

*Bài báo khoa học*

## **Xây dựng mô hình số mô phỏng biến đổi hình thái sông có địa hình đáy dốc**

**Đặng Trường An<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Trường ĐH Khoa học Tự Nhiên–Đại học Quốc gia Tp. HCM, 227 Nguyễn Văn Cừ, Quận 5, Tp.HCM, dtan@hcmus.edu.vn

\*Tác giả liên hệ: dtan@hcmus.edu.vn; Tel.: +84–909719878

Ban Biên tập nhận bài: 08/4/2021; Ngày phản biện xong: 08/6/2021; Ngày đăng bài: 25/7/2021

**Tóm tắt:** Các nghiên cứu về chuyển vận bùn cát trong sông có độ dốc đáy lớn gặp rất nhiều trở ngại so với sông vùng đồng bằng do địa hình đáy sông thay đổi đột ngột và chế độ dòng chảy thay đổi rất nhanh,... Vận chuyển bùn cát ở các sông có độ dốc đáy lớn là một vấn đề phức tạp vì vật liệu đáy sông thường không đồng nhất và chứa nhiều loại hạt có kích thước khác nhau như đất, sỏi, cuội và đá tảng,... Nghiên cứu này bước đầu phát triển một chương trình mô phỏng quá trình bồi xói địa hình đáy của các con kênh dốc dựa trên tiếp cận cấp phối thành phần hạt và xem xét chuyển động của hạt bùn cát theo phương ngang đến quá trình duy trì sự ổn định đáy kênh. Các phương trình thủy động lực hai chiều (2D) và vận chuyển bùn cát đáy được rời rạc bởi phương pháp sai phân hữu hạn (FDM) và viết trên nền tảng ngôn ngữ phần mềm Fortran 90. Chương trình phát triển được áp dụng mô phỏng diễn biến bồi xói đáy của một đoạn sông Teabeak, Hàn Quốc. Khả năng thực hiện của mô hình được đánh giá thông qua các chỉ số thống kê NASH và RMSE. Kết quả với NASH = 0,79–0,83 và RMSE = 13%–19% thể hiện sự phù hợp của mô hình đã áp dụng, qua đó cho thấy triển vọng triển khai mô hình cho các nghiên cứu thực tế trong tương lai.

**Từ khóa:** Hình thái; Đáy kênh dốc; Sai phân hữu hạn; Mô hình số; Bùn cát đáy.

---

### **1. Mở đầu**

Chuyển tải bùn cát đáy đóng vai trò quan trọng đối với việc duy trì sự cân bằng và ổn định lòng kênh đối với các con kênh có địa hình đáy dốc [1–3]. Việc hiểu rõ cơ chế chuyển tải bùn cát đáy trong các nghiên cứu có liên quan đến diễn biến hình thái kênh như xây dựng các công trình dân dụng [4–5] hay đánh giá các tai biến thiên nhiên làm thay đổi lòng dẫn do lũ lớn sau các cơn mưa với cường độ lớn, mưa do bão là rất cần thiết [6–8]. Chuyển tải bùn cát đáy là nhân tố chính giúp giữ ổn định hay làm thay đổi địa hình đáy kênh [2, 4, 9]. Các kiến thức về quá trình chuyển tải bùn cát trong các con kênh có địa hình đáy dốc vẫn còn hạn chế so với các nghiên cứu tương tự đối với sông có độ dốc đáy nhỏ, các con sông vùng đồng bằng [10–12]. Một trong những nguyên nhân chính của hạn chế này là các khảo sát đo đạc trực tiếp về chuyển tải bùn cát cũng như các đặc trưng thủy động lực trong điều kiện dòng chảy kênh dốc rất phức tạp và khó triển khai [3, 13–14]. Các quá trình thủy động lực diễn ra trong kênh dốc khá phức tạp do độ dốc đáy kênh lớn, địa hình đáy kênh phức tạp, độ sâu nước dọc theo trục động lực chính thay đổi đột ngột, và đáy sông chứa nhiều loại kích thước vật liệu đáy đan xen [3, 5, 7]. Theo [14], sự hiểu biết của con người về các đặc trưng thủy động lực cũng như biến đổi hình thái sông có độ dốc thấp không dễ dàng vận dụng cho các kênh có địa hình đáy dốc. Một trong những nguyên nhân chính là vì các yếu tố kiểm soát

việc vận chuyển bùn cát trong kênh dốc phức tạp hơn nhiều so với kênh có độ dốc nhỏ và kiến thức hiện tại của chúng ta về dòng chảy kênh dốc vẫn đang trong quá trình hoàn thiện [14–16]. Ngoài ra, địa hình đáy với các thành phần vật liệu có nhiều kích thước khác nhau từ cát, sỏi, đá cuội và thậm chí là đá tảng đã làm tăng tính phức tạp của yếu tố nhám, một trong những nhân tố chính làm cản trở sự di chuyển của dòng nước ở các kênh dốc và làm giảm năng lượng sẵn có của dòng chảy để cuốn bùn cát theo nó [2, 17–18]. Bởi vì bùn cát cũng là một nhân tố chuyển động dựa vào chuyển động của dòng nước [10, 19–20]. Địa hình đáy của các con kênh tự nhiên dốc thường ảnh hưởng đáng kể đến quá trình di chuyển của bùn cát đáy [7, 21]. Thêm vào đó, dòng chảy trong các con kênh dốc có vận tốc dòng lớn và vật liệu mang theo nó thường có phân bố kích thước đa dạng có thể chứa vật liệu từ bùn, cát, sỏi cho đến đá cuội [2, 22].

Trong những năm gần đây, các nghiên cứu liên quan đến quá trình thủy động lực, vận chuyển bùn cát và biến đổi lòng dẫn của các con kênh dốc thường dựa vào mô hình số [23–24]. Thật vậy, mô hình số đã trở thành công cụ hữu ích để hỗ trợ nghiên cứu các vấn đề vận chuyển bùn cát và biến đổi hình thái đối với các kênh dốc [23–25]. Năm 2004, [26] đã xây dựng mô hình số trị một chiều (1D) mô phỏng dòng chảy và chuyển vận bùn cát trong kênh có đáy dốc. Mô hình có tên gọi 3–ST1D– Steep Stream Sediment Transport 1D model được phát triển có thể áp dụng mô phỏng dòng chảy thay đổi theo thời gian. Trong mô hình này, mô–đun thủy động lực được phát triển dựa trên hệ phương trình Saint–Venant trong khi module biến đổi hình thái dựa trên tiếp cận bùn cát đáy đa cấp phối thành phần hạt. Mô hình đã được áp dụng thử nghiệm cho hai trường hợp kênh nhân tạo và một trường hợp kênh tự nhiên có độ dốc đáy lớn. Các kết quả đã thể hiện khả năng áp dụng tốt cho các trường hợp kênh có đáy dốc của mô hình. Năm 2005, [21] đã phát triển một mô hình toán học để nghiên cứu những thay đổi quy mô dài biến đổi lòng dẫn của một con kênh dốc có địa hình đáy kênh phức tạp và vận tốc dòng chảy có sự biến đổi lớn. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã sử dụng hệ phương trình liên tục và vận chuyển bùn cát dựa trên tiếp cận cấp phối thành phần hạt bùn cát đáy.

