

## **XU THẾ BIẾN ĐỔI LƯU LƯỢNG MÙA KIẾT TẠI KRATIE VÀ SÔNG TIỀN - HẬU**

**Nguyễn Đăng Tính<sup>1</sup>, Nguyễn Trịnh Chung<sup>1\*</sup>**

**Tóm tắt:** Nghiên cứu phân tích xu thế biến đổi lưu lượng mùa kiệt tại các trạm Kratie, Tân Châu và Châu Đốc trong giai đoạn 1980-2024 nhằm nhận diện tác động lan truyền của biến động thượng lưu Mekong đến hạ lưu Đồng bằng sông Cửu Long. Các phương pháp được sử dụng gồm kiểm định Mann-Kendall, ước lượng độ dốc Theil-Sen và kiểm định điểm gãy Pettitt. Kết quả cho thấy lưu lượng mùa kiệt có xu thế giảm rõ rệt và có ý nghĩa thống kê tại Kratie ( $Z = -2,48$ ;  $p = 0,013$ ), với tốc độ suy giảm trung bình khoảng  $58 \text{ m}^3/\text{s}/\text{năm}$ . Xu thế giảm này tiếp tục lan truyền xuống Tân Châu ( $Z = -1,98$ ;  $p = 0,047$ ; khoảng  $35 \text{ m}^3/\text{s}/\text{năm}$ ) và yếu hơn tại Châu Đốc ( $p = 0,071$ ; khoảng  $28 \text{ m}^3/\text{s}/\text{năm}$ ). Kiểm định Pettitt xác định điểm gãy cấu trúc xuất hiện vào khoảng năm 2010, phản ánh sự chuyển pha trong chế độ dòng chảy của lưu vực, đồng thời trùng khớp với giai đoạn phát triển và vận hành mạnh mẽ của hệ thống hồ chứa thượng lưu. Sự thay đổi này kết hợp với tác động của biến đổi khí hậu đã làm giảm đáng kể lưu lượng mùa khô, tăng nguy cơ thiếu nước và xâm nhập mặn tại Đồng bằng sông Cửu Long, đặt ra yêu cầu cấp thiết về dự báo sớm và quản lý tổng hợp nguồn nước.

**Từ khóa:** Mùa kiệt, xu thế, Mann-Kendall, Theil-Sen, Pettitt, Kratie, Tân Châu, Châu Đốc.

### **1. GIỚI THIỆU**

Hệ thống sông Mekong giữ vai trò sống còn đối với an ninh nguồn nước và phát triển bền vững ĐBSCL, vốn phụ thuộc chủ yếu vào dòng chảy xuyên biên giới từ thượng nguồn. Trong đó, Kratie là cửa ngõ hạ lưu, đại diện cho tổng lượng nước vào đồng bằng Việt Nam, còn Tân Châu (sông Tiền) và Châu Đốc (sông Hậu) phản ánh điều kiện dòng chảy cuối nguồn chịu tác động của thủy triều, phân lưu và xâm nhập mặn. Trong mùa kiệt (tháng 1-4), lưu lượng tại Kratie gần như quyết định trực tiếp khả năng duy trì dòng nền, cấp nước và cân bằng mặn - ngọt trên hệ thống cửa sông Tiền - Hậu (Li et al., 2017; MRC, 2023).

Phát triển thủy điện trên lưu vực đã làm tái phân bố dòng chảy theo mùa, với đỉnh lũ giảm rõ rệt và dòng kiệt có xu hướng được điều tiết phục vụ phát điện; song tại một số trạm, dòng kiệt vẫn giảm mạnh trong các năm ENSO (Lauri et al., 2012; Räsänen et al., 2012). Chuỗi hồ chứa bậc thang trên dòng chính và phụ lưu (Xiaowan, Nuozhadu, Nam Theun 2, Xayaburi...) đã làm phẳng đường quá trình lưu lượng, giảm đỉnh lũ và hạn chế lượng nước bổ sung mùa khô về hạ lưu (Pokhrel et al., 2018), trong bối cảnh biến đổi khí hậu và các pha El Niño làm dòng kiệt thấp hơn trung bình, mặn xâm nhập sâu hơn (MRC, 2024). Cùng lúc, cơ chế điều tiết tự nhiên của Hồ Tonle Sap - bộ đệm sinh thái quan trọng nhất của lưu vực - suy yếu với biên độ đảo chiều và thể tích trao đổi nước giảm trên 30% trong hai thập niên, làm giảm đáng kể dòng chảy mùa khô về Việt Nam (Arias et al., 2012; Morovati et al., 2023). Các nghiên cứu mô phỏng cho

thấy tác động vận hành hồ chứa hiện đã tương đương hoặc vượt ảnh hưởng của biến đổi khí hậu, khẳng định tổ hợp hồ chứa - khí hậu - khai thác nước đang tái cấu trúc chế độ thủy văn toàn lưu vực (Lauri et al., 2012; Räsänen et al., 2012; Pokhrel et al., 2018).

