



**ĐÁNH GIÁ HIỆU SUẤT MÔ HÌNH TANK TRONG MÔ PHỎNG DÒNG
CHẢY DÀI HẠN PHỤC VỤ DỰ BÁO CHẤT LƯỢNG NƯỚC
Ở LƯU VỰC SÔNG ASAHI**

**EVALUATING THE PERFORMANCE OF THE TANK MODEL IN
LONG-TERM RUNOFF SIMULATION FOR WATER QUALITY
FORECASTING IN THE ASAHI RIVER BASIN**

Trần Thị Minh Tâm^{1*}, Hidetaka Chikamori², Tiền Hải Lý³

¹ Khoa Địa lí, trường Đại học sư phạm, Đại học Huế

² Okayama University, Japan

³ Trường Đại học Bạc Liêu

* tranthiminhtam@dhsphue.edu.vn

Ngày nhận bài:

26/11/2025

Ngày chấp nhận

đăng:

15/12/2025

Keywords: Asahi
River Basin, DE,
Runoff simulation,
Tank Model.

ABSTRACT

Surface runoff governs the transport of nutrients, pollutants, and sediments, making its accurate simulation essential for reliable water-quality modelling. Under increasing climate-driven extreme rainfall, runoff variability intensifies, yet limited attention has been given to assessing whether hydrological models can provide sufficiently accurate “pre-processing” inputs for water-quality prediction, particularly in data-scarce mountainous basins. This study calibrates and validates the Tank Model, optimized via Differential Evolution, to simulate daily runoff in the Asahi River Basin (Japan) for 2002–2021. Model performance, assessed by NSE, R^2 , and RMSE, demonstrates stable skill ($R^2 = 0.62$ – 0.63 ; NSE improving from 0.35 to 0.48; $RMSE = 2.4$ – 2.6 mm/day). The optimized parameter set successfully captures key hydrological dynamics, especially low–medium flows and seasonal variation. Peak-flow underestimations are linked to spatial rainfall heterogeneity and reservoir regulation effects. Overall, results indicate that the Tank Model provides sufficiently accurate discharge estimates to serve as a robust hydrological foundation for subsequent water-quality simulations in data-limited basins. The approach offers promising applicability for similar catchments in East Asia and Vietnam.

TÓM TẮT

Dòng chảy mặt đóng vai trò then chốt trong chu trình thủy văn, quyết định quá trình vận chuyển chất ô nhiễm, dinh dưỡng và trầm tích, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng nước mặt. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu làm gia tăng các trận mưa cực đoan, nhu cầu mô phỏng dòng chảy dài hạn một cách ổn định và chính xác trở nên đặc biệt quan trọng, nhất là đối với các lưu vực có dữ liệu hạn chế. Tuy nhiên, các đánh giá mô hình dòng chảy từ góc độ “tiền xử lý” cho mô phỏng chất lượng nước vẫn còn ít được chú ý trong nghiên cứu hiện nay. Nghiên cứu này được thực hiện nhằm mô phỏng dòng chảy hàng ngày tại lưu vực sông Asahi (Okayama, Nhật Bản) giai đoạn 2002–2021 bằng mô hình Tank kết hợp

Từ khóa: Lưu vực
Asahi, Mô hình
Tank, Mô phỏng
dòng chảy, Tiến hoá
vi phân.

Differential Evolution và đánh giá hiệu suất mô hình qua các chỉ số NSE, R^2 , RMSE. Kết quả chỉ ra rằng mô hình đạt hiệu suất ổn định với R^2 khoảng 0,62–0,63, NSE cải thiện từ 0,35 (giai đoạn hiệu chỉnh) lên 0,48 (giai đoạn kiểm định), cùng RMSE dao động từ 2,4–2,6 mm/ngày. Bộ tham số tối ưu đã tái hiện rõ nét sự phân hoá thủy văn đặc trưng của lưu vực qua sự thay đổi của các tầng địa chất, với khả năng mô phỏng tốt dòng chảy thấp và trung bình cũng như biến động theo mùa. Tuy nhiên, sai số đáng kể xuất hiện ở một số đỉnh lũ cao do hạn chế về dữ liệu không gian và tác động từ hoạt động điều tiết hồ chứa. Nghiên cứu khẳng định tiềm năng của mô hình Tank như một công cụ gọn nhẹ, đáng tin cậy cho dự báo thủy văn và làm nền tảng cho mô phỏng chất lượng nước trong điều kiện dữ liệu hạn chế. Kết quả mở ra hướng ứng dụng cho các lưu vực tương đồng tại Đông Á và Việt Nam.

1. Giới thiệu

Dòng chảy mặt là một thành phần quan trọng của chu trình thủy văn, giữ vai trò quyết định đối với vận chuyển chất ô nhiễm, dinh dưỡng, trầm tích và sự biến đổi chất lượng nước mặt. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu làm gia tăng cả về tần suất lẫn cường độ của các trận mưa cực đoan, các lưu vực sông ngày càng chịu nhiều rủi ro liên quan đến lũ đột ngột, ô nhiễm lan truyền và biến động tải lượng nitơ, photpho và chất hữu cơ. Điều này đặt ra nhu cầu cấp thiết về các mô hình mô phỏng dòng chảy có độ tin cậy cao nhằm hỗ trợ dự báo thủy văn, đánh giá tác động khí hậu và mô phỏng chất lượng nước.

Trong nhiều thập kỷ, các mô hình thủy văn đã được phát triển từ dạng kinh nghiệm (empirical), khái niệm (conceptual) đến phân bố vật lý (physically based). Các mô hình như SWAT, HEC-HMS hay MIKE NAM được sử dụng rộng rãi, tuy nhiên thường yêu cầu dữ liệu đầu vào lớn và tham số hóa phức tạp. Ngược lại, mô hình Tank (Sugawara, 1967) là một mô hình khái niệm gọn nhẹ nhưng hiệu quả, được áp dụng rộng rãi tại Nhật Bản và nhiều quốc gia châu Á để mô phỏng dòng chảy dài hạn trong điều kiện dữ liệu hạn chế. Tank Model mô phỏng dòng chảy dựa trên hệ thống các thùng (tanks) mô phỏng các tầng chứa nước trong lưu vực, cho phép tái hiện tốt chế độ dòng chảy thấp, trung bình và biến động theo mùa.