Gần đây, [27] đã phát triển một mô hình số 1D cho mục đích mô phỏng quá trình bồi xói lòng dẫn áp dụng cho con kênh Chashma, Pakistan dựa trên phương pháp sai phân hữu hạn MacCormack để giải các dòng chảy. Hệ phương trình Saint–Venant với giả định dòng chảy thay đổi theo thời gian và các phương trình chuyển vận bùn cát dựa trên định luật bảo toàn khối lượng đã được áp dụng. Với sơ đồ giải MacCormack có độ chính xác bậc 2, mô hình đã mô phỏng biến đổi hình thái kênh Chashma khá tốt thông qua so sánh các kết quả thu được giữa mô hình mô phỏng và dữ liệu đo đạc. Ngoài ra, các kết quả thu được về lưu lượng, độ sâu nước và thay đổi mực đáy kênh so sánh với kết quả đã công bố trước đó cho thấy rất đáng tin cậy. Gần đây nhất, [28] đã nghiên cứu mối liên hệ giữa các đặc trưng thủy động lực dòng chảy và vận chuyển bùn cát trong một dòng kênh dốc miền núi. Nghiên cứu của nhóm tác giả được xây dựng trên ý tưởng thiết lập chương trình tính toán xem xét cả trường hợp đáy kênh cố định và di động. Các tính toán được thiết lập dựa trên việc xác định các yếu tố kiểm soát quá trình vận chuyển bùn cát đáy trên nền đáy kênh di động. Các tác giả đã báo cáo rằng, thông qua tiến hành thực nghiệm đã giúp cải thiện đáng kể hiểu biết về các quá trình thủy động lực và chuyển vận bùn cát trong kênh tự nhiên.

Năm 2018, [29] đã mô phỏng chuyển vận bùn cát cho một kênh ở Trung Quốc dựa trên mô hình thủy động lực hai chiều (2D) và phương trình chuyển tải bùn cát đáy. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã cải tiến và áp dụng phương pháp thể tích hữu hạn với sơ đồ Godunov để giải các phương trình thủy động lực và vận chuyển bùn cát đáy. Mô hình cải tiến đã được áp dụng thử nghiệm cho trường hợp dữ liệu thực nghiệm từ mô hình vật lý và kết quả chỉ ra rằng mô hình số đã cải tiến là đáng tin cậy. Mô hình số sau đó được áp dụng mô phỏng biến đổi hình thái kênh thực tế và đã kết luận rằng vị trí xói lở và hình thái sông bị chi phối bởi mực nước hạ lưu. Hơn nữa, nghiên cứu cũng chỉ ra rằng hình thái và quá trình bồi lắng lòng sông bị chi phối bởi mực nước hạ lưu thay đổi, gây ra sự biến dạng đáy sông.

Trong nghiên cứu này, một mô hình số 2D được phát triển cho mục đích mô phỏng hình thái đáy kênh trong các kênh dốc, nơi vật liệu đáy có phân bố kích thước lớn và chuyển động theo phương ngang của đáy theo phương ngang đóng góp đáng kể đến quá trình duy trì sự ổn định đáy kênh. Chương trình được xây dựng bao gồm một mô-đun dòng chảy và mô-đun mô phỏng bồi xói đáy dựa trên tiếp cận theo cấp phối thành phần hạt bùn cát đáy. Mô-đun dòng chảy được xây dựng dựa trên hệ phương trình Saint-Venant 2D trong hệ tọa độ Descartes. Mô-đun vận chuyển bùn cát xây dựng dựa trên công thức lưu lượng bùn cát đáy cấp phối thành phần hạt. Chương trình được xây dựng trên nền phần mềm Fortran 90.

## 2. Phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Các phương trình thủy động lực chủ đạo

Các phương trình nước nông theo hai chiều được miêu tả như sau:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot F(U) = S(U) \quad (1)$$

Trong đó  $t$  là thời gian (s);  $U = U(x, t)$  là vector chuyển đổi giữa các biến và được xác định bởi phương trình (2).

$$U = [h, \quad hu \quad hv]^T \quad (2)$$

Trong đó  $t$  là thời gian (s);  $u, v$  là các thành phần vận tốc theo hướng  $x$  và  $y$ .

Các thành phần thông lượng  $F(U) = [E(U) \quad G(U)]$  trong phương trình (1) được xác định bởi phương trình (3)

$$\begin{cases} E(U) = \left[ hu & hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 & huv \right]^T \\ G(U) = \left[ hv & huv & hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right]^T \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó  $h$  là độ sâu nước (m);  $u$  và  $v$  là các thành phần vận tốc theo hướng  $x$  và  $y$  và  $g$  là gia tốc trọng trường ( $m/s^2$ ).

Theo đó số hạng nguồn  $S(U)$  trong phương trình (1) là hàm chứa các biến vật lý như gió, ứng suất tiếp tuyến bề mặt giữa không khí và bề mặt nước, lực Coriolis, độ dốc đáy kênh và ứng suất bề mặt đáy. Với xem xét độ dốc đáy kênh và ứng suất bề mặt đáy là các nhân tố quan trọng chi phối quá trình xói lở và bồi tụ đáy kênh. Số hạng nguồn được xác định theo phương trình (4).

$$S(U) = S_b(U) + S_f(U) \quad (4)$$

Trong đó  $S_b(U)$  và  $S_f(U)$  trong phương trình (4) được miêu tả bởi phương trình (5)

$$\begin{cases} S_b(U) = \left[ 0 & -gh \frac{\partial z}{\partial x} & -gh \frac{\partial z}{\partial y} \right]^T \\ S_f(U) = \left[ 0 & -\frac{1}{\rho} \tau_{fx} & -\frac{1}{\rho} \tau_{fy} \right]^T \end{cases} \quad (5)$$

Trong đó,  $z$  là mực đáy kênh,  $\rho$  là tỷ trọng nước ( $kg/m^3$ ),  $\tau_{fx}, \tau_{fy}$  lần lượt là các thành phần ứng suất trượt đáy theo phương  $x$  và  $y$  và được tính dựa trên hệ số nhám đáy kênh Manning.