Ở góc độ quản lý, chuỗi trạm Kratie - Tân Châu - Châu Đốc được MRC sử dụng như bộ chỉ báo dòng chảy vào/ra đồng bằng và đánh giá hạn - mặn hằng năm (MRC, 2023), đồng thời cung cấp cơ sở định lượng cho mô hình dự báo nguồn nước và vận hành công kiểm soát mặn vùng ven biển. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này nhằm: (1) nhận diện xu thế biến đổi lưu lượng mùa kiệt tại Kratie, Tân Châu và Châu Đốc giai đoạn 1980-2024; (2) kiểm định sự thay đổi cấu trúc chuỗi dòng chảy trước và sau năm 2010 (thời điểm các hồ chứa thượng lưu vận hành ổn định) bằng các phương pháp phi tham số Mann-Kendall, Theil-Sen và Pettitt; và (3) phân tích cơ chế truyền dẫn dòng chảy thượng - hạ lưu, qua đó làm rõ mối liên hệ giữa biến động thượng nguồn và tình trạng hạn hán - xâm nhập mặn mùa khô tại ĐBSCL.

### **2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP**

#### **2.1. Dữ liệu**

Chuỗi lưu lượng trung bình tháng ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) giai đoạn 1980-2024 được sử dụng tại ba trạm đại diện dọc trục sông Mekong - ĐBSCL: Kratie (Campuchia), Tân Châu (sông Tiền) và Châu Đốc (sông Hậu), phản ánh quá trình truyền dẫn dòng chảy từ cửa ngõ hạ lưu đến các cửa sông chính, nơi chịu tác động của thủy triều, phân lưu và xâm nhập mặn. Số liệu được tổng hợp từ cơ sở dữ liệu thủy văn của MRC (2024), Cục Khí tượng Thủy văn Việt Nam và các báo cáo quốc gia về nguồn nước vùng hạ lưu (MRC, 2023), được chuẩn hóa về đơn vị  $\text{m}^3/\text{s}$ , đồng bộ theo lịch dương; các khoảng trống ngắn hạn

---

<sup>1</sup>Trường Đại học Thủy lợi

\* Tác giả liên hệ: nguyentrinhchung@tlu.edu.vn

(dưới ba tháng) được nội suy tuyến tính dựa trên tương quan chéo cao giữa các trạm ( $R^2 > 0,85$ ).

Để phản ánh sự chuyển đổi chế độ dòng chảy, chuỗi số liệu được chia thành hai giai đoạn: 1980-2009 (tiềm năng trạng thái gần tự nhiên, trước khi phát triển mạnh các cụm hồ chứa trên dòng chính và phụ lưu) và 2010-2024 (giai đoạn chịu điều tiết nhân tạo rõ rệt, gắn với vận hành các hồ lớn như Xiaowan, Nuozhadu, Nam Theun 2, Xayaburi và chuỗi hồ chứa phụ lưu ở Lào, Thái Lan, Trung Quốc). Phân kỳ này phù hợp với các nghiên cứu về giai đoạn chuyển đổi thủy văn của lưu vực Mekong (Lauri et al., 2012; Räsänen et al., 2012; Pokhrel et al., 2018; MRC, 2023) và cho phép so sánh định lượng sự khác biệt về cường độ, xu thế và biến thiên mùa kiệt, qua đó đánh giá ảnh hưởng của điều tiết hồ chứa và biến đổi khí hậu đến dòng chảy nền về hạ lưu ĐBSCL.

## 2.2. Phương pháp

Bốn nhóm phương pháp chính được sử dụng để nhận diện xu thế, định lượng tốc độ biến đổi và xác định sự thay đổi cấu trúc trong chuỗi lưu lượng mùa kiệt tại ba trạm Kratie, Tân Châu và Châu Đốc, bao gồm: (1) kiểm định xu thế Mann-Kendall (MK); (2) ước lượng độ dốc Theil-Sen; (3) kiểm định điểm gãy Pettitt; và (4) phân tích tương quan tuyến tính giữa các trạm thượng - hạ lưu. Các phương pháp này đều là phi tham số, phù hợp với đặc trưng của chuỗi thủy văn có phân bố không chuẩn, chứa nhiễu hoặc sai lệch do tác động tự nhiên và nhân sinh (Helsel & Hirsch, 2002; Yue & Wang, 2004).

### (1) Kiểm định xu thế Mann-Kendall

Phép kiểm định Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) là công cụ phổ biến để phát hiện xu thế trong các chuỗi dữ liệu môi trường - thủy văn. Khác với các kiểm định tham số, MK không yêu cầu giả định về phân phối dữ liệu (ví dụ phân phối chuẩn), do đó thích hợp cho các chuỗi có độ biến thiên tự nhiên cao. Công thức cơ bản của thống kê MK như sau:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

Trong đó

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & \text{nếu } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{nếu } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{nếu } x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

Giá trị chuẩn hóa Z được tính từ S để xác định mức ý nghĩa của xu thế. Nếu  $|Z| > 1,96$  xu thế được xem là có ý nghĩa thống kê ở mức  $\alpha = 0,05$ . Trong nghiên cứu này, kiểm định MK được áp dụng cho chuỗi lưu lượng mùa kiệt nhằm phát hiện xu thế dài hạn của dòng chảy trong giai đoạn 1980-2024 tại từng trạm.