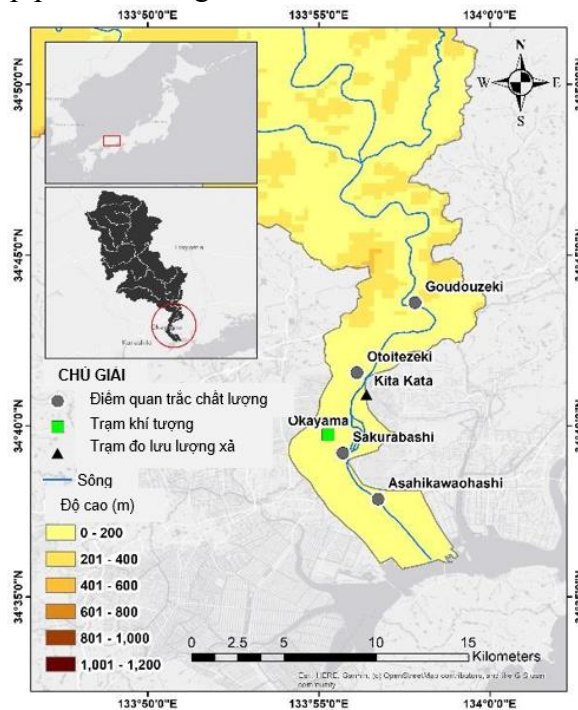
Trên thế giới mô hình Tank được sử dụng rộng rãi như một mô hình thủy văn dạng khối tập trung đơn giản nhưng hiệu quả. Cấu trúc các bể chứa xếp tầng cho phép mô phỏng đồng thời dòng chảy bề mặt, thấm và dòng ngầm, nhờ đó mô hình trở thành công cụ hữu ích trong quản lý tài nguyên nước. Các nghiên cứu quốc tế nhấn mạnh tính bền vững và độ tin cậy của mô hình, như phân tích độ nhạy toàn cục để cải thiện độ chính xác (Tanakamaru & Burges, 1996) hoặc tối ưu hóa tham số bằng thuật toán di truyền, qua đó nâng cao khả năng dự báo dòng chảy ở khu vực dữ liệu hạn chế (Rouhani & Farahi Moghadam, 2011). Tuy nhiên, mô hình vẫn chịu hạn chế trong mô phỏng các sự kiện cực đoan khi thiếu dữ liệu không gian. Ở châu Á, mô hình Tank được áp dụng phổ biến tại các lưu vực nhỏ và trung bình ở Hàn Quốc, Thái Lan, Indonesia, Việt Nam và Sri Lanka nhằm mô phỏng dòng chảy ngày, đánh giá tác động của khí hậu gió mùa, dự báo lũ và tối ưu hóa quản lý nước (Takada et al., 2008). Tại Việt Nam, Setiawan et al. (2003) đề xuất quy trình hiệu chỉnh tham số nhằm nâng cao độ chính xác mô phỏng cho lưu vực nông nghiệp, trong khi ở Ấn Độ mô hình được ứng dụng để đánh giá vai trò điều tiết của hồ chứa trong kiểm soát lũ đô thị (Nithila Devi et al., 2020). Ngoài ra, Nhật Bản, nơi mô hình Tank được Sugawara phát triển từ thập niên 1950–1960, mô hình trở thành tiêu chuẩn trong mô phỏng dòng chảy đô thị và nông thôn tại các lưu vực nhỏ chịu ảnh hưởng của bão, tuyết tan và lũ đô thị (Tanakamaru, 2009), đồng thời được mở rộng cho đánh giá chất lượng nước vùng ẩm (Amiri et al., 2010). Tuy nhiên, vẫn còn hạn chế trong việc đánh giá mô hình từ góc độ tiền xử lý cho mô phỏng chất lượng nước và trong tích hợp các thuật toán tối ưu hiện đại như Differential Evolution (DE) dưới bối cảnh biến đổi khí hậu.

Tại các lưu vực sông vừa và nhỏ điển hình là lưu vực sông Asahi (Okayama, Nhật Bản) với cấu trúc địa chất phức tạp, khí hậu phân mùa và sự phân bố của các hồ chứa ở thượng nguồn làm cho việc mô phỏng dòng chảy đòi hỏi một phương pháp tối ưu hóa hiệu quả hơn. Xuất phát từ thực tiễn đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm mô phỏng dòng chảy hàng ngày tại lưu vực sông Asahi cho giai đoạn 2002–2021 bằng mô hình Tank kết hợp với thuật toán Differential Evolution (DE). Mục tiêu của nghiên cứu là đánh giá hiệu suất mô hình thông qua các chỉ số NSE, R^2 và RMSE; đồng thời phân tích khả năng mô phỏng dòng chảy theo mùa, dòng chảy thấp – trung bình và các trận lũ cực trị. Kết quả nghiên cứu được kỳ vọng cung cấp nền tảng quan trọng cho các mô hình chất lượng nước và hướng đến ứng dụng trong dự báo thủy văn tại các lưu vực tương đồng ở Đông Á và Việt Nam.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1 Khái quát khu vực nghiên cứu

Lưu vực sông Asahi nằm ở trung tâm tỉnh Okayama, vùng Chugoku, tây nam Nhật Bản, với diện tích khoảng 1.810 km². Sông có chiều dài chính khoảng 142 km, bắt nguồn từ dãy núi Chugoku với đỉnh cao nhất là núi Asanabewashi (1.081 m) ở vùng phía bắc, và đổ ra biển Seto tại khu vực đồng bằng hạ lưu gần thành phố Okayama. Đây là một lưu vực sông điển hình vừa và lớn của Nhật Bản, với địa hình đa dạng: vùng thượng lưu là núi cao và lưu vực với địa chất chủ yếu là đá rhyolite và granite từ kỷ Phấn trắng; vùng trung lưu bao gồm trầm tích mềm như đá bùn Palaeozoic, tuff và diorite; trong khi vùng hạ lưu là đồng bằng phù sa và đất khai hoang, với độ dốc giảm dần và lớp phủ đất mỏng.



Hình 1. Địa bàn nghiên cứu lưu vực sông Asahi

(Nguồn: Tran Thi Minh Tam, 2024)

Về khí hậu, lưu vực thuộc vùng khí hậu ôn đới ẩm (phân loại Köppen Cfa), chịu ảnh hưởng của gió mùa Đông Á và bão nhiệt đới. Mùa mưa chính tập trung vào mùa hè (tháng 6–9), với lượng mưa lớn do hoạt động gió mùa và bão, chiếm hơn 60% lượng mưa hàng năm. Lượng mưa trung bình giảm dần từ khoảng 2.000 mm ở đầu nguồn đến 1.200 mm ở hạ lưu, với trung bình toàn lưu vực khoảng 1.400–1.500 mm/năm.