$$\begin{cases} \tau_{fx} = \frac{n^2 hu \sqrt{(hu)^2 + (hv)^2}}{h^{\frac{4}{3}}} \\ \tau_{fy} = \frac{n^2 hv \sqrt{(hu)^2 + (hv)^2}}{h^{\frac{4}{3}}} \end{cases} \quad (6)$$

$n$  trong phương trình (6) là hệ số nhám Manning. Hệ số nhám Manning phụ thuộc vào độ nhám đáy kênh và được xem là một trong những yếu tố chính chi phối sự di chuyển của dòng nước. Hệ số nhám Manning được xác định bởi phương trình (7).

$$n = h^{1/6} d \sqrt{\frac{f_{DW}}{8g}} \quad (7)$$

Trong đó  $g$  là gia tốc trọng trường ( $m/s^2$ );  $d$  là đường kính hạt bùn cát đáy (mm) và  $f_{DW}$  là tham số được xác định bởi phương trình (8).

$$f_{DW} = \frac{0.242}{\left[ \log \left( \frac{12h}{K_s} \right) \right]^2} \quad (8)$$

Trong phương trình (8),  $h$  là độ sâu nước (m) và  $K_s$  là hệ số độ nhám của hạt bùn cát đáy, đại diện cho giá trị trung bình đường kính vật liệu đáy.

## 2.2. Các phương trình bồi xói đáy kênh và chuyển vận bùn cát đáy

Tốc độ thay đổi địa hình đáy của một con kênh do bùn cát bị cuốn trôi hay bồi tụ là yếu tố then chốt để xác định diễn biến của lòng sông. Các phương trình mô phỏng diễn biến xói lở hay bồi tụ đáy sông cho các khu vực có địa hình đáy dốc thường dựa trên chuyển vận bùn cát đáy [30–31]. Phương trình liên tục bùn cát đáy được xây dựng có dạng phương trình (9).

$$(1 - p) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \nabla q_{sb} = 0 \quad (9)$$

Trong đó  $p$  là độ rỗng của vật liệu đáy (thường được chọn giá trị từ 0,35 đến 0,4),  $Z_b$  là mực đáy di động và  $q_{sb} = (q_{sbx}, q_{sby})$  lưu lượng bùn cát đáy theo phương  $x$  và phương  $y$ . Lưu lượng bùn cát đáy trong nghiên cứu này sử dụng công thức bán thực nghiệm Park (2012) [31] và được viết như sau:

$$q_{tbs} = \sum_{i=1}^N q_{sbi} \quad (10)$$

$$q_{sb} = \gamma \sqrt{g(\sigma_s - 1) d_m^3} q_{sb}^* \quad (11)$$

$$q_{sb}^* = 0.00157 \tau_i^{*0.418} (\tau_i^* - \tau_{ci}^*)^{0.307} \quad (12)$$

$$\tau_{ci}^* = 0.0308 \left( \tau_b \frac{d_i}{d_m} \right)^{0.545} \quad (13)$$

$$\tau_i^* = \frac{\tau_b}{\gamma(\sigma_s - 1) d_i} \quad (14)$$

Trong đó  $q_{tbs}$  trong công thức (10) là tổng lưu lượng bùn cát đáy ( $kg/s$ );  $q_{sb}$  trong công thức trong công thức (11) là lưu lượng bùn cát ứng mỗi cấp kích thước hạt  $d_i$  và  $q_{sb}^*$  là lưu lượng bùn cát đáy không thứ nguyên ứng với cấp hạt  $i$ ;  $g$  là gia tốc trọng trường ( $m/s^2$ );  $d_m$  là kích thước hạt bùn cát trung bình chiếm 50% thành phần hạt mịn (mm);  $\tau_{ci}^*$  là ứng suất cắt Shields không thứ nguyên của chuyển động tới hạn;  $\tau_b$  là ứng suất cắt đáy không thứ nguyên;  $\sigma_b$  là tỷ số không thứ nguyên giữa 84% kích thước hạt bùn cát thô và 16% kích thước hạt bùn cát mịn và  $\sigma_s$  là tỷ số không thứ nguyên giữa trọng lượng riêng của bùn cát đáy và của nước.

$$\tau_b = \gamma HS; \sigma_b = \left( \frac{d_{84}}{d_{16}} \right)^{\frac{1}{2}}; \sigma_s = \frac{\gamma_s}{\gamma} \quad (15)$$

Trong đó  $H$  là độ sâu nước (m);  $d_m$  là kích thước hạt bùn cát đáy (mm);  $S$  là độ dốc mặt nước;  $\gamma_s$  và  $\gamma$  là trọng lượng riêng của hạt bùn cát đáy và của nước ( $kg/m^3$ ).

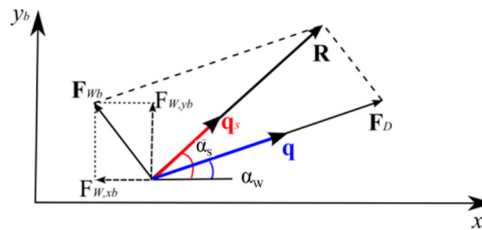
### 2.3. Xử lý ảnh hưởng của chuyển động theo phương ngang của hạt bùn cát

Các nghiên cứu đã công bố gần đây [5, 8, 14] chỉ ra rằng, đối với các con kênh dốc, chuyển động của hạt bùn cát theo phương ngang đóng góp đáng kể vào quá cân bằng hình thái đáy kênh. Theo các nghiên cứu được công bố [17, 25, 32], các mô phỏng bồi xói lòng dẫn chỉ áp dụng công thức xác định lưu lượng bùn cát đáy theo phương x (phương dòng chảy chính) mà bỏ qua các chuyển động của hạt bùn cát theo phương ngang (Hình 1). Trong nghiên cứu này, ngoài xem chuyển động bùn cát theo phương dòng chảy chính (phương x) thì chuyển động của hạt theo phương ngang (phương y) cũng được xem xét. Theo đó, chuyển động của hạt bùn cát theo phương x và y được xác định bởi hàm:

$$q_{sb} = (q_{bxi}, q_{byi}) \quad (16)$$

Trong đó  $q_{sbx}$  và  $q_{sby}$  được xác định bởi phương trình (17):

$$\begin{cases} q_{bxi} = q_{sbi} \cos \alpha \\ q_{byi} = q_{sbi} \sin \alpha \end{cases} \quad (17)$$



**Hình 1.** Minh họa hướng dòng chảy và lưu lượng bùn cát đáy theo phương x, y trên bề mặt đáy nghiêng theo phương ngang.