### (2) Ước lượng độ dốc Theil-Sen

Phương pháp Theil-Sen (Theil, 1950; Sen, 1968) được sử dụng song song với kiểm định MK để định lượng mức độ biến đổi của xu thế đã phát hiện. Độ dốc được tính là trung vị của tất cả các tỉ số chênh giữa mọi cặp giá trị quan sát:

$$Q_i = \frac{x_j - x_i}{j - i}, \text{ với } 1 \leq i < j \leq n$$

Độ dốc Theil-Sen cuối cùng là  $\beta = \text{median}(Q_i)$

Phương pháp này có ưu điểm ổn định với ngoại lai, không bị ảnh hưởng mạnh bởi các giá trị cực trị, và do đó thường được khuyến nghị sử dụng trong phân tích xu thế thủy văn dài hạn (Gilbert, 1987). Trong bài báo này,  $\beta$  (beta) được biểu diễn bằng đơn vị  $\text{m}^3/\text{s}/\text{năm}$ , cho phép so sánh trực tiếp tốc độ biến đổi giữa các trạm và giai đoạn.

### (3) Kiểm định điểm gãy Pettitt

Phát hiện sự thay đổi cấu trúc trong chuỗi lưu lượng - tức là thời điểm mà đặc trưng thống kê của chuỗi (trung bình hoặc phương sai) thay đổi đột ngột. Kiểm định Pettitt (Pettitt, 1979) là một phương pháp phi tham số dựa trên thống kê thứ hạng. Công thức xác định điểm gãy được mô tả như sau:

$$U_t = 2 \sum_{i=1}^t r_i - t(n+1)$$

trong đó  $r_i$  là thứ hạng của giá trị quan sát thứ  $i$ , và  $n$  là tổng số quan sát. Vị trí có  $|U_t|$  lớn nhất được xem là điểm gãy tiềm năng. Mức ý nghĩa được đánh giá qua giá trị xác suất  $p$ , với  $p < 0,05$  cho thấy có sự thay đổi cấu trúc đáng kể. Trong nghiên cứu này, kiểm định Pettitt được sử dụng để xác định năm xuất hiện biến đổi chế độ dòng chảy, đặc biệt nhằm kiểm chứng giả thuyết rằng khoảng năm 2010 là mốc chuyển pha rõ rệt do sự gia tăng nhanh chóng của các hồ chứa thượng lưu (Lauri et al., 2012; Räsänen et al., 2012).

### (4) Phân tích tương quan thượng - hạ lưu

Phân tích tương quan tuyến tính được thực hiện bằng cách tính hệ số xác định ( $R^2$ ) giữa chuỗi lưu lượng trung bình tháng tại các trạm. Việc so sánh trước và sau năm 2010 cho phép đánh giá sự thay đổi về cường độ liên kết thủy văn do tác động của điều tiết hồ chứa, biến đổi khí hậu và tổn thất nội đồng. Công thức xác định hệ số tương quan Pearson ( $r$ ) như sau:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Với  $R^2 = r^2$ , giá trị  $R^2$  gần 1 thể hiện mối tương quan mạnh, trong khi  $R^2$  thấp cho thấy sự suy giảm hoặc trở pha của tín hiệu dòng chảy. Trong nghiên cứu này,  $R^2$  được tính riêng cho các tháng mùa kiệt để xác định mức độ truyền dẫn dòng chảy trong điều kiện cạn kiệt, giai đoạn nhạy cảm nhất với cấp nước và xâm nhập mặn ở hạ lưu (MRC, 2023; Pokhrel et al., 2018).

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Xu thế lưu lượng mùa kiệt

Kết quả kiểm định Mann-Kendall và ước lượng độ dốc Theil-Sen cho giai đoạn 1980-2024 được tổng hợp trong Bảng 1. Các kết quả này cho thấy một xu thế giảm rõ rệt của lưu lượng mùa kiệt dọc theo trục Kratie - Tân Châu - Châu Đốc, song mức độ và ý nghĩa thống kê của xu thế có sự khác biệt đáng kể giữa các trạm.

**Bảng 1. Độ dốc Theil-Sen và p-value MK**

| Trạm     | Giai đoạn | Độ dốc Theil-Sen (m <sup>3</sup> /s/năm) | p-value (MK) | Kết luận               |
|----------|-----------|------------------------------------------|--------------|------------------------|
| Kratie   | 1980-2024 | -58,2                                    | 0,013        | Giảm có ý nghĩa        |
|          | 1980-2009 | -41,0                                    | 0,083        | Giảm (chưa đạt 5%)     |
|          | 2010-2024 | -86,5                                    | 0,021        | Giảm có ý nghĩa        |
| Tân Châu | 1980-2024 | -34,6                                    | 0,047        | Giảm nhẹ (có ý nghĩa)  |
|          | 1980-2009 | -21,3                                    | 0,118        | Giảm nhẹ (chưa đạt 5%) |
|          | 2010-2024 | -49,8                                    | 0,041        | Giảm có ý nghĩa        |
| Châu Đốc | 1980-2024 | -28,1                                    | 0,071        | Chưa có ý nghĩa        |
|          | 1980-2009 | -12,6                                    | 0,284        | Không ý nghĩa          |
|          | 2010-2024 | -40,7                                    | 0,093        | Giảm (biên 10%)        |

