

BIẾN ĐỘNG MƯA, DÒNG CHẢY VÀ NGẬP LỤT LƯU VỰC SÔNG PHỐ ĐÁY CUỐI THẾ KỶ XXI TRONG BỐI CẢNH BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU

Nguyễn Thị Hồng Ngọc^{1*}, Trần Anh Quân²

¹*Khoa Tài nguyên Môi trường, Học viện Nông nghiệp Việt Nam*

²*Khoa Môi trường, Trường Đại học Mỏ - Địa chất*

**Tác giả liên hệ: hongngockhtn@gmail.com*

Ngày nhận bài: 29.05.2025

Ngày chấp nhận đăng: 14.08.2025

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá biến động lượng mưa, dòng chảy và ngập lụt tại lưu vực sông Phố Đáy vào cuối thế kỷ XXI dưới ảnh hưởng biến đổi khí hậu theo kịch bản phát thải lớn nhất SSP5-8.5. Mô hình Weather Research and Forecasting (WRF) và Rainfall-Runoff Inundation (RRI) được tích hợp, sử dụng dữ liệu quan trắc từ 56 trạm quan trắc, dữ liệu tái phân tích JRA-25/JCDAS, mô hình CMIP6 GCM EC-Earth3 và HadGEM3-GC31-MM. Kết quả kiểm định WRF cho giai đoạn 2003-2022 và mô hình RRI cho trận lũ năm 2019 cho thấy độ chính xác cao và phù hợp trong việc tái hiện điều kiện khí tượng và thủy văn. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng vào cuối thế kỷ XXI (2080-2099), lượng mưa mùa hè (JJA) tăng đáng kể, tập trung chủ yếu ở thượng nguồn phía bắc và đông bắc lưu vực. Lưu lượng dòng chảy và đỉnh lũ gia tăng rõ rệt, đặc biệt ở hạ lưu, kéo theo mức ngập lụt nghiêm trọng hơn, với độ sâu và phạm vi ngập mở rộng, nhất là trong các kịch bản khí hậu cực đoan. Lưu lượng dòng chảy có thể tăng từ 8,8%-15,6% vào mùa mưa với đỉnh ngập có thể sâu thêm từ 1-3m. Mức độ gia tăng của lưu lượng và nguy cơ ngập lụt chủ yếu vào cuối mùa mưa, phản ánh tác động đáng kể của biến đổi khí hậu.

Từ khóa: Biến đổi khí hậu, sông Phố Đáy, ngập lụt, RRI, WRF,.

Dynamics of Rainfall, Stream Flow, and Flooding in Pho Day River Basin by the End of the 21st Century in the Context of Climate Change

ABSTRACT

This study evaluated projected changes in precipitation, streamflow, and flooding in the Pho Day River Basin by the end of the 21st century under the high-emission scenario SSP5-8.5. An integrated modeling approach combining the Weather Research and Forecasting (WRF) model and the Rainfall-Runoff Inundation (RRI) model was employed, using observational data from 56 meteorological stations, JRA-25/JCDAS reanalysis data, and climate projections from the CMIP6 GCMs EC-Earth3 and HadGEM3-GC31-MM. Validation results showed that WRF accurately captured meteorological conditions for the 2003-2022 period, while RRI reliably simulated the 2019 flood event, confirming the models' suitability for hydrometeorological assessments. The findings revealed a significant increase in summer (JJA) precipitation by 2080-2099, particularly in the northern and northeastern upstream regions. This leads to pronounced increases in streamflow and flood peaks, especially in downstream areas, resulting in more severe flooding characterized by greater depth and spatial extent, most notably under extreme climate scenarios. Streamflow during the rainy season may rise by 8.8% to 15.6%, with peak flood depths increasing by 1-3 meters. These increases are concentrated toward the end of the wet season, underscoring the considerable impact of climate change on future flood risks.

Keywords: Climate change, inundation, Pho Day river, RRI, WRF.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Biến đổi khí hậu đang gia tăng tần suất, cường độ các hiện tượng thời tiết cực đoan, khiến

lũ lụt trở thành mối đe dọa nghiêm trọng đối với an ninh nguồn nước, sản xuất nông nghiệp và phát triển bền vững (IPCC, 2014; IPCC, 2021). Lưu vực sông Phố Đáy, một trong những lưu vực

quan trọng ở miền Bắc Việt Nam, đóng vai trò huyết mạch cung cấp nước cho sinh hoạt, nông nghiệp và công nghiệp của ba tỉnh, bao gồm Phú Thọ (địa bàn tỉnh Vĩnh Phúc cũ), Tuyên Quang và Thái Nguyên (địa bàn tỉnh Bắc Kạn cũ). Tuy nhiên, khu vực này đang đối mặt với nguy cơ lũ lụt gia tăng do tác động kết hợp của biến đổi khí hậu, thay đổi sử dụng đất và đô thị hóa nhanh chóng. Trước bối cảnh này, việc nghiên cứu đặc điểm lũ lụt và ngập úng tại lưu vực sông Phó Đáy vừa cấp thiết vừa mang ý nghĩa sống còn để bảo vệ cộng đồng, giảm thiểu thiệt hại kinh tế và xây dựng các chiến lược ứng phó hiệu quả (Trần Thục, 2017).

Trên thế giới, nhiều nghiên cứu đã ứng dụng các mô hình thủy văn và thủy lực tiên tiến để đánh giá rủi ro lũ lụt. Chẳng hạn, nghiên cứu của Đặng Hoàng Lam & cs. (2006) tại lưu vực sông Mekong đã sử dụng mô hình MIKE 11 để mô phỏng dòng chảy và ngập lụt, cho thấy khả năng dự báo chính xác phạm vi và độ sâu ngập trong điều kiện khí hậu biến động. Tương tự, Cerri (2017) áp dụng mô hình tích hợp GIS và HEC-RAS tại lưu vực sông Mulde (Đức), cung cấp cơ sở dữ liệu chi tiết cho quản lý rủi ro lũ lụt ở các khu vực đô thị. Gần đây, mô hình Rainfall-Runoff Inundation (RRI) được Sayama & cs. (2012) phát triển và ứng dụng thành công tại lưu vực sông Chao Phraya (Thái Lan), nổi bật với khả năng tích hợp mô phỏng mưa - dòng chảy và ngập lụt thủy lực, đặc biệt phù hợp với các lưu vực có địa hình phức tạp và vùng ngập rộng. Ngoài ra, mô hình Weather Research and Forecasting (WRF) được Skamarock & cs. (2008) giới thiệu, đã chứng minh hiệu quả trong việc cung cấp dữ liệu lượng mưa chi tiết, hỗ trợ dự báo lũ lụt trong các kịch bản khí hậu hiện tại và tương lai.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về lũ lụt đạt được nhiều kết quả đáng chú ý. Tran & Taniguchi (2018) ứng dụng mô hình RRI để đánh giá dòng chảy và ngập lụt tại lưu vực sông Cầu - Thương - Lục Nam, chỉ ra mối liên hệ chặt chẽ giữa thay đổi lượng mưa và nguy cơ ngập úng. Nghiên cứu về biến thiên dòng chảy trên lưu vực sông Mã dưới tác động của biến đổi khí hậu cũng cho thấy xu thế ngập lụt gia tăng

