde:  $D_c$  – capacitatea de antrenare a apei (kg/s.m<sup>2</sup>);  $T_c$  – capacitatea de transport solid (kg/s.m).

$$D_c = K_r (\tau_f - \tau_c) \quad (22)$$

unde:  $K_r$  - coeficient de erodabilitate în microrigole;  $\tau_f$  - efortul tangențial dat de scurgerea de suprafață (Pa);  $\tau_c$  - efortul tangențial critic de antrenare (Pa).

Pentru calculul ratei de depunere în microrigole se utilizează relația:

$$D_r = \frac{\beta V_f}{q} (T_c - G) \quad (23)$$

unde:  $V_f$  – mărimea hidraulică a sedimentelor (m/s);  $q$  – debitul lichid pe unitatea de lățime (m<sup>2</sup>/s);  $\beta$  – coeficient de turbulență a scurgerii dat de precipitația torențială.

Efortul tangențial  $\tau$  se calculează cu relația:

$$\tau = \gamma R \frac{f_s}{f_t} \sin \alpha \quad (24)$$

unde:  $\gamma$  – greutatea specifică a apei (kg/m<sup>2</sup>.s<sup>2</sup>);  $R$  – raza hidraulică (m);  $\alpha$  – unghiul de înclinare al versantului;  $f_s/f_t$  – raportul dintre coeficientul de rezistență hidraulică a solului fără vegetație (gol) și coeficientul de rezistență hidraulică total.

Coeficientul de rezistență hidraulică se calculează cu relația Darcy-Weisbach:

$$f = \frac{8gRS}{V^2} \quad (25)$$

unde:  $g$  – accelerația gravitațională ( $m/s^2$ );  $R$  – raza hidraulică (m);  $S$  – panta medie a microrigolei (%);  $V$  – viteza apei (m/s).

Capacitatea de transport solid a scurgerii din microrigole se calculează cu relația dezvoltată de Yalin în 1963:

$$T_c = k_t \tau_f^{3/2} \quad (26)$$

unde:  $k_t$  – coeficient de transport ( $m^{0.5}s^2/kg^{0.5}$ ), depinde de panta versantului;  $\tau_f$  - efortul tangențial dat de scurgerea de suprafață (Pa).

#### b. Componenta hidrologică

Se calculează următoarele caracteristici: debitul maxim al scurgerii de suprafață, durata efectivă a scurgerii de suprafață, intensitatea efectivă a ploii, durata efectivă a ploii.

Cantitatea de apă infiltrată se calculează cu ecuațiile Green - Ampt și Mein – Larson (figura 7):

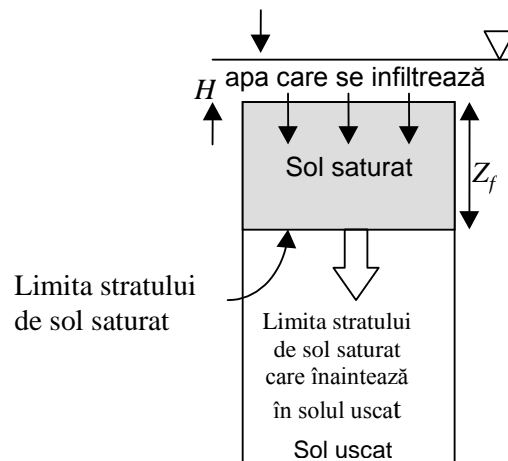


Fig.7 Notațiile pentru ecuațiile Green - Ampt și Mein – Larson

Pentru  $F < F_s$ :

$$f = i \quad \text{și} \quad F_s = \frac{S \cdot IMD}{i/K_s - 1} \quad \text{pentru} \quad i > K_s \quad (27)$$

nu se calculează  $F_s$  pentru  $i \leq K_s$

Pentru  $F \geq F_s$ :

$$f = f_p \quad \text{și} \quad f_p = K_s \left( 1 + \frac{S \cdot IMD}{F} \right) \quad (28)$$

unde:  $f$  – infiltrația;  $f_p$  – capacitatea de infiltrație;  $i$  – intensitatea ploii;  $F$  – volumul cumulat infiltrate;  $F_s$  – volumul cumulat necesar a fi infiltrat pentru saturarea părții superficiale a solului;  $S$  – sucțiunea capilară medie a stratului de sol saturat; IMD – deficitul inițial de umiditate a solului;  $K_s$  – conductivitatea hidraulică a solului saturat.

Cantitatea de apă reținută în depresiunile terenului:

$$S_d = 0.112 \cdot r_r + 3.1 \cdot r_r^2 - 1.2 \cdot r_r \cdot S_0 \quad (29)$$

unde:  $r_r$  – rugozitatea terenului;  $S_0$  – panta hidraulică a scurgerii de suprafață.

Debitul maxim al scurgerii de suprafață se determină cu modelul unde cinematice:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i - f \quad (30)$$

unde:  $i$  – intensitatea ploii;  $f$  – intensitatea infiltrației;  $h$  – adâncimea scurgerii de suprafață;  $q$  – debitul lichid pe unitatea de lățime;  $t$  – timpul;  $x$  – distanța.

$$q = C \cdot S_0^{0.5} h^{1.5} \quad (31)$$

unde:  $C$  – coeficientul lui Chezy;  $S_0$  – panta versantului.

Durata efectivă a ploii (intensitatea ploii > intensitatea infiltrației) se calculează cu:

$$t_e = \left[ \frac{L}{C \cdot S_0^{0.5} (i - f)^{0.5}} \right]^{1/1.5} \quad (32)$$

unde:  $L$  – lungimea scurgerii de suprafață (versantului).

Durata efectivă a scurgerii de suprafață este:

$$t_r = \frac{V_t}{P_r} \quad (33)$$

unde:  $V_t$  – volumul scurgerii;  $P_r$  – debitul maxim al scurgerii.

Intensitatea efectivă a ploii este:

$$I_e = \frac{\int I dt}{t_e} \quad (34)$$

unde:  $I$  – intensitatea ploii.