Thảm phủ thực vật chủ đạo là rừng tự nhiên và rừng trồng chiếm hơn 65% diện tích lưu vực (khoảng 1.182 km²), phần còn lại bao gồm đất nông nghiệp như ruộng lúa (160 km²), đất

canh tác khác (60 km²), khu dân cư (25 km²) và các loại đất khác. Đất chủ yếu là đất núi lửa Andosol ở vùng cao, đất nâu rừng ở trung lưu và đất phù sa ở hạ lưu, có khả năng giữ nước tốt nhưng dễ xói mòn bề mặt trong các trận mưa lớn. Đáng chú ý, sử dụng đất trong 30 năm qua (1976–2006) thay đổi không đáng kể giúp hạn chế nhiều động khi hiệu chỉnh mô hình thủy văn dựa trên chuỗi thời gian dài.

Nhờ đặc điểm địa hình dốc, thảm phủ rừng dày, chế độ mưa tập trung, cùng sự phân hóa dòng chảy mặt–ngầm theo mùa, lưu vực sông Asahi từ lâu đã được sử dụng làm điển hình trong các nghiên cứu thủy văn và tác động của biến đổi khí hậu ở Nhật Bản (Shimizu et al., 2011; Tanaka et al., 2021). Đặc biệt, trong hai thập kỷ gần đây lưu vực ghi nhận xu thế giảm lượng mưa, tăng nhiệt độ và gia tăng các sự kiện cực đoan – như trận lũ năm 2018 – đặt ra nhu cầu cấp thiết trong việc mô phỏng dòng chảy đáng tin cậy để phục vụ cảnh báo và quản lý lưu vực.

2.2 Cơ sở dữ liệu

Cơ sở dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu được tổng hợp từ các nguồn chính thống và có độ tin cậy cao, đảm bảo đáp ứng yêu cầu mô phỏng và đánh giá dòng chảy dài hạn. Dữ liệu khí tượng bao gồm nhiệt độ không khí, lượng mưa và độ ẩm theo ngày được thu thập từ Cơ quan Khí tượng Nhật Bản (Japan Meteorological Agency – JMA), cung cấp chuỗi quan trắc liên tục với độ chính xác cao, phù hợp cho phân tích các đặc trưng khí hậu và làm đầu vào cho mô hình thủy văn. Lượng bốc thoát hơi được tính toán bằng phương pháp Penman–Monteith và được tích hợp trong mô hình Tank/LST nhằm mô phỏng quá trình cân bằng nước mặt và nước trong đất.

Bên cạnh đó, dữ liệu dòng chảy hằng ngày được thu thập tại trạm Kitakata do Hiệp hội Sông ngòi Nhật Bản quản lý. Trạm này có vị trí đại diện cho cửa ra lưu vực và phản ánh đầy đủ diễn biến dòng chảy theo không gian – thời gian, từ các sự kiện dòng chảy nhanh trong mùa mưa đến dòng chảy cơ sở trong mùa khô. Tập dữ liệu này cho phép đánh giá toàn diện hiệu năng mô hình trong chuỗi thời gian 20 năm, tạo nền tảng để xác định mức độ tin cậy của mô phỏng dòng chảy phục vụ dự báo chất lượng nước.

2.3 Phương pháp thu thập, phân tích số liệu

Các bộ số liệu được chọn lọc theo nguyên tắc đồng nhất thời gian (cùng giai đoạn 2002–2021), đảm bảo tính liên tục và độ tin cậy.

Xử lý và kiểm tra dữ liệu: Trước khi phân tích, dữ liệu khí tượng – thủy văn được kiểm tra tính đồng nhất bằng kiểm định Pettitt và Buishand range test để phát hiện sự gián đoạn hoặc thay đổi đột ngột. Các giá trị ngoại lai được xác định bằng phương pháp boxplot và loại bỏ khi vượt quá 3 lần độ lệch chuẩn.

Phân tích xu thế: Để đánh giá biến động dài hạn của nhiệt độ, lượng mưa và lưu lượng, nghiên cứu sử dụng kiểm định phi tham số Mann–Kendall kết hợp với Sen’s slope estimator nhằm xác định xu thế tăng/giảm và tốc độ thay đổi trung bình theo thời gian.

2.4 Cấu trúc và các phần hợp thành của mô hình Tank

2.4.1 Cấu trúc của mô hình

Mô hình Tank thường bao gồm ba hoặc bốn bể chứa được sắp xếp theo chiều dọc, như được minh họa trong các sơ đồ mô tả (Hình 2). Mỗi bể chứa đại diện cho một lớp lưu trữ nước với chiều sâu h . Thông thường, mỗi bể có một hoặc hai lỗ thoát bên hông và một lỗ thoát đáy để nước chảy ra, ngoại trừ bể đáy không có lỗ thoát đáy.

Đầu vào của mô hình là lượng mưa, được đưa vào bể trên cùng. Đầu ra bao gồm lượng chảy từ các lỗ thoát bên hông của các bể và lượng bốc hơi từ bể trên cùng. Tổng lượng chảy từ các lỗ thoát bên hông đại diện cho lượng dòng chảy tổng thể của lưu vực mục tiêu.

Cấu trúc của mô hình Tank phản ánh các lớp địa chất tự nhiên, trong đó các bể chứa được coi là các tầng chứa nước. Nước trong bể đại diện cho lượng nước lưu trữ trong tầng chứa, với lượng chảy từ lỗ bên hông tương ứng với dòng chảy từ tầng chứa và lượng chảy từ lỗ đáy là lượng thấm xuống tầng dưới. Phần lưu trữ ở bể trên cùng được xử lý như hàm lượng nước bề

mặt hoặc gần bề mặt đất, do đó lượng chảy từ lỗ bên hông và lỗ đáy của bể này được xem là dòng chảy bề mặt và lượng thấm tương ứng.