trong tương lai (Trần Anh & cs., 2019). Tương tự, Trần Thị Thu Thảo & cs. (2021) sử dụng mô hình HEC-HMS kết hợp GIS để mô phỏng lũ lụt tại lưu vực sông Bến Hải, cung cấp dữ liệu quan trọng cho quy hoạch phòng chống lũ. Tuy nhiên, tại lưu vực sông Phó Đáy, các nghiên cứu hiện có chủ yếu tập trung vào đặc điểm thủy văn cơ bản hoặc tác động của sử dụng đất, mà chưa có đánh giá toàn diện về lũ lụt trong bối cảnh biến đổi khí hậu dài hạn. Hơn nữa, việc ứng dụng các mô hình tiên tiến như RRI và WRF tại lưu vực này vẫn còn hạn chế, để lại khoảng trống lớn trong việc dự báo chính xác phạm vi, độ sâu ngập lụt và xây dựng các kịch bản ứng phó cho tương lai.

Khoảng trống này càng trở nên nghiêm trọng khi lưu vực sông Phó Đáy đối mặt với áp lực gia tăng từ biến đổi khí hậu, với dự báo lượng mưa cực đoan và lũ lụt có thể tăng mạnh vào cuối thế kỷ XXI (IPCC, 2021). Thiếu hụt dữ liệu và phân tích chuyên sâu về lũ lụt tại khu vực này cản trở việc hoạch định chiến lược quản lý rủi ro hiệu quả, đe dọa trực tiếp đến đời sống của hàng triệu người dân và sự phát triển bền vững của khu vực. Do đó, nghiên cứu này tập trung ứng dụng mô hình RRI và WRF để phân tích đặc điểm lũ lụt tại lưu vực sông Phó Đáy, nhằm cung cấp cơ sở khoa học vững chắc cho các chiến lược giảm nhẹ rủi ro, bảo vệ cộng đồng và thích ứng với biến đổi khí hậu trong bối cảnh đầy thách thức của thế kỷ XXI.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khu vực nghiên cứu

Lưu vực sông Phó Đáy, nằm ở miền Bắc Việt Nam, là một trong những lưu vực sông quan trọng, trải rộng trên địa phận ba tỉnh: Thái Nguyên (gồm Bắc Kạn và Thái Nguyên cũ), Phú Thọ (Vĩnh Phúc và Phú Thọ cũ) và Hà Nội. Sông Phó Đáy bắt nguồn từ các dãy núi cao thuộc huyện Chợ Đồn, tỉnh Bắc Kạn, chảy qua các vùng đồi núi của Thái Nguyên, Vĩnh Phúc, Phú Thọ, trước khi đổ ra vùng đồng bằng hạ lưu tại khu vực ngoại thành Hà Nội. Với diện tích lưu vực khoảng 1.525km², lưu vực này đóng vai trò thiết yếu trong cung cấp nước cho sinh hoạt,

tưới tiêu nông nghiệp và hoạt động công nghiệp của các tỉnh lân cận. Tuy nhiên, địa hình đa dạng từ núi cao đến đồng bằng, kết hợp với lượng mưa lớn trong mùa mưa (từ tháng 6 đến tháng 10), khiến khu vực này thường xuyên đối mặt với lũ lụt và ngập úng, đặc biệt trong bối cảnh biến đổi khí hậu làm gia tăng các hiện tượng thời tiết cực đoan.

2.2. Mô hình WRF

Chi tiết hóa khí hậu hiện tại và tương lai được thực hiện bằng mô hình WRF phiên bản 4.2. Cấu hình hạ quy mô theo ba mức của WRF được minh họa trong hình 1(a), với ba miền D1, D2 và D3 có độ phân giải lần lượt là 90km, 30km và 10km. Lưu vực sông Phó Đáy nằm tại trung tâm miền D3, thuộc miền Bắc Việt Nam. Mô hình sử dụng sơ đồ vi vật lý WRF Double-Moment 5-class (WDM5) và sơ đồ đối lưu Grell-Devenyi để tính lượng mưa. Tham số hóa lớp biên sử dụng sơ đồ MYNN2, lớp bề mặt và đất lần lượt áp dụng sơ đồ Nakanishi-Niino PBL và mô hình đất Noah. Bức xạ sóng ngắn và sóng dài được tính bằng mô hình RRTMG.

Chi tiết hóa khí hậu tương lai được thực hiện theo phương pháp giả định sự ấm lên toàn cầu (PGW), trong đó điều kiện biên tương lai

được tạo bằng cách cộng biến đổi dự báo từ AOGCM vào dữ liệu phân tích lại. Nghiên cứu này sử dụng biến thể tần số cao của phương pháp (HF-PGW; Taniguchi, 2016), cho phép tái hiện tốt hơn các nhiễu động khí quyển ngắn hạn trong tương lai. Dữ liệu AOGCM sáu giờ và dữ liệu phân tích lại (RD) được tách thành trung bình khí hậu theo tháng và nhiễu động ngắn hạn để thiết lập điều kiện ban đầu.