Tại Kratie, giá trị thống kê  $Z=-2,48$  với  $p=0,013$  cho thấy xu thế giảm có ý nghĩa thống kê ở mức tin cậy 95%, tương ứng với tốc độ giảm trung bình 58,2 m<sup>3</sup>/s/năm. Điều này hàm ý rằng trong hơn bốn thập kỷ qua, lưu lượng trung bình mùa kiệt tại cửa ngõ hạ lưu Mekong đã giảm xấp xỉ 2.000-2.100 m<sup>3</sup>/s, phản ánh sự thay đổi đáng kể trong cân bằng dòng chảy nền của hệ thống. Sự suy giảm này phù hợp với các nghiên cứu trước đây, vốn chỉ ra rằng vận hành các hồ chứa thượng lưu và biến đổi khí hậu là những yếu tố chính làm thay đổi phân bố mùa của dòng chảy tại khu vực Kratie (Lauri et al., 2012; Räsänen et al., 2012; Pokhrel et al., 2018). Khi tách chuỗi thành hai giai đoạn, xu thế giảm trong giai đoạn 1980-2009 vẫn hiện diện nhưng độ dốc nhỏ hơn và mức ý nghĩa thống kê yếu hơn, trong khi giai đoạn 2010-2024 thể hiện độ dốc âm lớn hơn rõ rệt và p-value giảm xuống dưới ngưỡng 0,05. Điều này cho thấy sau năm 2010, tác động tổng hợp của chuỗi hồ chứa thượng lưu và các năm hạn khắc nghiệt đã làm gia tốc quá trình suy giảm dòng chảy mùa kiệt tại Kratie.

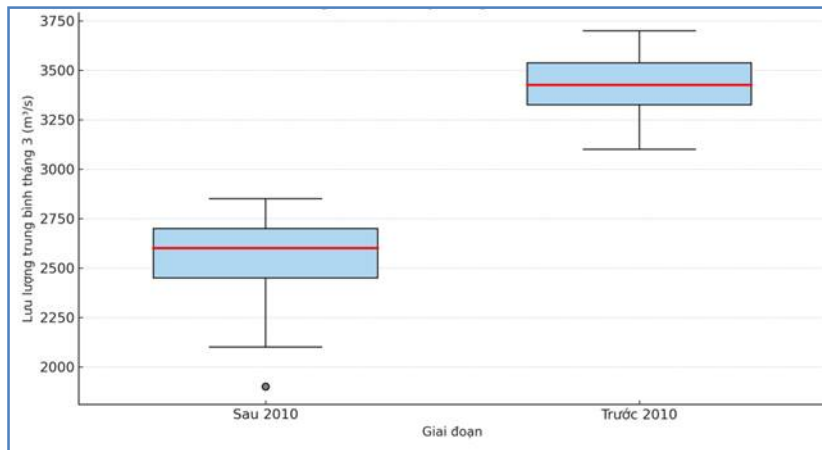
Tại Tân Châu, xu thế giảm vẫn được ghi nhận nhưng ở mức yếu hơn, với  $Z=-1,98$ ;  $p=0,047$  và độ dốc Theil-Sen là -34,6 m<sup>3</sup>/s/năm. Mặc dù cường độ suy giảm thấp hơn so với Kratie, kết quả này vẫn có ý nghĩa thống kê, khẳng định rằng tín hiệu suy giảm dòng chảy từ thượng nguồn đã lan truyền xuống hạ lưu sông Tiền. Việc phân tích theo giai đoạn cho thấy giai đoạn 1980-2009 chỉ ghi nhận xu thế giảm nhẹ, độ dốc tương đối nhỏ và p-value cao hơn, đôi khi chỉ đạt mức ý nghĩa 10%, trong khi giai đoạn 2010-2024 biểu hiện độ dốc âm lớn hơn và p-value giảm xuống ngưỡng có ý nghĩa 5%. Điều này hàm ý rằng sau 2010, cấu trúc điều tiết dòng chảy thượng nguồn (đặc biệt là bậc thang hồ chứa trên dòng chính và phụ lưu) đã thể hiện rõ dấu ấn tại Tân Châu. Tuy nhiên, mức độ suy giảm tại đây bị giảm biên độ do ảnh hưởng của vùng trữ-xả nội đồng, các kênh phân lưu và tác động triều trong khu vực đồng bằng, vốn có khả năng làm đệm dao động của dòng chảy (MRC, 2023). Bên cạnh đó, các hoạt động khai thác nước nội vùng và điều tiết ở các kênh rạch phụ cũng góp phần làm suy yếu mối liên hệ tuyến tính giữa dòng chảy thượng lưu và hạ lưu.