Lượng chảy từ mỗi lỗ của bể chứa tuân theo mối quan hệ tuyến tính với chiều sâu nước, được biểu diễn bởi các phương trình sau:

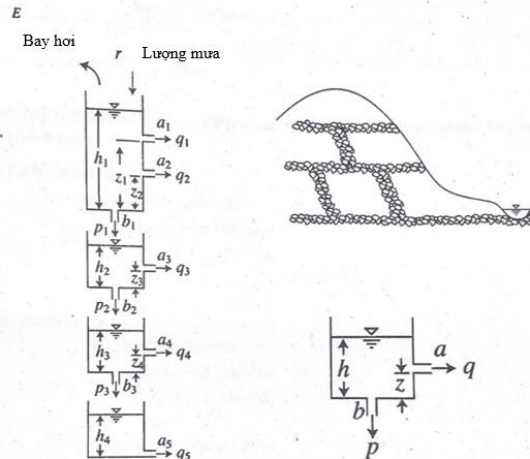
$$q = a(h-z)$$

Trong đó q là lượng chảy từ lỗ bên hông hoặc lượng thấm, a là hệ số dòng chảy, h là chiều sâu nước, và z là chiều cao lỗ so với đáy bể.

$$p = b.h$$

Trong đó p là lượng chảy từ lỗ đáy, b là hệ số thấm và h là độ sâu của nước.

Lưu lượng q tỷ lệ thuận với độ sâu nước nằm trên lỗ xả bên của bể, và lưu lượng p tỷ lệ thuận với độ sâu nước trong bể.



Hình 2. Cấu trúc của mô hình Tank

(Nguồn: Tran Thi Minh Tam, 2024)

2.4.2. Các thành phần của mô hình Tank

Lượng mưa là đầu vào chính cho hệ thống lưu vực, có thể dưới dạng mưa, bão, sương mù hoặc các hình thức nước rơi từ khí quyển khác. Các thiết bị đo mưa mặt đất thường được sử dụng để thu thập dữ liệu, với phạm vi bao phủ khu vực đóng vai trò quan trọng do sự biến đổi cục bộ của lượng mưa, đặc biệt ở các lưu vực lớn.

Nhu cầu bốc hơi của lưu vực được hiểu là lượng nước bốc hơi trong điều kiện không bị hạn chế bởi độ ẩm sẵn có của đất, phản ánh khả năng bốc hơi tối đa tương ứng với đặc điểm thảm thực vật địa phương. Đối với bề mặt nước mở, quá trình bốc hơi chủ yếu phụ thuộc vào hai nhóm yếu tố: (i) năng lượng cung cấp cho quá trình nhiệt hóa hơi, gắn với bức xạ mặt trời; và (ii) khả năng vận chuyển hơi nước ra khỏi bề mặt, chịu chi phối bởi các điều kiện khí động học như gió và độ ẩm không khí.

Trên bề mặt đất, bốc hơi bao gồm bốc hơi trực tiếp từ đất và thực vật, cùng với quá trình thoát hơi qua lá, vốn phụ thuộc vào lượng ẩm có thể cung cấp từ tầng đất phía dưới. Chính sự phụ thuộc vào độ ẩm sẵn có này tạo nên sự khác biệt giữa bốc hơi tiềm năng và bốc hơi thực tế. Đồng thời, bốc hơi tại lưu vực còn bị ảnh hưởng đáng kể bởi hiện trạng sử dụng đất, mật độ và loại hình lớp phủ thực vật, cũng như các điều kiện khí tượng tại chỗ.

Trong nghiên cứu này, bốc hơi tiềm năng (E) được tính toán theo phương pháp Penman (1948) sử dụng các dữ liệu khí tượng cơ bản gồm: nhiệt độ không khí trung bình, số giờ nắng, tốc độ gió và độ ẩm tương đối, nhằm mô tả đồng thời cả thành phần bức xạ và thành phần khí động học của quá trình bốc hơi.

$$E = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) E_{sun} + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) E_{wind}$$

Trong đó:

E : lượng bốc hơi tiềm năng (mm/ngày)

E_{sun} : bốc hơi do bức xạ (mm/ngày)

E_{wind} : bốc hơi do vận chuyển hơi nước (mm/ngày)

Δ : độ dốc của đường áp suất bão hoà tại nhiệt độ không khí (hPa/hPa/ $^{\circ}$ C)

γ : hằng số đo độ ẩm (≈ 0.66 hPa/ $^{\circ}$ C)

Lượng mưa không bị chặn hoặc bốc hơi cuối cùng sẽ thấm vào đất hoặc tạo dòng chảy bề mặt. Quy trình thấm bị ảnh hưởng bởi cường độ mưa, hàm lượng độ ẩm ban đầu và đặc tính đất. Nước thấm có thể góp phần vào nước ngầm hoặc dòng chảy dưới bề mặt.

Phương trình thấm Horton (1940):

$$f(t) = fc + (f0 - fc) e^{-kt}$$

Trong đó:

$f(t)$: khả năng thấm tại thời điểm t (mm/giờ)

$f0$: khả năng thấm ban đầu (mm/giờ)

fc : khả năng thấm tối thiểu và ổn định (mm/giờ)

k : hằng số

Lượng mưa thừa tích tụ trên bề mặt, lấp đầy các chỗ trũng trước khi di chuyển xuống dốc dưới dạng dòng chảy bề mặt. Phần thấm có thể góp phần vào dòng chảy dưới bề mặt, kết hợp với bề mặt để tạo dòng chảy trực tiếp. Dòng chảy sông bao gồm dòng chảy trực tiếp, dòng chảy cơ sở từ nước ngầm và dòng chảy dưới bề mặt.

2.5 Quy trình tính toán Tank Model

Bài toán mô phỏng dòng chảy hàng ngày vào ngày thứ n , với $h_i(n)$ (mm) ($i=1,2,3,4$) là chiều sâu nước của bể thứ i . Với lượng mưa $r(n)$ (mm/ngày), quy trình tính toán được thực hiện như sau (với $\Delta t = 1$ ngày):

Đối với bể trên cùng:

(a) Chiều sâu nước tạm thời được xác định

$$h_1' = h_1(n-1) + r(n) \cdot \Delta t$$

Trong trường hợp không mưa, trừ thêm lượng bốc hơi $E(n)$.

$$h_1' = h_1(n-1) - E(n) \cdot \Delta t$$

(b) Dựa trên giá trị h_1' , các lưu lượng qua lỗ thoát gồm $q_1(n)$, $q_2(n)$ và lưu lượng thấm $p_1(n)$ được xác định như sau:

$$q_1(n) = \begin{cases} a_1(h_1' - z_1) & (h_1' \geq z_1) \\ 0 & (h_1' < z_1) \end{cases}$$

$$q_2(n) = \begin{cases} a_2(h_1' - z_2) & (h_1' \geq z_2) \\ 0 & (h_1' < z_2) \end{cases}$$

$$p_1(n) = b_1 \cdot h_1'$$

(c) Chiều sâu nước còn lại trong bể thứ nhất được tính bằng:

$$h_1(n) = h_1' - \{q_1(n) + q_2(n) + p_1(n)\} \cdot \Delta t$$

Các bước (a)–(c) được lặp lại để tính dòng chảy cho các bể phía dưới theo thứ tự giảm dần. Điểm khác biệt là đầu vào của bể không còn là lượng mưa mà là dòng thấm từ bể phía trên. Cụ thể, trong bước (a) của bể thứ hai, lượng thấm p_1 được sử dụng thay cho lượng mưa r . Ngoài ra, đối với bể cuối cùng (bể thấp nhất), không cần tính dòng chảy qua lỗ thoát đáy.