Trên hình 1, hai lực được tính đến để xác định hướng vận chuyển của hạt bùn cát. Trong đó,  $F_D$  là lực cản thủy động lực học song song với dòng chảy và  $F_w$  là trọng lượng của hạt bùn cát khi chìm lắng theo phương thẳng đứng và chúng được xác định bởi phương trình (18).

$$\begin{cases} F_{D,xb} = F_D \cos \alpha \\ F_{D,yb} = F_D \sin \alpha \end{cases} \quad (18)$$

Chuyển động có định hướng (chuyển động theo phương ngang) trên mặt phẳng nghiêng của hạt bùn cát được xác định bởi phương trình (19).

$$\tan \alpha_s = \frac{\sin \alpha_w - \frac{1}{f_s(\tau^*)} \frac{\partial z_b}{\partial x}}{\cos \alpha_w - \frac{1}{f_s(\tau^*)} \frac{\partial z_b}{\partial y}} \quad (19)$$

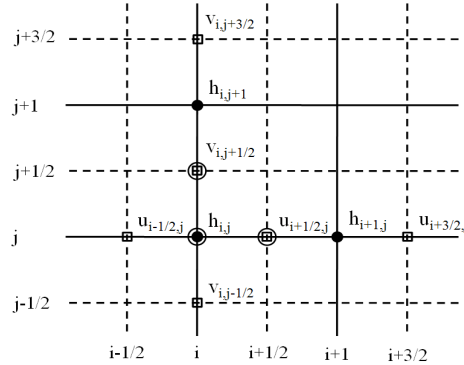
Trong phương trình (19),  $f_s(\tau^*)$  là một hàm trọng số bán thực nghiệm, được xác định dựa trên đường kính hạt bùn cát đáy, độ sâu nước và  $\tau^*$  là ứng suất cắt Shields không thứ nguyên. Cụ thể, hàm  $f_s$  trong phương trình (19) được xác định bởi phương trình (20).

$$f_s = 9 \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0.3} \sqrt{\tau^*} \quad (20)$$

### 2.4. Thủ tục giải các phương trình dòng chảy và vận chuyển bùn cát đáy

Các phương dòng chảy và vận chuyển bùn cát được giải bởi phương pháp FDM trên nền lưới cấu trúc so le (Hình 2) trong hệ tọa độ Descartes [32–33]. Trong đó, các xấp xỉ sai phân

tiến bậc 1 theo thời gian ( $\Delta t$ ) và xấp xỉ sai phân trung tâm bậc 2 theo không gian ( $\Delta x, \Delta y$ ) được sử dụng để rời rạc các phương trình. Cụ thể, đối với lưới so le đã áp dụng, độ sâu nước ( $h$ ) được tính tại ô nút chính ( $i, j$ ), ( $i+1, j$ ), ( $i, j-1$ ). v.v. (trong khi các thành phần vận tốc ( $u, v$ ) được tính tại các ô có chỉ số bước tính lẻ  $\pm \frac{1}{2} \Delta x$  và  $\pm \frac{1}{2} \Delta y$  tại các nút lưới ( $i+\frac{1}{2}, j$ ), ( $i-\frac{1}{2}, j$ ), ( $i, j+\frac{1}{2}$ ) và ( $i, j-\frac{1}{2}$ ) (Hình 2).



**Hình 2.** Minh họa lưới so le theo sơ đồ Marker và Cell sử dụng trong giải rời rạc hệ các phương trình dòng chảy [32].

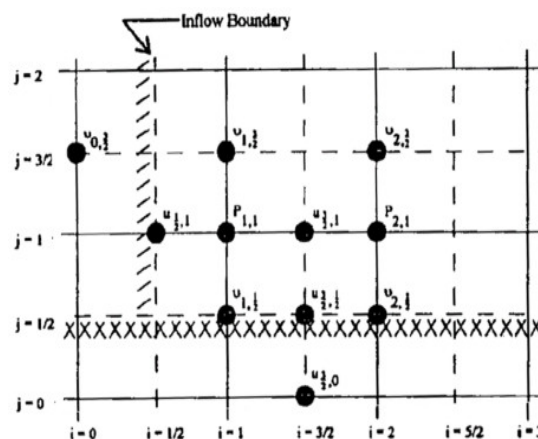
## 2.5. Các điều kiện đầu và điều kiện biên

Để thực hiện quá trình tính toán, các điều kiện ban đầu là cần thiết lập cho tất cả các mô phỏng. Các điều kiện ban đầu được xác định tại mọi điểm trong miền tính toán như một giá trị phỏng đoán ban đầu trong quy trình giải bằng phương pháp lặp lại. Các điều kiện này bao gồm độ sâu nước ( $h$ ), các thành phần vận tốc ( $u, v$ ) theo hướng  $x$  và  $y$  và lưới thủy lực hay còn gọi là lưới địa hình. Để giải các phương trình từ (1) đến (10), giá trị của độ sâu nước ( $h$ ) và các thành phần vận tốc ( $u, v$ ) tại thời điểm ban đầu cần được cung cấp. Cụ thể, tại biên vào, thành phần vận tốc theo phương  $x$  được cung cấp trực tiếp, trong khi phân vận tốc theo phương  $y$  tại nút lưới ( $i = 0, j = 3/2$ ) được tính theo phương trình (21).

$$v_{0, \frac{3}{2}} = 2v_{\frac{1}{2}, \frac{3}{2}} - v_{1, \frac{3}{2}} \quad (21)$$

Trong đó các thành phần vận tốc theo phương  $y$  tại các nút lưới  $v_{1/2}, v_{3/2}$  được xác định bởi người chạy mô hình (Hình 3). Tại biên rắn, mặc dù trong thực tế không tồn tại thành phần vận tốc pháp tuyến với bờ kênh nhưng theo sơ đồ Marker và Cell, thành phần vận tốc theo phương  $y$  tại nút lưới ( $i = 1, j$ ) sẽ được thiết lập bởi đạo hàm bởi phương trình (22).