$$\overline{AOGCM}_P = \overline{AOGCM}_P + AOGCM'_P \quad (1)$$

$$\overline{AOGCM}_F = \overline{AOGCM}_F + AOGCM'_F \quad (2)$$

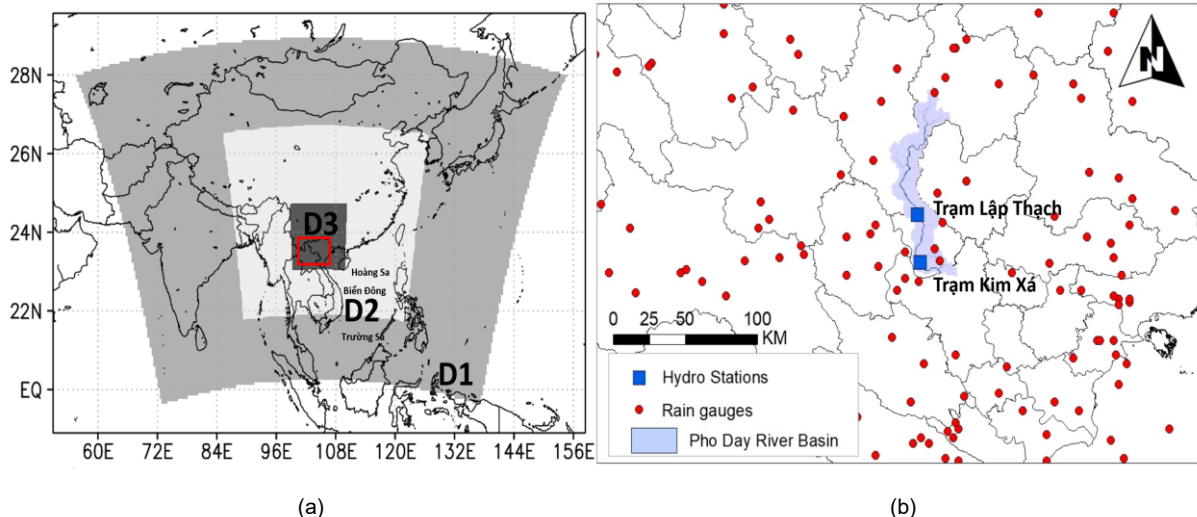
$$RD_P = \overline{RD}_P + RD'_P \quad (3)$$

Trong đó, chỉ số P và F lần lượt biểu thị giai đoạn hiện tại (2012-2023) và tương lai (2080-2099). Dữ liệu AOGCM đã hiệu chỉnh sai số cho giai đoạn tương lai $(\overline{AOGCM}_F - \overline{AOGCM}_P)$

được tính như sau:

$$\overline{AOGCM}_{*F} = \overline{RD}_P + \overline{AOGCM}_F - \overline{AOGCM}_P + AOGCM'_F \quad (4)$$

HF-PGW duy trì tốt hơn các biến thiên liên niên và chu kỳ ngày đêm bằng cách tách dữ liệu AOGCM thành trung bình khí hậu và nhiễu động ngắn hạn, giúp giảm sai số trong dự báo khí hậu tương lai so với PGW thông thường.



Ghi chú: (a) Cấu hình domain mô hình WRF với độ phân giải D1 (90km, xám nhạt), D2 (30km, trắng) và D3 (10km, xám đậm); khu vực nghiên cứu được đánh dấu bằng hình chữ nhật đỏ; (b) Vị trí lưu vực sông Phó Đáy và các trạm khí tượng - thủy văn.

Hình 1. Khu vực nghiên cứu trong mô hình WRF và RRI

2.3. Mô hình RRI

Mô hình RRI phiên bản 1.4.2.7 được sử dụng để mô phỏng đồng thời quá trình mưa - dòng chảy - ngập lụt trong phạm vi nghiên cứu. Mô hình RRI được sử dụng vì khả năng tích hợp đồng thời quá trình mưa - dòng chảy - ngập lụt trong một lưới tính toán thống nhất, phù hợp với địa hình phức tạp của lưu vực sông Phó Đáy. Trong mô hình RRI, cả sườn dốc và lòng sông đều được giả định nằm trong cùng một ô lưới. Kênh sông được mô phỏng dưới dạng một đường đơn trên lớp ô lưới sườn dốc. Mô hình sóng khuếch tán hai chiều được sử dụng để tính toán dòng chảy bề mặt, trong khi mô hình sóng khuếch tán một chiều được áp dụng cho dòng chảy trong kênh chính.

Để mô phỏng tốt hơn quá trình mưa - dòng chảy - ngập lụt của lưu vực Phó Đáy, tham số hóa điều kiện bề mặt/bên dưới bề mặt được kích hoạt với mô hình thấm Green-Ampt theo phương thẳng đứng. Do sản phẩm MODIS ban đầu có 16 loại sử dụng đất quá chi tiết, các loại thảm phủ tương đồng đã được gộp thành bốn nhóm chính và tích hợp với vùng ngập lụt của sông (Hình 2(e)). Các hoạt động quản lý dòng chảy của con người được mô hình hóa thông qua hệ thống đập. Thông số bay hơi trong mô hình RRI được bỏ qua do thiếu dữ liệu quan trắc bay hơi.

2.4. Dữ liệu

2.4.1. Dữ liệu mưa

Dữ liệu lượng mưa được thu thập từ 56 trạm quan trắc của Trung tâm Dự báo Khí tượng Thủy văn Quốc gia (NCHMF) trong giai đoạn 2013-2022 được sử dụng trong nghiên cứu này. Để kiểm định kết quả mô phỏng của mô hình RRI, dữ liệu lưu lượng sông Phó Đáy trong các tháng 7 và 8 năm 2018 tại hai trạm thủy văn Lập Thạch và Kim Xá - nằm trên dòng chính của hệ thống sông - được sử dụng. Vị trí các trạm khí tượng và thủy văn được minh họa trong Hình 1(b). Các trạm quan trắc được phân bố không đồng đều trong lưu vực sông Phó Đáy, với mật độ cao hơn ở khu vực hạ lưu (gần Hà

Nội, Phú Thọ) do đây là khu vực đông dân cư và có nhu cầu quản lý thủy văn cao. Thượng lưu (Thái Nguyên) có ít trạm hơn do địa hình phức tạp và dân cư thưa thớt.

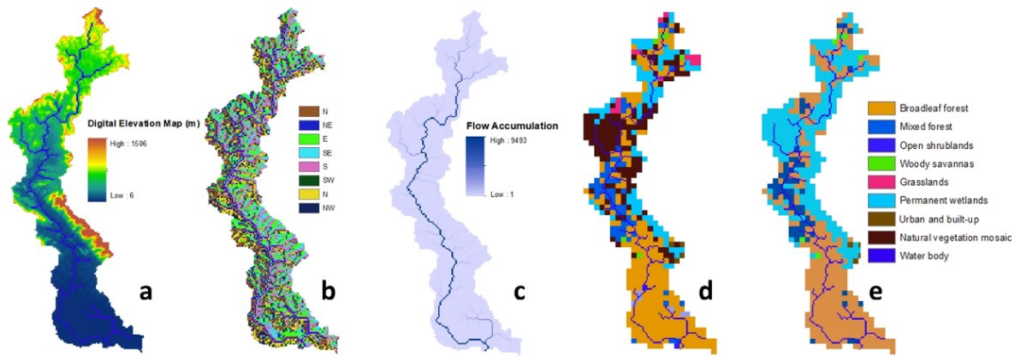
Khí hậu miền Bắc Việt Nam chịu ảnh hưởng rõ rệt của hệ thống gió mùa Đông Nam Á, với mùa mưa tập trung từ tháng 6 đến tháng 8 (JJA) và mùa khô lạnh từ tháng 12 đến tháng 2 (DJF). Nghiên cứu này tập trung phân tích điều kiện khí tượng và thủy văn của lưu vực sông Phó Đáy trong giai đoạn JJA nhằm đánh giá chính xác các đặc điểm liên quan đến lũ và ngập úng.