Sau khi tính toán lượng chảy của tất cả các bể, lượng dòng chảy từ các lỗ bên hông của tất cả các bể được tổng hợp để trở thành lượng dòng chảy của lưu vực vào ngày thứ n :

$$Q(n) = q_1(n) + q_2(n) + q_3(n) + q_4(n) + q_5(n)$$

2.6 Hiệu chỉnh tham số bằng thuật toán Differential Evolution (DE)

Để đảm bảo bộ tham số của mô hình có tính đại diện và tối ưu, thuật toán tối ưu tiến hóa DE được tích hợp vào quá trình hiệu chỉnh. DE giải quyết vấn đề bằng cách tạo ra một quần thể

gồm vectơ $N_p D$ đa chiều, được ký hiệu là X_{iG} , $i=1, 2, \dots, N_p$, trong đó i , G đại diện cho các tham số giá trị thực. Quần thể được cải thiện thông qua việc áp dụng đột biến, lai chéo.

DE tạo ra các vectơ tham số mới bằng cách làm xáo trộn một vectơ hiện có. Điều này được thực hiện bằng cách cộng thêm sự khác biệt vectơ ngẫu nhiên được co giãn của hai vectơ quần thể được chọn ngẫu nhiên vào vectơ quần thể thứ ba được chọn ngẫu nhiên. Các tham số của vectơ đột biến sau đó được trộn lẫn với các tham số của một vectơ khác được xác định trước, được gọi là vectơ mục tiêu, dẫn đến việc tạo ra vectơ thử nghiệm. Trong giai đoạn chọn lọc, vectơ thử nghiệm cạnh tranh với vectơ mục tiêu. Trong bước chọn và lưu, vectơ có giá trị hàm mục tiêu thấp hơn được đánh dấu là thành viên của thế hệ tiếp theo trong vấn đề cực tiểu hóa. Quy trình đột biến, tái tổ hợp và chọn lọc này được lặp lại cho đến khi điểm tối ưu được tìm thấy hoặc một tiêu chí kết thúc được chỉ định trước được đáp ứng.

Kết quả tối ưu hóa từ DE tạo ra bộ thông số mô hình ổn định, giúp mô phỏng dòng chảy chính xác và phục vụ hiệu quả việc dự báo chất lượng nước trong giai đoạn tiếp theo.

2.7 Kiểm định mô hình qua các chỉ số R-squared (R^2), Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) và Root Mean Square Error (RMSE)

Việc lựa chọn các hàm mục tiêu phù hợp để đo lường sai số hoặc mức độ thích hợp của mô phỏng thủy văn đóng vai trò quan trọng trong tự động hóa, tối ưu hóa cũng như trong đánh giá hiệu năng mô hình ở giai đoạn hiệu chỉnh và kiểm định. Trong nghiên cứu này, độ chính xác của dòng chảy mô phỏng từ mô hình Tank được đánh giá thông qua các chỉ số R^2 , NSE và RMSE. Cụ thể:

Chỉ số R^2 được sử dụng để đo lường phần trăm phương sai trong biến phụ thuộc mà các biến độc lập trong mô hình có thể giải thích, và nằm trong khoảng từ 0 đến 1. Giá trị R^2 bằng 1 cho thấy mô hình dự đoán chính xác biến phụ thuộc, R^2 cao hơn chỉ ra sự phù hợp tốt hơn của mô hình với tập dữ liệu.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

NSE định lượng độ chính xác của đầu ra mô hình cho các biến, với giá trị từ $-\infty$ đến 1. Giá trị NSE bằng 1 ngụ ý sự khớp hoàn hảo giữa giá trị mô phỏng và quan sát.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

RMSE phục vụ như một hàm mục tiêu phổ biến trong các vấn đề tối ưu hóa, đặc biệt trong ngữ cảnh hồi quy hoặc dự đoán. RMSE được tính như căn bậc hai của trung bình các khác biệt bình phương giữa giá trị dự đoán và quan sát, từ 0 đến $+\infty$. Khi RMSE bằng 0, nó biểu thị sự tương ứng hoàn toàn giữa giá trị mô phỏng và quan sát.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}$$

Trong đó:

i : thời gian (ngày),

N : tổng số quan trắc,

$Q_{obs,i}$: dòng chảy quan trắc tại thời điểm i ,

$Q_{sim,i}$: dòng chảy mô phỏng tại thời điểm i ,

$\bar{Q}_{obs}$: giá trị trung bình của dòng chảy quan trắc.

3. Kết quả và thảo luận

3.1 Kết quả hiệu chỉnh tham số mô hình Tank

Sau 200.000 thế hệ mô phỏng bằng thuật toán DE để hiệu chỉnh mô hình Tank đã cho ra bộ tham số tối ưu của mô hình (Bảng 1). Tất cả tham số đều nằm trong khoảng giá trị cho phép và phản ánh đúng đặc điểm địa mạo – thổ nhưỡng – thủy văn của khu vực nghiên cứu. Trong đó, hệ số dòng chảy mặt $a_1 = 0.04475 \left(m^{-\frac{2}{3}}d^{-1}\right)$ có giá trị tương đối thấp, cho thấy dòng chảy mặt