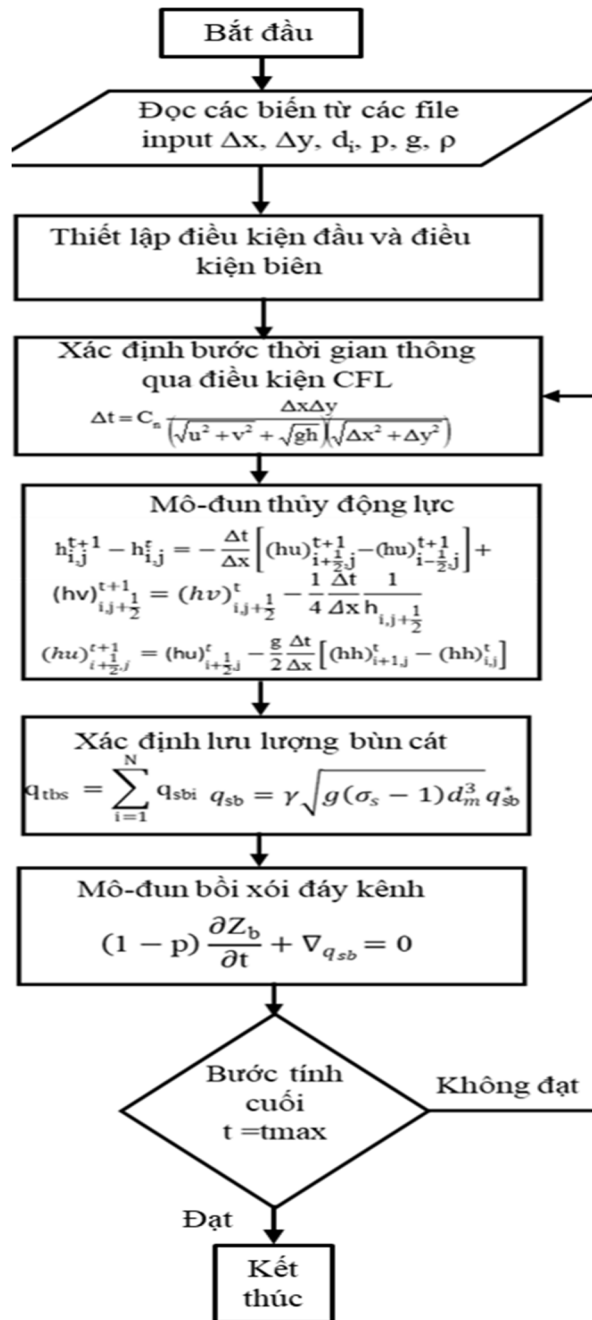
$$v_{1,j} = 2v_{2,j} - v_{3,j} \quad (22)$$



**Hình 3.** Xác định các thành phần vận tốc tại các biên rắn và lòng [34].



Quy trình các bước thực hiện quá trình mô phỏng biến đổi hình thái kênh được miêu tả trong hình 4.



**Hình 4.** Quy trình các bước thực hiện quá trình mô phỏng của mô hình.

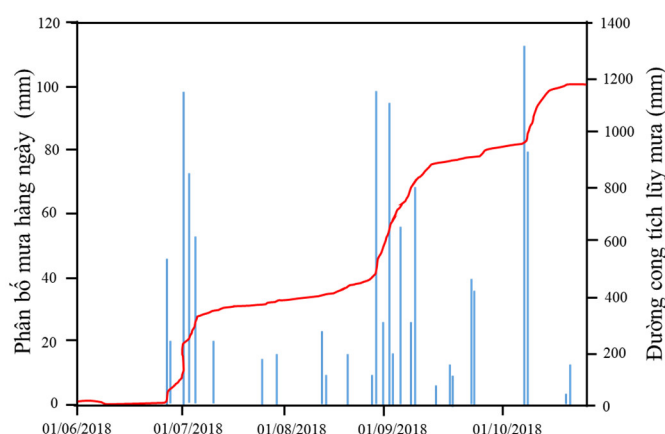
## 2.6. Áp dụng mô hình mô phỏng biến đổi lòng dẫn đoạn sông Teabeask

Khu vực nghiên cứu là một đoạn kênh có tên gọi Taebaek, thuộc sông Yangyang nằm ở phía đông nam tỉnh Gangwon, Hàn Quốc (Hình 5). Khu vực đoạn sông nghiên cứu đặc trưng bởi địa hình dốc với độ dốc trung bình lớn hơn 2,5% thuộc sông miền núi Taebaek có độ cao 1,549 mét bên trên mực nước biển trung bình [30–31]. Khu vực đoạn sông nghiên cứu có lưu lượng dòng chảy thấp trong điều kiện thời tiết bình thường, tuy nhiên lưu lượng dòng sẽ tăng nhanh và gây lũ đe dọa các công trình dân dụng cũng như các khu dân cư ven sông khi khu vực xuất hiện những cơn mưa to, hay mưa trong bão [30–31].



**Hình 5.** Minh họa khu vực nghiên cứu với các bố trí khảo sát đặc trưng hình thái đáy kênh trước khi xảy ra sự kiện lũ (Nguồn: Google earth).

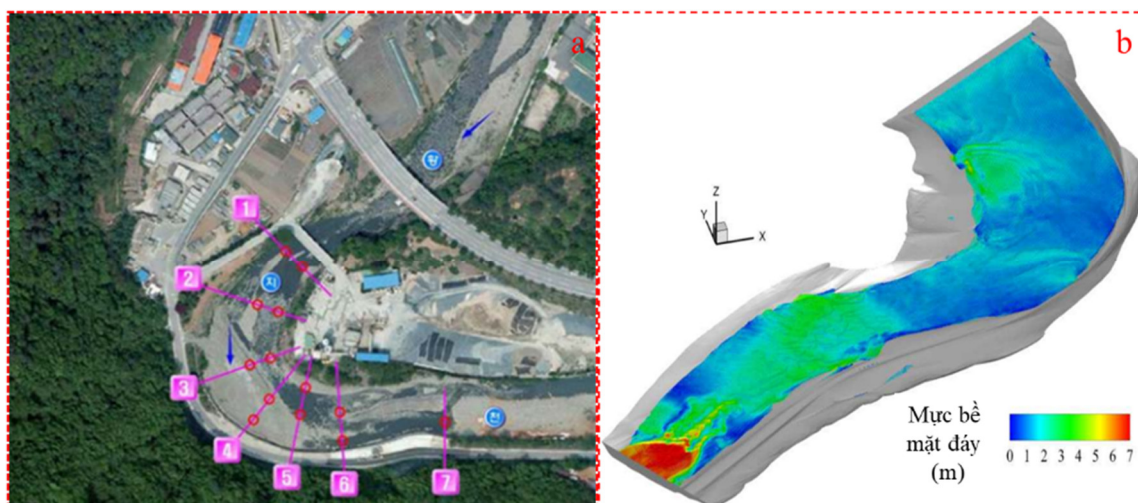
Mặc dù khu vực đoạn kênh nghiên cứu có mưa hàng năm trung bình trong khoảng hơn 1,300 mm, tuy nhiên khu vực có thể xuất hiện lũ gây ảnh hưởng nghiêm trọng khi xảy ra mưa to hay mưa trong bão (Hình 6). Nghiên cứu này tiến hành mô phỏng diễn biến địa hình đáy sau một cơn mưa to gây lũ tại khu vực nghiên cứu giai đoạn từ 01/07/2018 đến 01/11/2018 (Hình 6).