2.4.2. Dữ liệu mô hình khí hậu toàn cầu CMIP6

Để đánh tác động của biến đổi khí hậu, nghiên cứu này sử dụng dữ liệu mô phỏng khí hậu từ giai đoạn thứ sáu của Dự án Liên so sánh Mô hình Khí hậu (CMIP6) - một trong những nền tảng khoa học tiên tiến nhất hiện nay. Kịch bản khí hậu tương lai trong CMIP6 được xây dựng dựa trên các kịch bản phát triển kinh tế - xã hội và phát thải khí nhà kính khác nhau, gọi là các kịch bản kinh tế - xã hội chia sẻ (SSPs).

Tại Việt Nam, biến đổi khí hậu đang diễn biến nhanh hơn dự báo trước đây (Bộ TN&MT, 2020; Tran-Anh & cs., 2023; Tran-Anh & Ngo-Duc, 2024; Tran Anh & cs., 2024). Gần đây, Chính phủ đã cập nhật kịch bản phát thải cao nhất theo các nghiên cứu mới nhất của IPCC sử dụng bộ dữ liệu CMIP6. Kịch bản phát thải lớn nhất trong kế hoạch hành động quốc gia về biến đổi khí hậu và nước biển dâng (Bộ TN&MT, 2020) là RCP8.5 của CMIP5, tương ứng với kịch bản SSP5-8.5 trong CMIP6, với mức bức xạ cưỡng bức tăng thêm $8,5 \text{ W/m}^2$ so với thời kỳ tiền công nghiệp. Kịch bản này được lựa chọn để đánh giá biến đổi khí hậu ở Việt Nam vào cuối thế kỷ XXI (giai đoạn 2080-2099).

Nghiên cứu sử dụng hai mô hình khí hậu toàn cầu (GCM) từ CMIP6, gồm EC-Earth3 và HadGEM3-GC31-MM để cung cấp dữ liệu khí tượng cho mô phỏng lượng mưa và dòng chảy. Đây là hai mô hình đã được chứng minh có độ tin cậy cao theo đánh giá của Nguyen-Duy & cs. (2024).



Hình 2. Dữ liệu địa hình và sử dụng đất được sử dụng cho mô hình RRI

2.4.3. Điều kiện biên và điều kiện ban đầu cho mô hình

Nghiên cứu này sử dụng bộ dữ liệu tái phân tích JRA-25 của Cơ quan Khí tượng Nhật Bản (JMA) để tái hiện điều kiện khí hậu hiện tại và làm cơ sở cho các kịch bản khí hậu tương lai dưới giả định ấm lên toàn cầu. JRA-25 có độ phân giải phổ cầu T106, bao gồm 40 tầng thẳng đứng, với tầng cao nhất đạt 0,4hPa. Do bộ dữ liệu JRA-25 chỉ cung cấp dữ liệu đồng hóa từ tháng 1/1979 đến tháng 12/2004, nghiên cứu bổ sung dữ liệu từ Hệ thống Đồng hóa Dữ liệu Khí hậu của JMA (JCDAS) cho giai đoạn từ tháng 1/2005 trở đi. JCDAS áp dụng hệ thống tương tự JRA-25, đảm bảo tính liên tục và đồng nhất về chất lượng dữ liệu. Điều kiện khí hậu hiện tại được xây dựng bằng phương pháp chi tiết hóa động lực từ dữ liệu giai đoạn 2013-2022, với kết quả mô phỏng được ký hiệu là CTL.

Đối với điều kiện biên bề mặt đất trong mô hình WRF, nghiên cứu sử dụng dữ liệu phân tích toàn cầu NCEP (NCEP FNL) (NCEP, 2014). Về điều kiện biên bề mặt đại dương, dữ liệu nhiệt độ bề mặt biển hàng ngày của NOAA (NOAA OI SST) với độ phân giải 0,25 độ được áp dụng (Reynolds & cs., 2007).

2.4.4. Dữ liệu địa hình và lớp phủ thực vật

Dữ liệu đầu vào cho mô hình RRI được lấy từ dữ liệu thủy văn và bản đồ dựa trên Shuttle Elevation Derivatives at Multiple Scales (HydroSHEDS). Các dữ liệu địa hình đầu vào có độ phân giải 15 arc-second (~ 500m) cung cấp mô hình số độ cao, tích lũy dòng chảy và hướng dòng chảy để sử dụng trong mô hình RRI

(Hình 2(a, b, c)). Đối với yêu cầu về dữ liệu lớp phủ đất của RRI, nghiên cứu này sử dụng sản phẩm dựa trên cảm biến MODIS với độ phân giải 0,5km (Hình 2(d, e)).

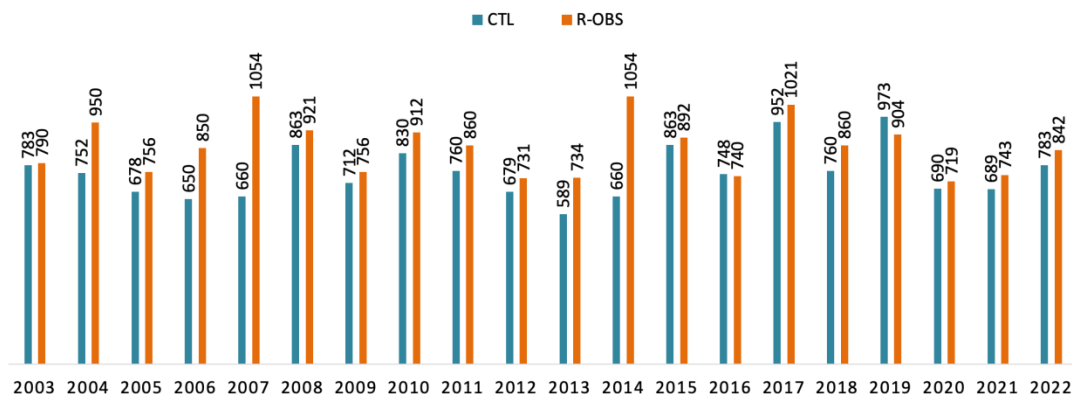
2.5. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình

Nghiên cứu kiểm chứng độ chính xác của chi tiết hóa lượng mưa bằng mô hình WRF trong giai đoạn 2003-2022 bằng cách so sánh với dữ liệu mưa quan trắc (R-OBS) từ 56 trạm đo mưa. Kết quả mô phỏng của mô hình RRI cũng được kiểm tra cho sự kiện lũ năm 2019 tại các trạm thủy văn Lập Thạch và Kim Xá.