Tại Châu Đốc, xu thế giảm được ghi nhận với độ dốc Theil-Sen là -28,1 m<sup>3</sup>/s/năm, song không đạt mức ý nghĩa thống kê ở toàn kỳ ( $p=0,071$ ). Điều này phản ánh vai trò đệm thủy văn mạnh mẽ của hệ thống sông Hậu, nơi nhận nước bổ sung từ các nhánh phân lưu phía tây (sông Bassac) và khu vực ngập nước quanh Hồ Tonle Sap, giúp dòng chảy mùa kiệt sông Hậu duy trì tương đối ổn định hơn so với sông Tiền. Khi xem xét riêng từng giai đoạn, giai đoạn 1980-2009 cho thấy xu thế gần như ổn định, độ dốc âm nhỏ và p-value cao, trong khi giai đoạn 2010-2024 xuất hiện xu thế giảm rõ hơn nhưng mới chỉ đạt mức ý nghĩa ở ngưỡng 10%. Mức độ suy giảm nhỏ hơn và ý nghĩa thống kê yếu tại trạm Châu Đốc cho thấy sự phi đồng bộ của tín hiệu dòng chảy trong quá trình lan truyền từ Kratie xuống hạ lưu, một đặc điểm điển hình của hệ thống sông có cấu trúc phân nhánh phức tạp và tương tác mạnh với đồng bằng ngập nước (Arias et al., 2012; Morovati et al., 2023).

Xét theo phân bố không gian, kết quả thể hiện một mô hình suy giảm tuần tự theo hướng thượng-hạ lưu, trong đó Kratie thể hiện mức giảm mạnh nhất, tiếp theo là Tân Châu và yếu nhất tại Châu Đốc. Mô hình này phản ánh quá trình truyền dẫn dòng chảy và suy giảm năng lượng thủy lực qua hệ thống kênh rạch, trữ nước nội đồng và ảnh hưởng triều. So sánh hai giai đoạn 1980-2009 và 2010-2024 cho thấy xu thế giảm đều xuất hiện ở cả ba trạm nhưng độ dốc âm trong giai đoạn sau 2010 luôn lớn hơn, đồng thời p-value giảm xuống, nhấn mạnh sự chuyển pha chế độ dòng chảy trùng với thời kỳ phát triển mạnh hồ chứa thượng lưu. Các kết quả định lượng này nhất quán với xu thế được ghi nhận trong các nghiên cứu khu vực (Lauri et al., 2012; Pokhrel et al., 2018; MRC, 2023), khẳng định rằng dòng chảy mùa khô về ĐBSCL đã giảm trung bình khoảng 15-20% so với giai đoạn 1980-1990, với mức suy giảm rõ rệt hơn trong thập kỷ gần đây.

Sự suy giảm đáng kể tại Kratie và Tân Châu, đặc biệt sau năm 2010, có ý nghĩa đặc biệt quan trọng về mặt an ninh nguồn nước, bởi lưu lượng kiệt là yếu tố chính chi phối ranh giới xâm nhập mặn, khả năng cấp nước sinh hoạt và điều hòa sinh thái vùng cửa sông. Các kết quả này củng cố luận điểm rằng tác động tổng

hợp của điều tiết hồ chứa thượng lưu và biến đổi khí hậu đang làm suy yếu cơ chế điều tiết tự nhiên của hệ thống Mekong-Tonle Sap, từ đó gia tăng tính dễ tổn thương của đồng bằng trong các tháng mùa khô (Pokhrel et al., 2018; MRC, 2024). Việc phân tách và so sánh hai giai đoạn trước và sau 2010 không chỉ khẳng định xu thế suy giảm dài hạn mà còn cho thấy rõ bước ngoặt về chế độ dòng chảy, cần được xem xét như một cơ sở quan trọng cho công tác dự báo hạn-mặn và điều hành liên quốc gia trên lưu vực Mekong.



Hình 1. Vị trí trạm thủy văn Kratie và phân bố lưu lượng tháng 3 trước và sau năm 2010

Hình 1 thể hiện phân bố lưu lượng trung bình tháng 3 tại trạm Kratie giai đoạn 1980-2024, tháng đặc trưng cho giai đoạn kiệt, khi Hồ Tonle Sap xả nước trở lại hệ thống Mekong, góp phần duy trì dòng nền cho hạ lưu. Trước năm 2010, lưu lượng tháng 3 có trung vị khoảng 3.500 m<sup>3</sup>/s, với phạm vi dao động hẹp (khoảng 3.200-3.700 m<sup>3</sup>/s), phản ánh điều kiện thủy văn tự nhiên ổn định và cơ chế điều tiết của Hồ Tonle Sap còn phát huy hiệu quả. Trong giai đoạn này, sự chênh lệch giữa các năm nhỏ, ít xuất hiện giá trị cực đoạn, cho thấy mối liên kết thủy văn giữa Kratie và hạ lưu vẫn duy trì ổn định. Tuy nhiên, sau năm 2010, trung vị lưu lượng tháng 3 giảm rõ rệt xuống khoảng 2.700 m<sup>3</sup>/s (giảm gần 23%) và phạm vi dao động mở rộng hơn, thể hiện qua sự gia tăng hệ số biến thiên (CV) và sự xuất hiện nhiều giá trị thấp bất thường vào các năm 2010, 2016 và 2020, đặc biệt là năm 2016 (coi như là dị thường

**3.2. Điểm gãy cấu trúc và thay đổi sau năm 2010**  
Kết quả kiểm định Pettitt đối với chuỗi lưu lượng mùa kiệt tại trạm Kratie cho thấy sự xuất hiện của điểm gãy cấu trúc vào khoảng năm 2010, với mức ý nghĩa thống kê  $p < 0,05$ . Đây là thời điểm trùng khớp với giai đoạn các hồ chứa lớn trên thượng nguồn Mekong như Xiaowan (2009), Nuozhadu (2012), Nam Theun 2 (2010) và các công trình dòng chính ở Lào bắt đầu được đưa vào vận hành ổn định, làm thay đổi rõ rệt chế độ dòng chảy theo mùa (Lauri et al., 2012; Räsänen et al., 2012; MRC, 2023).