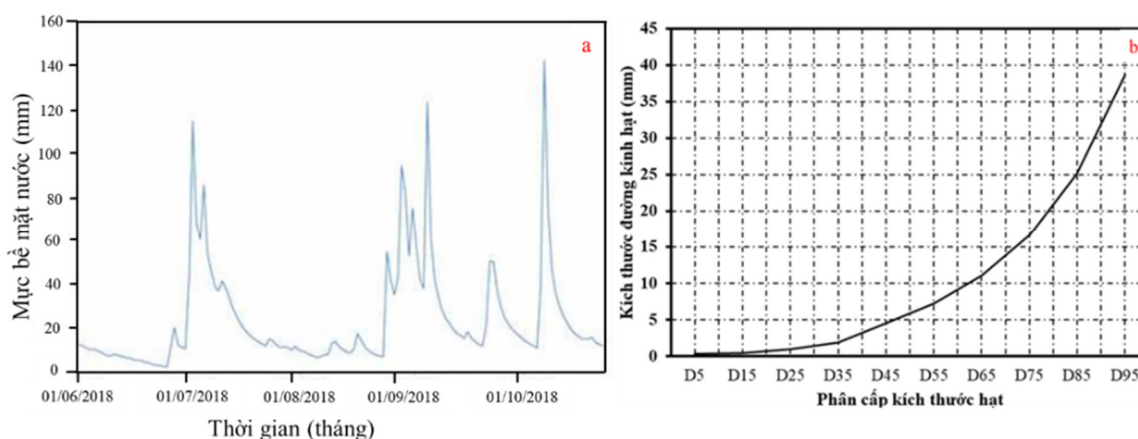
**Hình 6.** Phân bố mưa hàng ngày tại khu vực đoạn sông nghiên cứu và đường cong tích lũy mưa gây lũ cho khu vực từ 01/07/2018 đến 01/11/2018.

Khảo sát dữ liệu địa hình đáy kênh được tiến hành bằng thiết bị máy thủy bình Sokkia–C32 trước sự kiện lũ phục vụ xây dựng lưới thủy lực cho mô hình (Hình 7a) và bản đồ địa hình được xây dựng từ dữ liệu khảo sát được minh họa (hình 7b). Dữ liệu mực nước tại biên vào được thu thập bởi thiết bị cảm biến bị tự ghi (Hình 8a), trong khi dữ liệu phân bố đường kính hạt bùn cát đáy phục vụ chạy mô phỏng mô–đun biến đổi hình thái đáy sông được minh họa ở hình 8b.





**Hình 7.** Bố trí khảo sát a) các mặt cắt ngang thu thập dữ liệu hình thái và b) xây dựng lưới thủy lực cho khu vực đoạn sông nghiên cứu.



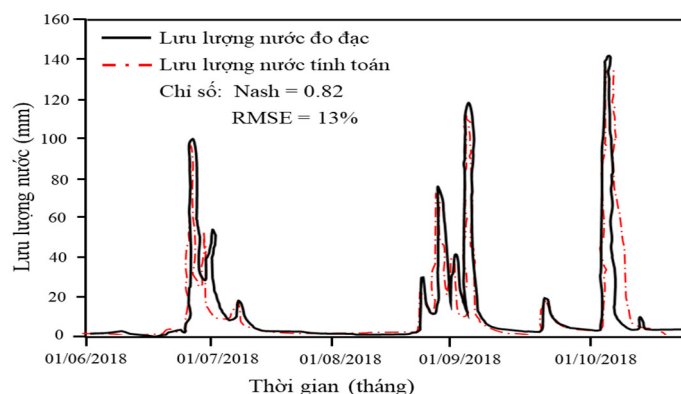
**Hình 8.** Thu thập dữ liệu đầu vào phục vụ mô phỏng mô hình a) mực nước tại biên vào và b) phân bố kích thước hạt bùn các đáy tại khu vực đoạn sông nghiên cứu.

### 3. Các kết quả và thảo luận

#### 3.1. Đánh giá khả năng áp dụng của mô hình

Các kết quả mô phỏng của mô hình đã được so sánh với dữ liệu đo đạc phân bố lưu lượng nước trong suốt thời gian mô phỏng sự kiện lũ (Hình 9). Cụ thể, các phân tích mức độ phù hợp giữa dữ liệu đo đạc lưu lượng nước và kết quả mô phỏng từ mô hình thông qua chỉ số NASH và sai số bình phương trung bình (RMSE) cho các giá trị tương ứng 0,82 và 13% (Hình 9). Nhìn chung, các kết quả mô phỏng lưu lượng dòng từ chương trình đã phát triển cho trị số thấp hơn so với dữ liệu thực đo, tuy nhiên mô hình đã mô phỏng xu thế lũ phù hợp với dữ liệu thực đo nhưng chậm pha hơn so với diễn biến thực tế của cơn lũ (Hình 9).

Như chúng ta đã biết, vật liệu đáy sông có liên quan mật thiết đến hệ số nhám và là yếu tố chính chi phối chuyển động của dòng nước. Một trong những nguyên nhân chính dẫn đến lưu lượng dòng chảy mô phỏng từ mô hình có sự trễ pha và trị số đỉnh lưu lượng dòng nhỏ hơn so với trị số thực đo có thể do phân bố phức tạp của vật liệu đáy sông mà mô hình chưa thể hiện được hết đặc tính phức tạp ấy trong quá trình tiến hành mô phỏng dẫn đến sức cản trở dòng chảy của bề mặt đáy phức tạp hơn so với thiết lập từ mô hình.



**Hình 9.** Đánh giá khả năng thực hiện của mô hình thông qua so sánh lưu lượng dòng đo đạc và kết quả mô phỏng.

### 3.2. Đánh giá khả năng mô phỏng bồi xói địa hình đáy

Các kết quả mô phỏng diễn biến bồi xói địa hình đáy kênh sau một sự kiện mưa gây lũ (01/11/2018) từ mô hình cũng được so sánh với dữ liệu đo đạc (Bảng 1). Cụ thể, phân tích mức độ phù hợp của mô hình mô phỏng bồi xói địa hình tại các mặt cắt ngang số 4, 5 và 6 (Hình 7a) thông qua các chỉ số thống kê với NASH = 0,79–0,83 và RMSE = 13–19% (Bảng 1).