không quá mạnh. Điều này phù hợp với đặc trưng lưu vực có độ che phủ rừng lớn (>65%) và đất Andosol có khả năng thấm cao. Dung tích chứa $Z_1 = 10,5 \text{ mm}$ và $S_1 = 15,5 \text{ mm}$ cho thấy lớp đất mặt bão hòa nhanh trong các trận mưa lớn dẫn đến dòng chảy mặt xuất hiện nhưng chỉ tồn tại trong thời gian ngắn, phù hợp với địa hình dốc và cấu trúc mưa mùa (60% mưa tập trung vào tháng 6–9). Các hệ số thoát nước của tầng giữa và tầng dưới (a_2 – a_4 – a_5) cho thấy hai cơ chế thoát nước tương phản: giá trị a_2 và a_5 rất nhỏ ($<0,001 \text{ d}^{-1}$) thể hiện sự thoát nước chậm ở các tầng sâu hơn, góp phần duy trì dòng chảy ngầm ổn định trong mùa khô, trong khi giá trị a_3 và a_4 lớn hơn ($>0,35 \text{ d}^{-1}$) phản ánh dòng chảy trung gian khá nhanh khi chảy qua các lớp đá mùn và trầm tích núi lửa. Dung tích trữ ở tầng sâu $S_4 = 292 \text{ mm}$ khẳng định vai trò của tầng nước dưới đất như “bộ đệm” giúp duy trì dòng chảy ngầm của lưu vực. Bộ tham số trên không chỉ mô tả đúng cơ chế thủy văn ở lưu vực Asahi mà còn phản ánh những biến đổi dài hạn trước sự thay đổi của khí hậu, như giảm lượng mưa trung bình (giảm ~290 mm so với 1978–2007) và tăng nhiệt độ ($0,1^\circ\text{C}/\text{năm}$), làm tăng bốc hơi và giảm tần suất lũ.

Bảng 1. Tham số của mô hình Tank

Tham số	Khoảng tham chiếu	Giá trị tối ưu
$a_1(m^{-\frac{2}{3}}d^{-1})$	0.0 - 0.5	0.04475
$a_2(d^{-1})$	0.0 - 0.5	0.00062
$a_3(d^{-1})$	0.0 - 0.5	0.49805
$a_4(d^{-1})$	0.0 - 0.5	0.35662
$a_5(d^{-1})$	0.0 - 0.5	0.00039
$b_1(d^{-1})$	0.0 - 0.5	0.49511
$b_2(d^{-1})$	0.0 - 0.5	0.20926
$b_3(d^{-1})$	0.0 - 0.5	0.21921
$Z_1(mm)$	10.0 - 50.0	10.5
$Z_2(mm)$	10.0 - 50.0	11
$Z_3(mm)$	10.0 - 50.0	46
$Z_4(mm)$	10.0 - 50.0	10
$S_1(mm)$	0.0 - 300	15.5
$S_2(mm)$	0.0 - 300	7.5
$S_3(mm)$	0.0 - 300	4.5
$S_4(mm)$	0.0 - 300	292

So sánh với các nghiên cứu trước, bộ tham số khá tương đồng với cấu hình Tank Model kinh điển của Sugawara (1961), nhưng có các hệ số thấm cao hơn do đặc tính đất Andosol – điều không xuất hiện trong các lưu vực đô thị hóa mà Sugawara phân tích. So với nghiên cứu của Shimizu *et al.* (2011), dung tích trữ tầng mặt nhỏ hơn (10–15 mm so với 20–30 mm), phản ánh tính đa dạng địa hình của Asahi rộng và phức tạp hơn lưu vực thượng nguồn nhỏ mà họ nghiên cứu. Sự khác biệt này xuất phát từ tỷ lệ rừng cao hơn và sự phân lớp đất rõ hơn, khiến phản ứng bề mặt của Asahi chậm hơn.

3.2 Hiệu suất mô phỏng dòng chảy

Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình Tank là phù hợp, thể hiện qua $R^2 = 0,62$, $NSE = 0,35$ và $RMSE = 2,36 \text{ mm/ngày}$ trong giai đoạn hiệu chỉnh (2002–2011). Hiệu suất cải thiện rõ rệt trong giai đoạn kiểm định (2012–2021) với NSE tăng lên 0,48 và R^2 đạt 0,63. Điều này cho thấy mô hình mô phỏng tốt dòng chảy thấp và trung bình, đặc biệt nhờ các tham số tầng sâu (b_2 , b_3 , S_4) duy trì dòng chảy ngầm ổn định – đặc trưng của lưu vực rừng núi.

Bảng 2. Hiệu suất mô phỏng mô hình Tank

Giai đoạn	R^2	NSE	$RMSE$
Hiệu chỉnh (2002-2011)	0.62	0.35	2.36 (mm/ngày)

Kiểm định (2012-2021)