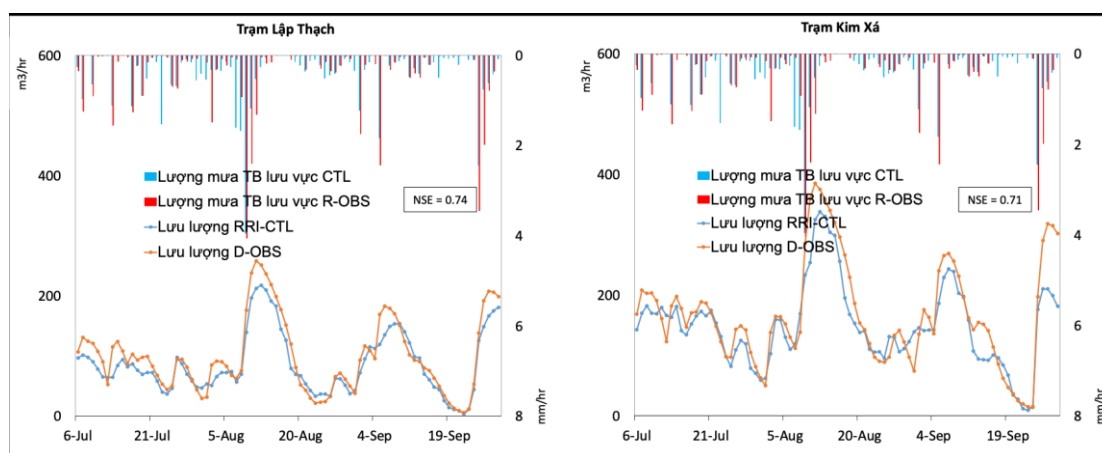
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đánh giá hiệu quả mô phỏng lượng mưa của mô hình WRF

Hình 3 so sánh lượng mưa trung bình mùa hè (JJA) tại 56 trạm quan trắc với dữ liệu mô phỏng bằng mô hình WRF (CTL) trong giai đoạn 2003-2022. Kết quả cho thấy lượng mưa JJA tái hiện bởi CTL dao động từ 73,5% đến 92,2% so với quan trắc và có xu hướng thiên thấp. Hệ số tương quan không gian trung bình trong 10 năm (2003-2022) giữa CTL và R-OBS đạt 0,77, cho thấy sự phù hợp tương đối tốt giữa kết quả mô phỏng và quan trắc. Về biến thiên thời gian của lượng mưa, hệ số tương quan giữa CTL và R-OBS trung bình trong các giai đoạn JJA tại 56 trạm quan trắc trong 20 năm dao động từ 0,52 đến 0,89, với trung bình là 0,7. Kết quả kiểm chứng cho thấy mô hình WRF có thể được sử dụng để chi tiết hóa lượng mưa tại lưu vực Phó Đáy với độ chính xác hợp lý.



Hình 3. So sánh lượng mưa trung bình JJA (mm) tại 56 trạm quan trắc và CTL trong giai đoạn 2003-2022



Hình 4. Lượng mưa trung bình lưu vực và lưu lượng sông theo mô phỏng RRI so với dữ liệu quan trắc tại trạm Lập Thạch và Kim Xá từ 1/7/2019 - 29/8/2019

3.2. Mô phỏng mô hình RRI cho các sự kiện lũ lịch sử

Dữ liệu mưa quan trắc từ tháng 7 đến tháng 8 năm 2019 được sử dụng để kiểm tra độ chính xác của mô hình RRI trong mô phỏng lũ. Hình 4 so sánh lưu lượng dòng chảy giữa kết quả mô phỏng từ tổ hợp RRI và WRF (RRI-CTL) với dữ liệu quan trắc thực tế trên sông Phó Đáy (D-OBS). Hệ số Nash-Sutcliffe (NSE) được dùng để đánh giá hiệu suất mô hình, đạt 0,71 tại trạm Lập Thạch và 0,74 tại trạm Kim Xá - cho thấy mức độ phù hợp cao, đặc biệt trong việc tái hiện xu thế giảm lưu lượng cuối mùa mưa.

Do NSE nhạy cảm với cực trị, giá trị cao cũng phản ánh khả năng mô hình mô phỏng tốt

các pha dòng chảy lớn. Dù có xu hướng đánh giá cao đỉnh lũ, cả đỉnh lớn và nhỏ đều được tái hiện chính xác. Đáng chú ý, đỉnh dòng chảy thường xuất hiện trễ khoảng một ngày sau mưa lớn, phản ánh độ trễ tự nhiên của lưu vực. Ngoài ra, do trạm Kim Xá nằm hạ lưu so với Lập Thạch, cả mô phỏng và quan trắc đều ghi nhận lưu lượng cao hơn khoảng 30-40%. Các kết quả trên khẳng định tính khả dụng của mô hình RRI trong nghiên cứu thủy văn tương lai cho lưu vực sông Phó Đáy.

3.3. Đánh giá biến động lượng mưa vào cuối thế kỷ XXI

Dữ liệu lượng mưa ngày của WRF cho JJA được sử dụng để đánh giá sự thay đổi phân bố

lượng mưa mùa mưa trên lưu vực sông Phó Đáy. So sánh giữa giai đoạn CTL (2003-2022) và các kịch bản tương lai từ HadGEM3-GC31-MM, EC-Earth3 (2080-2099) cho thấy cường độ mưa có xu hướng gia tăng đáng kể (Hình 5). Lượng mưa trung bình mùa JJA theo CTL, HadGEM3-GC31-MM và EC-Earth3 lần lượt là 634mm, 685mm và 842mm. Trong khi HadGEM3-GC31-MM chỉ dự báo mức tăng nhẹ (9,1%), EC-Earth3 cho thấy mức tăng đáng kể 32,2% so với CTL và cao hơn 19,5% so với HadGEM3-GC31-MM. Nghiên cứu của Tran-Anh & Ngo-Duc (2024) với 35 mô hình CMIP6 cũng ghi nhận xu hướng gia tăng lượng mưa ở miền Bắc Việt Nam vào nửa cuối thế kỷ XXI, tương đồng với đánh giá của Bộ TN&MT (2020). Sự khác biệt giữa EC-Earth3 và HadGEM3-GC31-MM cho thấy sự khác biệt trong cách hai mô hình xử lý các quá trình khí hậu, như đối lưu và bức xạ. Trong đó có thể mô hình EC-Earth3 nhạy hơn với các hiện tượng thời tiết cực đoan, dẫn đến dự báo lượng mưa cao hơn.