thống kê - thể hiện trong Hình 1). Điều này cho thấy tính ổn định của dòng chảy mùa kiệt đã suy giảm, đồng thời phản ánh tác động của vận hành hồ chứa thủy điện thượng nguồn, sự giảm dung tích hữu ích của Hồ Tonle Sap và biến đổi khí hậu khiến mùa khô kéo dài hơn. Nhìn chung, hình 2 minh chứng cho xu thế giảm lưu lượng và tăng biến động dòng chảy mùa kiệt sau năm 2010, thể hiện rõ sự suy yếu của cơ chế điều tiết tự nhiên trong hệ thống Mekong-Tonle Sap.

Kết quả phân tích theo hai giai đoạn cho thấy mức giảm trung bình 16-20% trên toàn tuyến Kratie - Tân Châu - Châu Đốc (Bảng 2). Cụ thể, Kratie giảm 20,2%, Tân Châu giảm 17,1% và Châu Đốc giảm 16,5%. Xu thế giảm đồng bộ này chứng tỏ tác động lan truyền rõ rệt từ thượng lưu xuống hạ lưu, dù biên độ giảm có xu hướng yếu dần do hiệu ứng đệm thủy văn và tương tác triều ở vùng cửa sông.

Bảng 2. So sánh trung bình và hệ số biến thiên (CV) lưu lượng mùa kiệt trước/sau 2010

| Trạm     | Trung bình trước 2010 (m <sup>3</sup> /s) | Trung bình sau 2010 (m <sup>3</sup> /s) | Giảm (%) | CV   |
|----------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|----------|------|
| Kratie   | 3.420                                     | 2.730                                   | -20,2    | 0,21 |
| Tân Châu | 2.110                                     | 1.750                                   | -17,1    | 0,24 |
| Châu Đốc | 1.880                                     | 1.570                                   | -16,5    | 0,25 |

Những kết quả trên củng cố luận điểm rằng năm 2010 là mốc chuyển pha quan trọng trong chế độ dòng chảy của lưu vực Mekong, khi các hồ chứa bậc thang đi vào vận hành đồng loạt, làm giảm đáng kể dòng

chảy mùa khô và phá vỡ chu trình trữ - xả tự nhiên của hệ thống Mekong-Tonle Sap. Tác động này không chỉ làm giảm lưu lượng nền mà còn rút ngắn thời gian tích - xả của Hồ Tonle Sap, khiến khả năng bù nước mùa

kiệt cho hạ lưu Đồng bằng sông Cửu Long bị suy yếu đáng kể (Pokhrel et al., 2018; Morovati et al., 2023).

### 3.3. Truyền dẫn thượng-hạ lưu và hàm ý vận hành

Phân tích tương quan giữa chuỗi lưu lượng mùa kiệt tại các trạm Kratie, Tân Châu và Châu Đốc cho thấy mức độ truyền dẫn dòng chảy từ thượng lưu xuống hạ lưu đang suy giảm rõ rệt trong giai đoạn sau năm 2010. Cụ thể, hệ số xác định ( $R^2$ ) giữa  $Q_{Kratie}$  và  $Q_{Tân\ Châu}$  giảm từ 0,91 xuống 0,83, trong khi giữa  $Q_{Kratie}$  và  $Q_{Châu\ Đốc}$  giảm từ 0,88 xuống 0,78 (so sánh trước và sau 2010). Sự suy giảm đồng thời lưu lượng trên cả sông Tiền và sông Hậu cho thấy mối liên kết thủy văn giữa thượng lưu và hạ lưu đang bị suy yếu, đồng thời phản ánh tác động cộng hưởng của các cơ chế làm giảm khả năng truyền dẫn dòng chảy, bao gồm: (i) tổn thất nội tại trên tuyến sông (thảm, bốc hơi, lấy nước tưới và tích nước tạm thời trong đồng ruộng, kênh rạch), (ii) điều tiết của hệ thống hồ chứa thượng nguồn và (iii) độ trễ pha trong quá trình truyền dẫn dòng kiệt (MRC, 2023; Pokhrel et al., 2018).

Nguyên nhân chủ yếu được cho là do vận hành bậc thang hồ chứa đã làm thay đổi cấu trúc nhịp điệu của dòng chảy, khiến biên độ dao động ngày - tuần trở nên ổn định hơn, nhưng mực nước mùa kiệt trung bình lại thấp hơn đáng kể so với giai đoạn trước (Lauri et al., 2012; Räsänen et al., 2012). Sự ổn định giả này thể hiện đặc trưng của dòng chảy điều tiết nhân tạo: các cực trị ngắn hạn được làm phẳng, song dòng nền bị suy giảm, đặc biệt trong các tháng đỉnh khô (tháng 3-4).