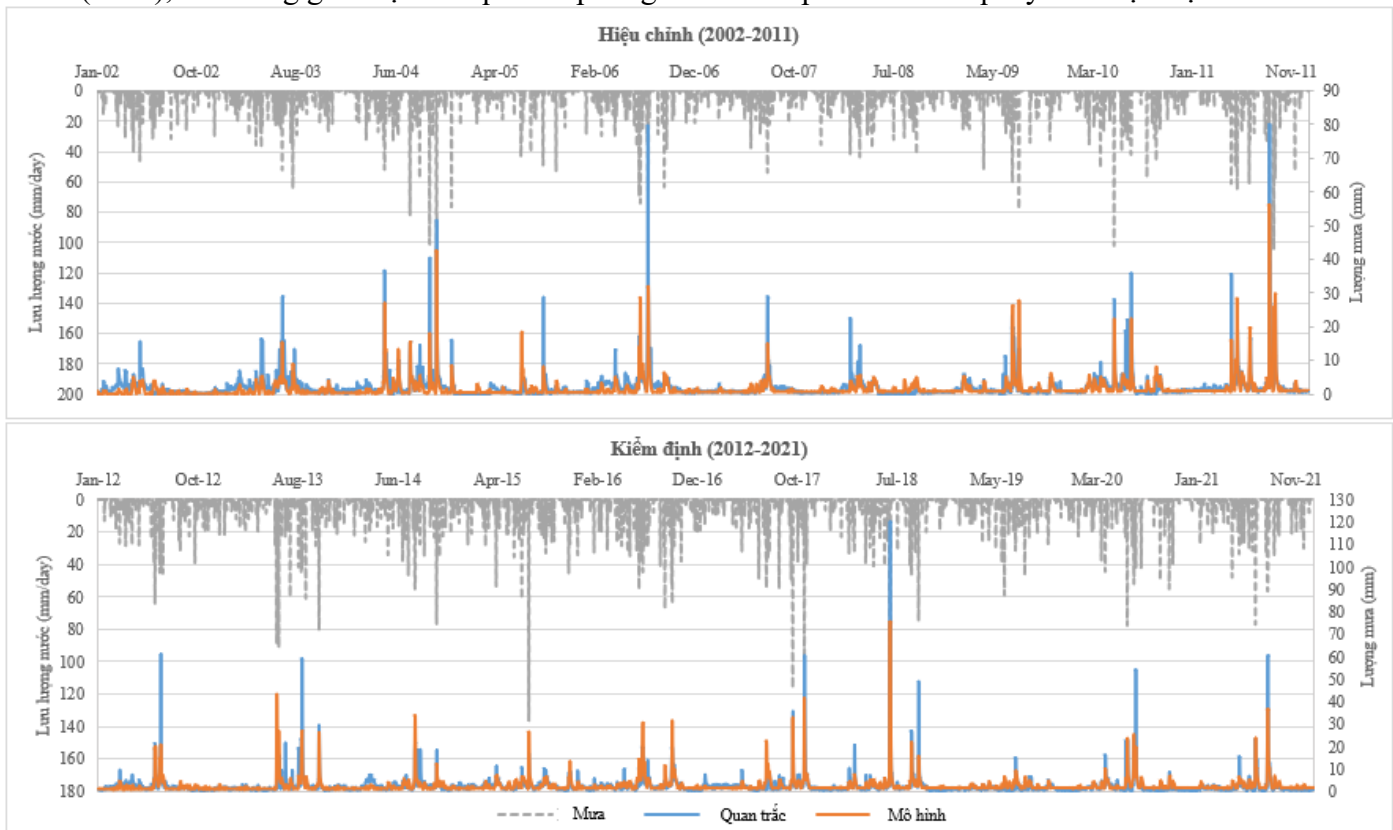
0.63

0.48

2.64 (mm/ngày)

Mặc dù giá trị NSE ở mức trung bình, nhưng kết quả này vẫn nằm trong khoảng chấp nhận được đối với các mô hình khái niệm mưa–dòng chảy ở bước thời gian ngày theo tiêu chí của Moriasi *et al.* (2007). So sánh với các nghiên cứu trước, NSE ở đây thấp hơn một chút so với nghiên cứu của Shimizu *et al.* (2011) (NSE khoảng 0,6-0,7) sử dụng mô hình hydrogeomorphic đa tầng cho lưu vực đầu nguồn Nhật Bản, có thể do mô hình LST đơn giản hơn và không bao gồm yếu tố địa mạo chi tiết. Tuy nhiên, nó cao hơn so với ứng dụng Tank Model ở lưu vực Hieu River (Việt Nam) với NSE 0,3-0,4, nơi dữ liệu hạn chế hơn. NSE có xu hướng tăng theo thời gian (từ 0,35 lên 0,48), phản ánh khả năng thích ứng của mô hình với biến đổi khí hậu, như giảm mưa và tăng bay hơi, dẫn đến dòng chảy ổn định hơn ở giai đoạn sau.

Theo bộ chỉ số đánh giá, hiệu suất mô phỏng đạt mức tin cậy tuy nhiên mô hình vẫn chưa đánh giá chính xác ở các năm 2006 và 2018 với sai số ước tính khoảng 20–30% tại thời điểm cực đại. Hai ngoại lệ này phản ánh những điều kiện thủy văn đặc biệt mà cấu trúc Tank chưa mô tả đầy đủ. Năm 2006 ở lưu vực Asahi ghi nhận một chuỗi mưa cực đoan liên quan do ảnh hưởng của bão nhiệt đới, dòng chảy mặt tăng đột biến và có sự phân hoá theo không gian. Mô hình sử dụng dữ liệu mưa điểm của JMA thay vì phân bố mưa theo dạng ô lưới, vì vậy sự phân hóa mạnh về cường độ mưa trong lưu vực chưa được phản ánh chính xác. Kết quả là lượng dòng chảy được mô phỏng thấp hơn đáng kể so với quan trắc thực tế. Tương tự, năm 2018 khi lưu vực đã trải qua trận lũ lịch sử với lưu lượng vượt 4.500 m³/s. Các yếu tố ngoài phạm vi mô phỏng như gia tăng mật độ thảm thực vật gỗ ven sông làm thay đổi đặc tính trữ – thoát nước của hành lang sông, cùng với tác động điều tiết của các hồ chứa thượng nguồn, góp phần tạo ra sự chênh lệch giữa dữ liệu quan trắc và dòng chảy mô phỏng. Nhóm yếu tố này khiến quan trắc thực tế thể hiện đỉnh lũ cao hơn so với kết quả từ mô hình. Những sai lệch này đồng nhất với kết luận của Shimizu *et al.* (2011), vốn cũng ghi nhận kết quả mô phỏng đỉnh lũ thấp hơn khi bỏ qua yếu tố địa mạo chi tiết.



Hình 3. Dòng chảy quan trắc và mô phỏng ở trạm Kitakata bởi mô hình Tank giai đoạn 2002-2021

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã xây dựng, hiệu chỉnh và kiểm định thành công mô hình Tank kết hợp thuật toán tối ưu DE cho mô phỏng dòng chảy dài hạn tại lưu vực sông Asahi giai đoạn 2002–2021. Bộ tham số tối ưu thu được cho thấy mô hình vận hành ổn định, với R^2 đạt 0,62–0,63, NSE đạt 0,35–0,48 và RMSE duy trì trong khoảng 2,36–2,64 mm/ngày. Các mô phỏng tái hiện tốt biến động dòng chảy theo mùa, sự chuyển tiếp giữa các pha ẩm–khô và đặc điểm dòng chảy ngầm của lưu vực, qua đó phản ánh đúng cấu trúc thủy văn đặc trưng của khu vực. Mặc dù vẫn xuất hiện sai lệch ở một số đỉnh lũ lớn, mô hình nhìn chung đáp ứng yêu cầu về độ tin cậy cho mô phỏng dòng chảy theo ngày và sẵn sàng phục vụ các bước phân tích tiếp theo.