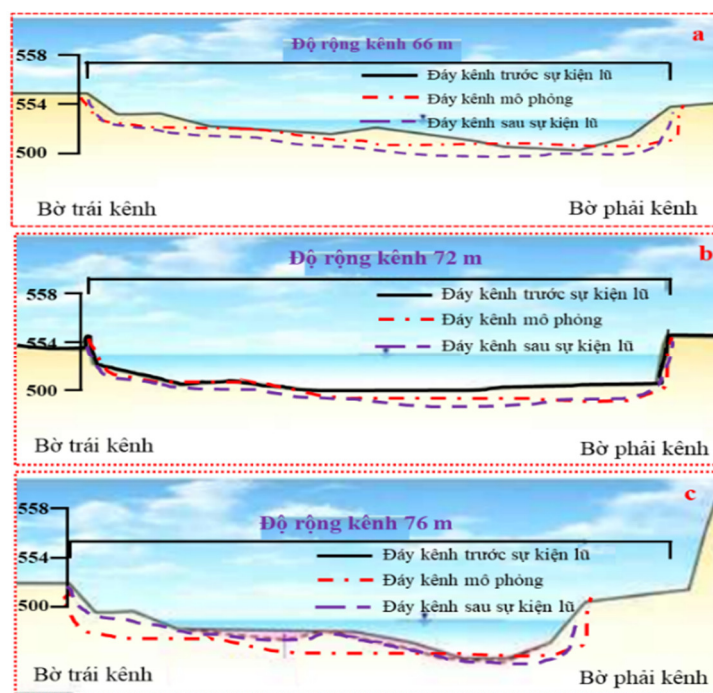
**Bảng 1.** Đánh giá khả năng thực hiện của mô hình mô phỏng diễn biến bồi xói đáy kênh thông qua các chỉ số thống kê sai số.

Chỉ số	Mặt cắt 4	Mặt cắt 5	Mặt cắt 6
NASH	0,79	0,83	0,80
RMSE	19%	13%	16%

Nhìn chung các kết quả mô phỏng biến đổi bồi xói địa hình đáy kênh từ mô hình phù hợp với dữ liệu đo đạc thông qua các chỉ số đánh giá sai số. Tại các mặt cắt ngang có thu thập dữ liệu thực tế so sánh với kết quả từ mô hình mô phỏng đều cho thấy mức độ phù hợp tốt. Thêm vào đó, các kết quả phân tích xu thế bồi xói và xói lở cực đại xảy ra tại bờ phải của của đoạn kênh nghiên cứu, cụ thể là tại các mặt cắt ngang số 4, 5 và 6 (Hình 10a–10c) đều cho thấy sự phù hợp của mô hình mô phỏng với dữ liệu thực đo.

## 4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng chương trình mô phỏng diễn biến bồi xói đáy kênh dựa trên sự kết hợp của các phương trình Saint–Venant 2D trong hệ tọa độ Descartes và phương trình vận chuyển bùn cát, phương trình thay đổi mực bề mặt đáy. Hệ thống các phương trình được giải bằng phương pháp phân sai phân hữu hạn với lưới cấu trúc so le. Chương trình được viết trên nền ngôn ngữ Fortran 90. Chương trình được áp dụng mô phỏng bồi xói đáy kênh cho một đoạn kênh có địa hình đáy dốc thuộc sông Yangyang, Hàn Quốc. Khả năng thực hiện của mô hình được đánh giá thông qua các chỉ dẫn sai số cho thấy khá phù hợp, tuy nhiên, kết quả mô phỏng thủy động lực từ mô hình có trị số giá trị đỉnh lưu lượng thấp hơn so với dữ liệu đo đạc và các chuyển động của dòng cũng có sự trễ pha so với dữ liệu đo đạc. Nhìn chung, việc phát triển một chương trình mô phỏng các quá trình thủy động lực và diễn biến bồi xói lòng dẫn giúp các nhà nghiên cứu dễ dàng thực hiện mục tiêu riêng cần đạt được mà các mô hình thương mại chưa đáp ứng được. Tuy nhiên, việc xây dựng một chương trình tính áp dụng cho một nghiên cứu cụ thể gặp rất nhiều trở ngại, các giao diện trình bày các kết quả nghiên cứu thiếu linh hoạt so với các mô hình thương mại. Thêm vào đó, quá trình tiến hành mô phỏng từ mô hình mất khá nhiều thời gian của cùng công việc so với mô hình thương mại.



**Hình 10.** So sánh kết quả mô phỏng bồi xói đáy kênh sau sự kiện lũ tại các mặt cắt ngang 4, 5 và 6 (Hình 7a) tương ứng với các hình a, b và c vào ngày 01/11/2018.

**Đóng góp của tác giả:** Tác giả đã xây dựng ý tưởng nghiên cứu, lựa chọn phương pháp nghiên cứu, viết bản thảo bài báo.

**Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được thực hiện dưới sự tài trợ của đề tài nghiên cứu khoa học mã số B134571–07. Tác giả trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ của Giáo sư Park Sang Deog và các đồng nghiệp tại Phòng nghiên cứu Động lực sông ngòi, Đại học Quốc gia Gangneung-wonju, Hàn Quốc cho các góp ý, hỗ trợ dữ liệu suốt quá trình thực hiện nghiên cứu này.

**Lời cam đoan:** Tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của chính tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

### Tài liệu tham khảo

1. Bunte, K.; Abt, S.R.; Swingle, K.W.; Cenderelli, D.A.; Schneider, J.M. Critical Shields values in coarse-bedded steep streams. *Water Resour. Res.* **2013**, *49*, 7427–7447, doi:10.1002/2012WR012672.
2. Camenen, B. Discussion of “Understanding the influence of slope on the threshold of coarse grain motion: Revisiting critical stream power” by C. Parker, N.J. Clifford, and C.R. Thorne *Geomorphology* **2012**, *126*, 51–65.
3. Nitsche, M.; Rickenmann, D.; Turowski, J.M.; Badoux, A.; Kirchner, J.W. Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for macro-roughness in steep mountain streams. *Water Resour. Res.* **2011**, *47*, W08513.
4. Wyss, C.R.; Rickenmann, D.; Fritschi, B.; Turowski, J.; Weitbrecht, V.; Boes, R. Measuring bed load transport rates by grain-size fraction using the Swiss Plate Geophone Signal at the Erlenbach. *J. Hydraul. Eng.* **2016**, *142*, 04016003.
5. Chiari, M. Numerical modelling of bed-load transport in torrents and mountain streams. Dissertation, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna. 2008.