Tác động này càng nghiêm trọng khi điều tiết nhân tạo trùng pha với các đợt ENSO dương (El Niño), vốn làm giảm lượng mưa toàn lưu vực và khiến nguồn bổ sung từ Hồ Tonle Sap suy yếu (Morovati et al., 2023). Khi đó, dòng chảy về ĐBSCL sụt giảm kép, vừa do tác động của ENSO, vừa do điều tiết hồ chứa, dẫn đến gia tăng rủi ro hạn và xâm nhập mặn trong vùng hạ lưu. Các quan sát thực địa tại Tân Châu và Châu Đốc trong các năm 2016, 2020 và 2024 đều ghi nhận mực nước mùa khô thấp kỷ lục, khớp với các pha El Niño mạnh và thời kỳ vận hành tích nước cực đại ở thượng lưu (MRC, 2024).

Các kết quả cho thấy sự lan truyền dòng chảy mùa kiệt đang yếu dần, biên độ dao động nhỏ hơn nhưng nền mực nước thấp hơn, phản ánh sự suy giảm điều tiết tự nhiên của hệ thống Mekong - Tonle Sap và tăng cường chi phối của điều tiết nhân tạo. Điều này có ý nghĩa đặc biệt quan trọng đối với công tác dự báo hạn hán - xâm nhập mặn và điều hành nguồn nước mùa khô ở Đồng bằng sông Cửu Long, nơi các quyết định vận hành hệ thống cống, đập và công trình kiểm soát mặn cần được tích hợp với tín hiệu dòng chảy từ Kratie như một chỉ báo sớm về tình trạng nguồn nước.

### 4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết quả nghiên cứu khẳng định rằng lưu lượng mùa kiệt tại trạm Kratie có xu hướng giảm rõ rệt và mang ý nghĩa thống kê cao, với tốc độ trung bình khoảng 58  $m^3/s$  mỗi năm trong giai đoạn 1980-2024. Sự suy giảm này phản ánh những thay đổi sâu sắc trong cân bằng

dòng chảy tự nhiên của hệ thống Mekong, không chỉ diễn ra tại thượng nguồn mà còn lan truyền dọc theo toàn tuyến sông Tiền - sông Hậu. Tại Tân Châu, xu thế giảm vẫn thể hiện rõ và có ý nghĩa thống kê, trong khi tại Châu Đốc, xu thế giảm yếu hơn do ảnh hưởng đệm của mạng lưới phân lưu, vùng trữ - xả nội đồng và tương tác thủy triều. Sự khác biệt này cho thấy đặc trưng phức tạp của quá trình truyền dẫn dòng chảy từ Kratie xuống đồng bằng, nơi các yếu tố địa hình và nhân sinh cùng tham gia điều tiết.

Phân tích kiểm định Pettitt cho thấy điểm gãy cấu trúc xuất hiện vào khoảng năm 2010, trùng khớp với thời kỳ mở rộng và vận hành ổn định của hệ thống hồ chứa thượng lưu ở Trung Quốc và Lào. Đây được xem là mốc chuyển pha quan trọng trong chế độ dòng chảy của lưu vực Mekong, khi quá trình điều tiết nhân tạo bắt đầu chi phối mạnh hơn so với cơ chế điều tiết tự nhiên của Hồ Tonle Sap. Sự thay đổi này đồng thời chịu tác động cộng hưởng của biến đổi khí hậu và các pha ENSO dương, khiến dòng chảy mùa khô giảm sâu và biến động nội năm trở nên bất thường hơn. Hồ Tonle Sap, vốn giữ vai trò là bộ đệm sinh thái điều hòa dòng chảy, ngày càng mất khả năng bù nước trong mùa kiệt, dẫn đến giảm dòng nền về hạ lưu và gia tăng tình trạng cạn kiệt kéo dài.

Hệ quả thực tiễn của các biến động trên là gia tăng đáng kể rủi ro hạn hán và xâm nhập mặn tại Đồng bằng sông Cửu Long trong mùa khô. Khi dòng chảy mùa kiệt suy giảm, mực nước hạ thấp, ranh mặn xâm nhập sâu hơn và vùng nước ngọt bị thu hẹp, gây ảnh hưởng trực tiếp đến cấp nước sinh hoạt, sản xuất nông nghiệp và sinh kế ven sông. Những năm El Niño mạnh như 2016, 2020 và 2024 cho thấy rõ sự cộng hưởng giữa điều tiết nhân tạo và biến động khí hậu, làm cho tình trạng thiếu nước và mặn hóa ở hạ lưu trở nên nghiêm trọng hơn, vượt xa ngưỡng điều hòa tự nhiên của hệ thống sông.