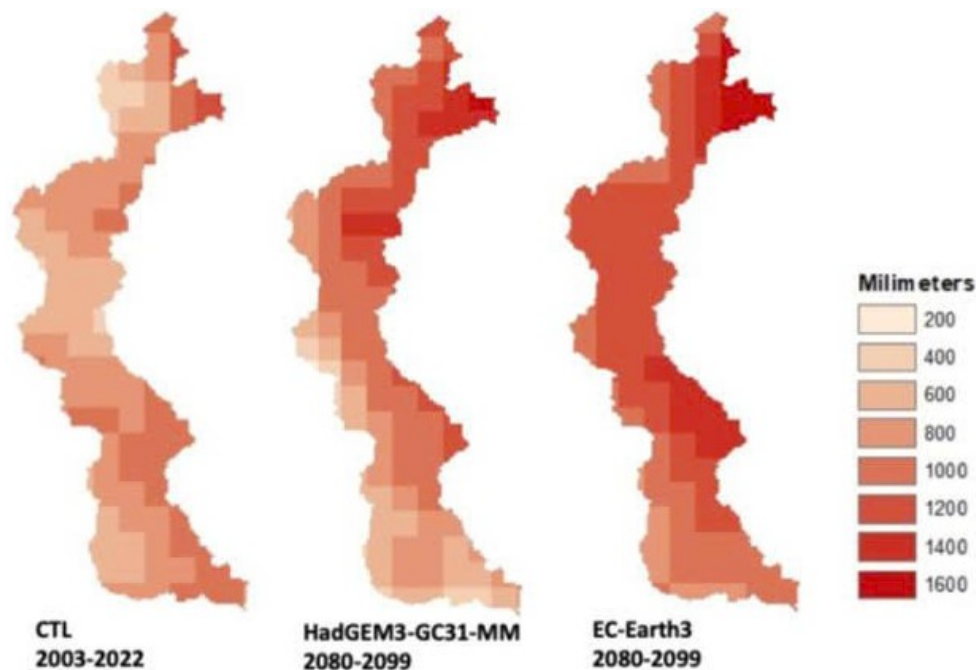
Dự báo của cả HadGEM3-GC31-MM và EC-Earth3 cho thấy sự phân bố lượng mưa trong tương lai có đặc điểm tương tự hiện tại, tập trung chủ yếu ở vùng thượng nguồn, đặc biệt ở phía bắc và đông bắc lưu vực. Xu hướng

này phản ánh ảnh hưởng của điều kiện địa hình đặc trưng của lưu vực sông Phó Đáy

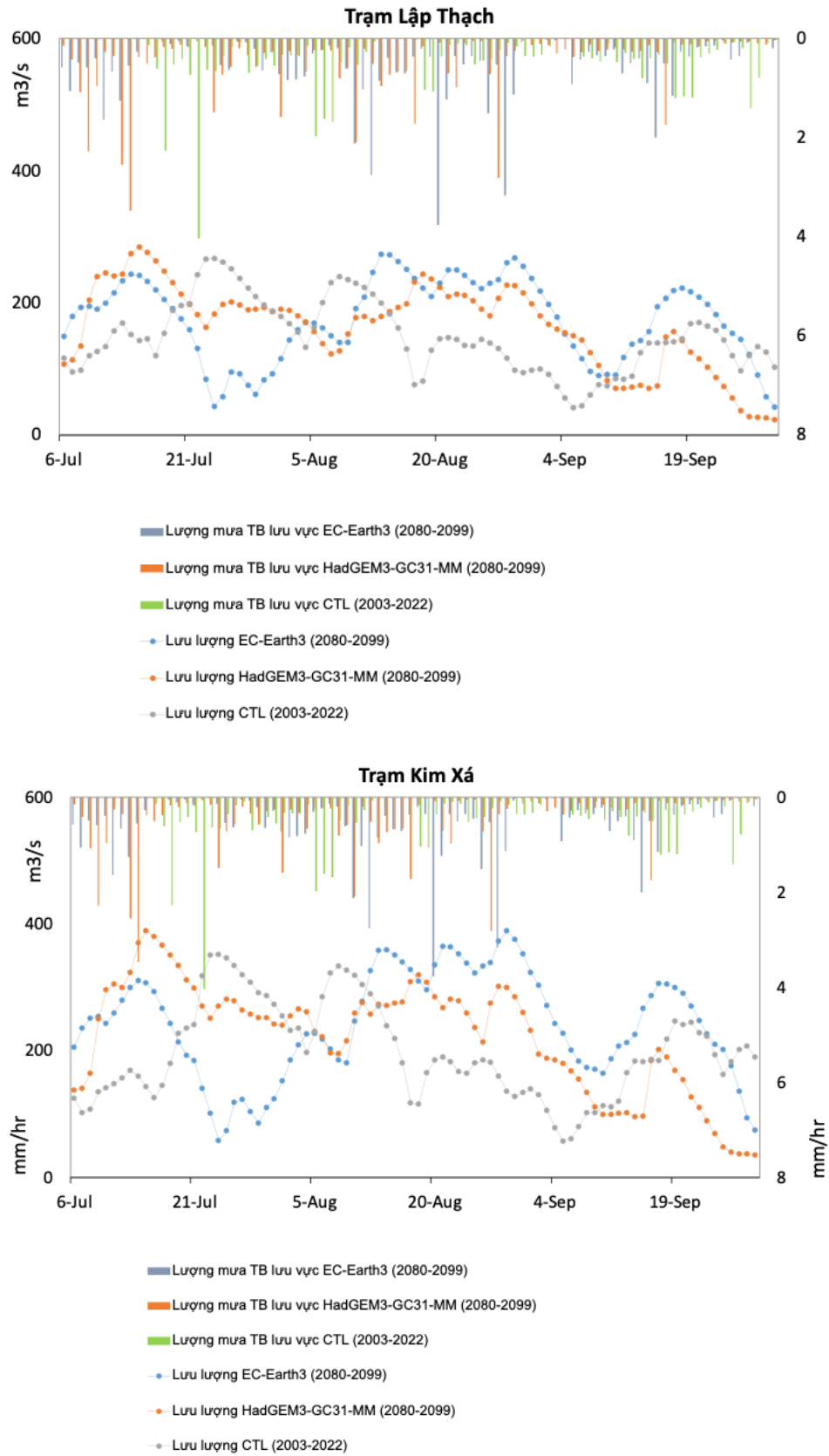
3.4. Xu hướng tương lai của dòng chảy và lũ lụt

Lượng mưa trong tương lai được dự báo tăng vào giữa thế kỷ XXI, kéo theo sự gia tăng lưu lượng dòng chảy, như thể hiện trong hình 6. Mô phỏng lưu lượng giai đoạn hiện tại (RRI-CTL, 2003-2022) tương đối phù hợp với kết quả từ HadGEM3-GC31-MM và EC-Earth3 (2080-2099) vào giữa mùa mưa, với sự khác biệt nhỏ về lưu lượng trung bình. Tuy nhiên, ảnh hưởng rõ rệt của mưa lớn chủ yếu xuất hiện vào nửa cuối mùa mưa, khi lưu lượng dự kiến vượt đáng kể so với CTL. Sự tập trung lũ vào cuối mùa JJA là do lượng mưa tăng mạnh vào thời điểm này, kết hợp với độ ẩm đất cao sau các đợt mưa trước đó, làm tăng dòng chảy bề mặt và ngập lụt.