6. Biyun, F.; Xudong, F.; Zhengfeng, Z. Relationship between the topography, riverbed evolution and the secondary geological disasters after the earthquake in the Longxi River Basin. *J. Basic Sci. Eng.* **2013**, *21*, 1005–1017.
7. Mueller, E.R.; Pitlick, J. Sediment supply and channel morphology in mountain river systems: 1. Relative importance of lithology, topography, and climate. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* **2013**, *118*, 2325–2342.
8. Van Emelen, S. Erosion modeling over a steep slope: application to a dike overtopping test case. Proceeding of 2013 IAHR World Congress, Chengdu, China. 2013.
9. Wu, W.; Marsooli, R.; He, Z. Depth-averaged two-dimensional model of unsteady flow and sediment transport due to non-cohesive embankment break/breaching. *J. Hydraul. Eng. ASCE* **2012**, *138*, 503–516.
10. Schneider, J.M.; Rickenmann, D.; Turowski, J.M.; Bunte, K.; Kirchner, J.W. Applicability of bed load transport models for mixed size sediments in steep streams considering macro-roughness. *Water Resour. Res.* **2015**, *51*, 5260–5283.
11. Yager, E.M.; Kirchner, J.W.; Dietrich, W.E. Calculating bed load transport in steep boulder bed channels. *Water Resour. Res.* **2007**, *43*, W07418.
12. Xu, R.; Zhong, D.; Wu, B.; Fu, X.; Miao, R. A large time step Godunov scheme for free-surface shallow water equations. *Chin. Sci. Bull.* **2014**, *59*, 2534–2540.
13. Andharia, B.R.; Patel, P.L.; Manekar, V.L.; Porey, P.D. Prediction of bed level variations in nonuniform sediment bed channel. *Sādhanā* **2018**, *43*, 55.
14. Cheng, N.S.; Chen, X. Slope Correction for calculation of bedload sediment transport rates in steep channels. *J. Hydraul. Eng. ASCE* **2014**, *140*, 4001–4018.
15. Chiari, M. Numerical modelling of bed-load transport in torrents and mountain streams. Dissertation, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna. 2008.
16. Horritt, M. Development and testing of a simple 2D finite volume model of sub critical shallow water flow. *J. Numer. Math.* **2004**, *44*(11), 1231–1255.
17. Recking, A. Influence of sediment supply on mountain streams bedload transport. *Geomorphology* **2012**, *175–176*, 139–150.
18. Ferreira, R.M.L.; Leal, J.G.A.B.; Cardoso, A.H. Conceptual model for the bedload layer of gravel bed stream based on laboratory observations. *Proc. Int. Conf. on Fluvial Hydraul. River Flow* Lisbon, Portugal, 2006, 1.
19. Bathurst, J.C. Effect of coarse surface layer on bed-load transport. *J. Hydraul. Eng.* **2007**, *133*, 1192–1205.
20. Bravo-Espinosa, M.; Osterkamp, W.; Lopes, V. Bedload transport in alluvial channels. *J. Hydraul. Eng.* **2003**, *10*, 783–795.
21. Hassan, A.; Church, M.; Lisle, T.E.; Brardinoni, F.; Benda, L.; Grant, G.E. Sediment transport and channel morphology of small, forested streams. *J. Am. Water Resour. Assoc.* **2005**, *41*(4), 853–876.
22. Pianese, D.; Rossi, F. Morphological changes and grain sorting in mountain gravel-bed streams. *Fluvial Hydraul. of Mountain Reg.* **2005**, *37*, 361–381.
23. Rahuel, J.L.; Holly, F.M.; Chollet, J.P.; Belludy, P.; Yang, G. Modelling of riverbed evolution for bed load sediment mixtures. *J. Hydraul. Eng. ASCE* **1989**, *115*, 1521–1542.
24. Chiari, M.; Friedl, K.; Rickenmann, D. A one-dimensional bedload transport model for steep slopes. *J. Hydraul. Res.* **2010**, *48*, 152–160.
25. Goutière, L.; Soares-Frazão, S.; Savary, C.; Laraichi, T.; Zech, Y. One-dimensional model for transient flows involving bedload sediment transport and changes in flow regimes. *J. Hydraul. Eng. ASCE* **2008**, *134*, 726–735.

26. Dang, T.A.; Park, S.D.; Woo, T.Y.; Nam, A.R. Numerical modeling of riverbed variation in open channels. *Proceeding of 2013 IAHR World Congress*. 2013.
27. Papanicolaou, A.N.; Bdoura, A.; Wickleinb, E. One-dimensional hydrodynamic/sediment transport model applicable to steep mountain streams. *J. Hydraul. Res.* **2004**, 42, 357–375.
28. Riaz, M.Z.B.; Shakir, A.S.; Masood, M. One dimensional numerical simulation of aggradation–degradation in a channel using finite difference method case study Chashma right bank canal (CRBC). *Fluid Mech Open Acc.* **2007**, 4, 178.
29. Hou, J.; Zhang, C.; Wang, D.; Li, F.; Yu, Z.; Zhou, Q. Fixed–bed and mobile–bed resistance of channels with steep gradients in mountainous areas. *Water* **2019**, 11, 681.
30. Luo, M.; Yu, H.; Huang, E.; Ding, R.; Lu, X. Two–Dimensional Numerical Simulation Study on Bed–Load Transport in the Fluctuating Backwater Area: A Case–Study Reservoir in China. *Water* **2018**, 10, 1425.
31. An, Đ.T. Khả năng áp dụng các công thức bán thực nghiệm bùn cát đáy cho lưu vực sông có địa hình đáy dốc. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2021**, 726, 30–40.
32. Park, S.D.; Lee, S.W.; Han, K.D. Development of technique estimating sediment load in mountain river. *MOLIT Final report, Land Transport R&D Report R&D/ B–01*, 2013, 275–278.
33. Turowski, J.M.; Badoux, A.; Rickenmann, D. Start and end of bedload transport in gravel–bed streams. *Geophys. Res. Lett.* **2011**, 38, L04401.
34. McKee, S.; Tom, M.F.; Cuminato, J.A.; Castelo, A.; Ferreira, V.G. Recent advances in the Marker and Cell method. *Archives Comp. Methods Eng.* **2004**, 11, 107–142.
35. Paulo, G.S.; Tom, M.F.; McKee, S. A marker–and–cell approach to viscoelastic free surface flows using the PTT model. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **2007**, 147, 149–174.

## **Development of 2D numerical model to simulate bed level variation in the steep slope channels**

**Dang Truong An<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> University of Science –Vietnam National University–HCM City, 227 Nguyen Van Cu, District 5, HCMC; dtan@hcmus.edu.vn

**Abstract:** Studies on sediment transport in rivers with steep bed slopes are facing several obstacles compared to delta rivers due to sudden changes in riverbed topography and rapidly changing flow regimes, etc. Sediment transport in rivers with steep bed slope is a complicated problem because the riverbed material is often heterogeneous and contains a variety of particles of different sizes such as soil, gravel, pebbles and boulders, etc. This study, therefore, initially develops a computer program to simulate the bed level variation processes in the steep channels based on the grain size fraction approach together with considering the horizontal movement of sediment particles to the bed channel maintenance process. The two–dimensional (2D) hydrodynamic equations and bed load sediment transport are solved by finite difference method (FDM) and written on the software language Fortran 90. The developed program is, then, applied to simulate the bed level variation in the Teabeak River section, South Korea after a severe flood event. The performance of the developed model is evaluated through the NASH and RMSE statistical indexes. The results carried out with NASH = 0.79–0.83 and RMSE = 13%–19% confirmed the appropriateness of the developed model, thereby results indicating the prospect of the model deployment in the future.

**Keywords:** Morphology; Steep channel; Numerical model; FDM; Bedload sediment.