Kết quả này khẳng định mô hình Tank tối ưu hóa bằng DE là công cụ mô phỏng hiệu quả trong điều kiện đặc điểm địa hình – khí hậu phức tạp. Bộ tham số đã hiệu chỉnh có thể được sử dụng trực tiếp làm đầu vào cho các mô hình chất lượng nước, phục vụ ước tính tải lượng ô nhiễm và đánh giá rủi ro sau các sự kiện mưa lớn. Nghiên cứu đồng thời mở ra tiềm năng ứng dụng cho các lưu vực tương đồng tại Việt Nam và Đông Á, nơi dữ liệu quan trắc thiếu sự đồng bộ và biến đổi khí hậu ngày càng rõ nét đòi hỏi các mô hình gọn nhẹ nhưng đáng tin cậy.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ho, T. P., Nguyen, X. T., Chikamori, H., & Okubo, K. (2018). A hydrological tank model assessing historical runoff variation in the Hieu River Basin. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 15(1), 75–86.
- Hong, N., Hama, T., Suenaga, Y., Aqili, S., Huang, X., Wei, Q., & Kawagoe, S. (2016). Application of a modified conceptual rainfall-runoff model to simulation of groundwater level in an undefined watershed. *Science of the Total Environment*, 541, 383–390. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.026>
- Horton, R. E. (1940). An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil Science Society of America Journal*, 5(C), 399–417.
- Islam, M. T., Yoshida, K., Kajikawa, Y., & Nishiyama, S. (2022). Developing 3-D numerical flood flow model for vegetated rivers: A case study for lower Asahi River flooding in Japan. In *Proceedings of the 39th IAHR World Congress*. <https://doi.org/10.3850/IAHR-39WC252171192022989>
- Kawamura, A., Amaguchi, H., Olsson, J., & Tanouchi, H. (2023). Urban flood runoff modeling in Japan: Recent developments and future prospects. *Water*, 15(15), Article 2733. <https://doi.org/10.3390/w15152733>
- Kimura, F. (1961). On the storage function method for runoff analysis. *Journal of Research of Public Works Research Institute*, 8, 1–24.
- Lan, T., Lin, K. R., Xu, C. Y., Tan, X. Z., & Chen, X. H. (2020). Dynamics of hydrological model parameters: Mechanisms, problems, and solutions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(3), 1347–1366. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1347-2020>
- Lee, J. W., Chegal, S. D., & Lee, S. O. (2020). A review of Tank Model and its applicability to various Korean catchment conditions. *Water*, 12(12), Article 3588. <https://doi.org/10.3390/w12123588>
- Nithila Devi, N., Sridharan, B., Bindhu, V. M., Narasimhan, B., Bhallamudi, S. M., Bhatt, C. M., Usha, T., Vasan, D. T., & Kuiry, S. N. (2020). Investigation of role of retention storage in tanks (small water bodies) on future urban flooding: A case study of Chennai City, India. *Water*, 12(10), Article 2875. <https://doi.org/10.3390/w12102875>
- Peng, S., Mihara, K., Xu, X., Kuramochi, K., Toma, Y., & Hatano, R. (2024). Modeling hydrological processes under multi-model projections of climate change in a cold region of Hokkaido, Japan. *Catena*, 234, Article 107605. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107605>

- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120–145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- Rouhani, H., & Farahi Moghadam, M. (2011). Parameter estimation of Tank and SIMHYD models using genetic algorithm. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 35(C2), 195–206.
- Santos, C. A. G., Freire, P. K. M. M., Arruda, P. M., & Mishra, S. K. (2003). Application of a differential evolution optimizer to the tank model. In *Proceedings of the International Water Resources Association (IWRA) Congress*. Retrieved from <https://iwra.org/proceedings/congress/resource/PAP00-5066.pdf>
- Sayama, T. (2014). Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Model Technical Manual (Technical Note of PWRI No. 4277). International Center for Water Hazard and Risk Management (ICHARM), Public Works Research Institute.
- Setiawan, B. I., Fukuda, T., & Nakano, Y. (2003). Developing procedures for optimization of Tank Model's parameters. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal of Scientific Research and Development*, 5, 1–12.
- Shakti, P. C., Nakatani, T., & Misumi, R. (2018). Hydrological simulation of small river basins in northern Kyushu, Japan, during the extreme rainfall event of July 5–6, 2017. *Journal of Disaster Research*, 13(2), 396–409. <https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0396>
- Shimizu, T., Shinoda, S., Kawamura, S., & Obara, H. (2011). Runoff characteristics and observations on evapotranspiration in forest watersheds. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, 24(3), 153–165.
- Shrestha, S., Bae, D.-H., Hok, P., Ghimire, S., & Pokhrel, Y. (2021). Future hydrology and hydrological extremes under climate change in Asian river basins. *Scientific Reports*, 11, Article 17089. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96656-2>
- Sugawara, M. (1961). On the analysis of runoff structure about several Japanese rivers. *Japanese Journal of Geophysics*, 2(4), 1–13.
- Sugawara, M. (1972). *Methods of runoff analysis*. Kyoritsu Shuppan. (Original work published 1956)
- Takada, S., Tachikawa, Y., Shiiba, M., & Ichikawa, Y. (2008). Development of a distributed hydrological model based on grid with Tank Model for different land uses in Southeast Asia. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, B1 (Hydraulic Engineering)*, 64, 1–12.
- Tanaka, S., Tachikawa, Y., Ichikawa, Y., & Yorozu, K. (2021). Impact assessment of upstream flooding on extreme flood frequency in the downtown part of the Asahi River basin by using the S14 scenario. *Journal of Hydrology: Volume 554*, p. 370-382. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.012>
- Tanakamaru, H. (2009). Impacts of climate change on hydrological cycle in Japan. *Journal of the Japan Society of Hydrology and Water Resources*, 22(2), 65–78.
- Tanakamaru, H., & Burges, S. J. (1996). Application of global optimization to parameter estimation of the Tank Model. *Proceedings of the International Conference on Water Resources & Environmental Research: Towards the 21st Century*, 39–46.
- Tran Thi Minh Tam (2024). Analysis of the effects of climate change and water discharge on the water quality of the Asahi River in the period of 2002-2021.
- Yao, H., Hashino, M., Terakawa, A., & Suzuki, T. (1998). Comparison of distributed and lumped hydrological models. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 42, 163–168. Retrieved from https://www.jstage.jst.go.jp/article/prohe1990/42/0/42_0_163/_pdf

- Ye, L., Zhou, J., Zeng, X., & Guo, J. (2014). Multi-objective optimization for construction of prediction interval of hydrological models based on ensemble simulations. *Journal of Hydrology*, 519(Part A), 925–933. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.026>
- Yokoo, Y., Kazama, S., Sawamoto, M., & Nishimura, H. (2001). Regionalization of lumped hydrological model parameters based on multiple regression. *Journal of Hydrology*, 246(1–4), 209–222. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00372-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00372-9)