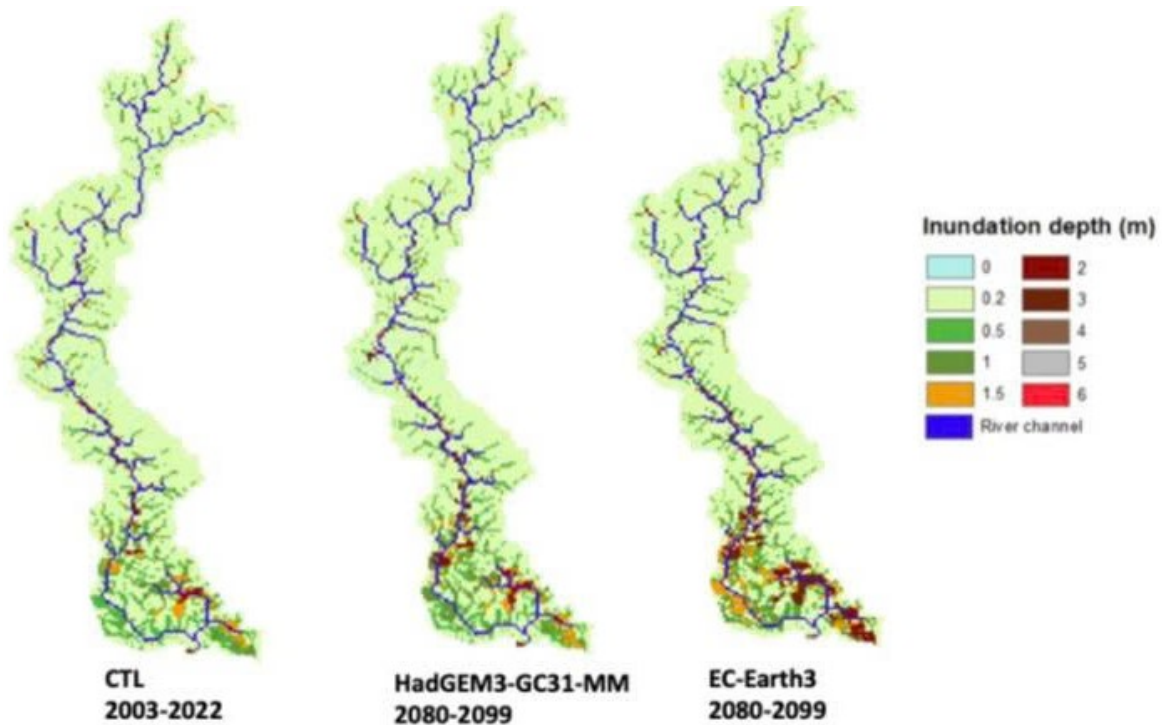
Theo CTL, đỉnh dòng chảy xảy ra đầu tháng 8, đạt 221 m³/s tại trạm Lập Thạch và 352 m³/s tại Kim Xá. Các giá trị tương ứng từ HadGEM3-GC31-MM là 252 m³/s và 391 m³/s; từ EC-Earth3 là 265 m³/s và 411 m³/s. Lưu lượng trung bình mùa mưa theo HadGEM3-GC31-MM và EC-Earth3 lần lượt đạt 159 m³/s và 172 m³/s, cao hơn CTL khoảng 8,8% và 15,6%.



Hình 5. Phân bố không gian của lượng mưa JJA trung bình vào cuối thế kỷ XXI



Hình 6. Lượng mưa hàng ngày và lưu lượng sông trong điều kiện hiện tại và tương lai tại các trạm Lập Thạch và Kim Xá



Hình 7. Mức ngập tối đa trong lưu vực sông Phô Đáy trong giai đoạn mùa mưa

Vào cuối mùa mưa, EC-Earth3 dự báo lưu lượng trung bình gấp đôi CTL tại cả hai trạm. Dù HadGEM3-GC31-MM dự báo lượng mưa thấp hơn đáng kể so với EC-Earth3, sự khác biệt lưu lượng chủ yếu thể hiện tại trạm Kim Xá, phản ánh đặc điểm dòng chảy khu vực hạ lưu. Cả ba kịch bản đều cho thấy lưu lượng giảm sau mùa mưa, trong đó HadGEM3-GC31-MM và EC-Earth3 giảm mạnh hơn CTL. Nhìn chung, lượng mưa được dự báo tăng rõ vào giữa mùa mưa nhưng kết thúc sớm hơn, dẫn đến sự biến đổi đáng kể về dòng chảy trong tương lai.

Hình 7 thể hiện phân bố độ sâu ngập lụt tối đa theo kịch bản hiện tại (CTL) và các kịch bản tương lai. Bản đồ được xây dựng dựa trên giá trị lớn nhất của độ sâu ngập tại từng ô lưới trong lưu vực sông Phô Đáy trong suốt giai đoạn 20 năm, phản ánh điều kiện ngập nghiêm trọng nhất có thể xảy ra. Cả hai mô hình HadGEM3-GC31-MM và EC-Earth3 đều dự báo mức ngập tối đa trong tương lai cao hơn rõ rệt so với CTL. Trong kịch bản cực đoan của CTL, độ sâu ngập tại các khu vực xa kênh sông dao động từ 0,5-1,5m; trong khi tại các vùng gần sông, độ sâu thường từ 1,5-2m và có thể đạt 3-4m tại