Trên cơ sở các kết quả nghiên cứu, cần coi lưu lượng tại Kratie là chỉ báo sớm quan trọng trong dự báo nguồn nước mùa khô cho toàn vùng hạ lưu, với thời gian dẫn từ một đến hai tháng, giúp các cơ quan quản lý chủ động điều phối nguồn nước, vận hành trạm bơm và công trình kiểm soát mặn. Kết quả phân tích xu thế và điểm gãy dòng chảy cần được tích hợp vào các mô hình cảnh báo hạn hán - xâm nhập mặn theo tháng, đồng thời điều chỉnh quy trình vận hành hệ thống cống và trạm bơm lớn nhằm tăng tính thích ứng trong điều kiện dòng chảy biến động. Bên cạnh đó, cần thúc đẩy chia sẻ dữ liệu vận hành hồ chứa thượng lưu theo thời gian thực trong khuôn khổ hợp tác của Ủy hội sông Mekong, kết hợp thử nghiệm dự báo hạn 3-6 tháng dựa trên chỉ số ENSO, điều tiết liên hồ và mô hình khí hậu khu vực. Việc triển khai đồng bộ các giải pháp trên sẽ góp phần nâng cao hiệu quả dự báo và quản lý rủi ro hạn hán - xâm nhập mặn, hướng tới bảo đảm an ninh nguồn nước và phát triển bền vững cho Đồng bằng sông Cửu Long.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Tổng cục Khí tượng Thủy văn (KTTV). (2022). *Báo cáo hiện trạng khí tượng thủy văn và biến đổi khí hậu Việt Nam năm 2022*. Bộ Tài nguyên và Môi trường, Hà Nội.
- Arias, M. E., Cochrane, T. A., Kumm, M., Lauri, H., Holtgrieve, G. W., Koponen, J., & Piman, T. (2012). *Quantifying changes in flooding and habitats in the Tonle Sap Lake (Cambodia) caused by water infrastructure development and climate change*. *Journal of Environmental Management*, 112, 53-66.
- Gilbert, R. O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. Wiley.
- Helsel, D. R., & Hirsch, R. M. (2002). *Statistical methods in water resources*. U.S. Geological Survey.
- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods* (4th ed.). Charles Griffin.
- Lauri, H., de Moel, H., Ward, P. J., Räsänen, T. A., Keskinen, M., & Kumm, M. (2012). *Future changes in Mekong River discharge at Kratie under climate change and reservoir operation scenarios*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(12), 4603-4619.
- Li, X., Wheeler, K. G., Wang, H., & Mei, Y. (2017). *Changes in Mekong River flow regime under reservoir operations*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3645-3661.
- Mann, H. B. (1945). *Nonparametric tests against trend*. *Econometrica*, 13(3), 245-259.
- Mekong River Commission (MRC). (2023). *State of the Basin Report 2023*. MRC Secretariat.
- Mekong River Commission (MRC). (2024). *Hydrological Yearbook 2024*. MRC Secretariat.
- Morovati, R., Arias, M. E., Linh, H. T., & Piman, T. (2023). *Recent weakening of the Tonle Sap's flood pulse and its implications for hydrological connectivity in the Mekong Delta*. *Science of the Total Environment*, 880, 163505.
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126-135.
- Pokhrel, Y. N., Felfelani, F., Shin, S., Yamada, T. J., & Satoh, Y. (2018). *Human influence on terrestrial water storage in large river basins*. *Nature Communications*, 9, 1667.
- Räsänen, T. A., Koponen, J., Lauri, H., & Kumm, M. (2012). *Downstream Hydrological Impacts of Hydropower Development in the Upper Mekong Basin*. *Water Resources Management*, 26, 3495-3513.
- Sen, P. K. (1968). *Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau*. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.
- Theil, H. (1950). *A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I, II, III*. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, 53, 386-392, 521-525, 1397-1412.
- Yue, S., & Wang, C. Y. (2004). *The Mann-Kendall test modified for autocorrelation*. *Water Resources Management*, 18(3), 201-218.

### Abstract:

#### LONG-TERM TRENDS IN DRY-SEASON DISCHARGE AT KRATIE AND THE MEKONG DELTA'S TIEN-HAU RIVER SYSTEM

*This study analyzed long-term trends in dry-season discharge at the Kratie, Tan Chau, and Chau Doc stations during 1980-2024 to quantify the upstream-downstream propagation of flow reduction in the Mekong River. The Mann-Kendall trend test, Theil-Sen slope estimator, and Pettitt change-point test were employed to detect monotonic trends, quantify their magnitude, and identify structural shifts. Results reveal a statistically significant decreasing trend at Kratie ( $Z = -2.48$ ;  $p = 0.013$ ), with an average reduction rate of approximately  $58 \text{ m}^3/\text{s}$  per year. The declining signal propagates downstream to Tan Chau ( $Z = -1.98$ ;  $p = 0.047$ ;  $35 \text{ m}^3/\text{s}/\text{yr}$ ) and more weakly to Chau Doc ( $p = 0.071$ ;  $28 \text{ m}^3/\text{s}/\text{yr}$ ). A change point detected around 2010 coincides with the large-scale expansion and operation of upstream hydropower reservoirs, which, together with climatic variability, has altered the hydrological regime of the lower Mekong. The observed reduction in dry-season discharge signifies a weakening of the natural flow regulation of the Mekong-Tonle Sap system, leading to heightened risks of water scarcity and salinity intrusion in the Mekong Delta, particularly during strong El Niño events. The findings highlight the need for integrated transboundary water management and improved seasonal forecasting to mitigate dry-season water security risks.*

**Keywords:** Dry season, trend, Mann-Kendall, Theil-Sen, Pettitt, Kratie, Tan Chau, Chau Doc.

---

Ngày nhận bài: 15/10/2025

Ngày chấp nhận đăng: 24/11/2025