một số vị trí ngoài lòng sông. Các kịch bản theo HadGEM3-GC31-MM và EC-Earth3 cho thấy ngập lụt nghiêm trọng hơn ở khu vực hạ lưu, với mức nước cao hơn CTL khoảng 0,5-1m. Các trận lũ cực đoan (độ sâu ngập > 3m) xuất hiện với tần suất và phạm vi lớn hơn. Tại khu vực sát kênh sông chính ở hạ lưu, độ sâu ngập phổ biến trong các kịch bản tương lai dao động từ 1-3m, vượt đáng kể so với CTL. So sánh giữa hai mô hình, kịch bản cực đoan theo EC-Earth3 cho thấy mức ngập sâu và diện phân bố ngập rộng hơn so với HadGEM3-GC31-MM. Điều này phù hợp với lượng mưa trung bình JJA và lưu lượng dòng chảy cao hơn trong mô hình EC-Earth3. Do sự khác biệt giữa CTL và các kịch bản tương lai chủ yếu xuất hiện từ cuối tháng 7 đến đầu tháng 8, có thể dự báo rằng các sự kiện ngập lụt nghiêm trọng trong tương lai sẽ tập trung vào giai đoạn cuối mùa mưa.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu tích hợp mô hình WRF và RRI để phân tích biến động lượng mưa, dòng chảy và ngập lụt tại lưu vực sông Phô Đáy vào cuối thế

kỷ XXI theo kịch bản SSP5-8.5. Dữ liệu đầu vào bao gồm quan trắc từ 56 trạm NCHMF (2013-2022), tái phân tích JRA-25/JCDAS, và kịch bản CMIP6 từ EC-Earth3 và HadGEM3-GC31-MM. Cả hai mô hình chứng minh độ tin cậy cao trong việc tái hiện điều kiện khí tượng và thủy văn, phản ánh chính xác các đặc trưng thời tiết và lũ lịch sử. Kết quả cho thấy, dưới tác động của biến đổi khí hậu, lượng mưa mùa hè (JJA) gia tăng đáng kể vào giai đoạn 2080-2099, với mức tăng từ 9,1% (HadGEM3-GC31-MM) đến 32,2% (EC-Earth3) so với hiện tại, tập trung chủ yếu ở thượng nguồn phía bắc và đồng bằng lưu vực. Điều này dẫn đến lưu lượng dòng chảy tăng, với lưu lượng trung bình mùa mưa dự kiến cao hơn 8,8% đến 15,6% so với điều kiện cơ sở. Nguy cơ ngập lụt cũng nghiêm trọng hơn, với độ sâu ngập tại các khu vực gần sông tăng từ 1,5-2m hiện tại lên mức cao hơn, đặc biệt ở hạ lưu. Các sự kiện lũ cực đoan xuất hiện thường xuyên hơn vào cuối mùa mưa, phản ánh ảnh hưởng phức tạp của biến đổi khí hậu. Tuy nhiên, do kết quả nghiên cứu mới chỉ dừng lại ở hai mô hình khí hậu EC-Earth3 và HadGEM3-GC31-MM và kịch bản phát thải giới hạn nên kết quả có thể chưa phản ánh đầy đủ sự biến thiên của kịch bản nóng lên của toàn cầu. Trong tương lai, cần mở rộng số lượng mô hình, kịch bản, tích hợp dữ liệu dài hạn hơn, và đánh giá tác động kinh tế - xã hội của ngập lụt, bao gồm thiệt hại cơ sở hạ tầng, nông nghiệp, và đề xuất các biện pháp thích ứng như quy hoạch đô thị bền vững.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) mã số 105.06-2021.14.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Bộ TN&MT (2020). Kịch bản biến đổi khí hậu, nước biển dâng cho Việt Nam.
- Cerri M. (2017). Flood simulation using HEC-RAS model calibrated with remotely sensed water mask: a case study of Mulde River, Germany. PhD thesis. TU München.
- Đặng Hoàng Lam, Nguyễn Huy Phương, Nguyễn Đình Đạt & Nguyễn Tiền Giang (2022). Xây dựng mô hình MIKE 11 phục vụ công tác dự báo thủy văn và xâm nhập mặn tỉnh Bến Tre. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*. 740(1): 38-49. [http://dx.doi.org/10.36335/VNJHM.2022\(740\(1\)\).38-49](http://dx.doi.org/10.36335/VNJHM.2022(740(1)).38-49).
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. In: C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea & L.L. White (Editor). Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. 1132p.
- IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu & B. Zhou (Editor). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 3-32.
- National Centers for Environmental Prediction/ National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce (2000). NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, Continuing from July 1999. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.5065/D6M043C6> on Jun 12, 2014.
- Nguyen Duy T., Ngo-Duc T. & Desmet Q. (2023). Performance evaluation and ranking of CMIP6 global climate models over Vietnam. *Journal of Water and Climate Change*. 14(6): 1831-1846. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.454>.
- Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C., Chelton D.B., Casey K. S. & Schlax M. G. (2007). Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of Climate*. 20(22): 5473-5496. <http://dx.doi.org/10.1175/2007JCLI1824.1>.
- Sayama T., Ozawa G., Kawakami T., Nabesaka S. & Fukami K. (2012). Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin. *Hydrological Sciences Journal*. 57(2): 298-312.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.Y. & Powers J.G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Technical Note NCAR/TN. 475(125).
- Taniguchi K. (2016). Future changes in precipitation and water resources for Kanto Region in Japan

- after application of pseudo global warming method and dynamical downscaling. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 8: 287-303.
- Thảo Trần Thị Thu, Vũ Thị Hoa, Phạm Thị Minh & Bùi Thị Tuyết (2021). Nghiên cứu ứng dụng mô hình HEC-RAS mô phỏng dòng chảy lũ lưu vực sông Bến Hải tỉnh Quảng Trị. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*. 691: 30-38.
- Tran-Anh Q., Ngo-Duc T., Espagne E. & Trinh Tuan L. (2023). A 10-Km CMIP6 Downscaled Dataset of Temperature and Precipitation for Historical and Future Vietnam Climate. *Scientific Data*. 10(1): 257. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02159-2>.
- Tran-Anh Q. & Ngo-Duc T. (2024). Probabilistic Projections of Temperature and Rainfall for Climate Risk Assessment in Vietnam. *Journal of Water and Climate Change*. 15(5): 2015-2032. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.461>.
- Tran Anh Quan & Taniguchi K. (2018). Rainfall runoff and inundation in Cau-Thuong-Luc Nam watershed in Vietnam under global warming. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*. 74(4): 163-168.
- Tran Anh Q., Nguyen Ngoc H. T., Do H. T. & Tran Hong T. T. (2024). Future climate projections for Vietnam: Temperature and precipitation changes under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. *Journal of Mining and Earth Sciences*. 65(2): 66-75. [https://doi.org/10.46326/JMES.2024.65\(2\).08](https://doi.org/10.46326/JMES.2024.65(2).08).
- Trần Thực, Nguyễn Xuân Hiền, Huỳnh Thị Lan Hương, Trần Văn Trà, Dương Ngọc Tiến & Đoàn Thị Thu Hà (2017). Estimating Sea Level Rise for Vietnam East Sea. *Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering*. 59(1): 73-78.
- Tran Anh Q., Nguyen Ngoc H.T., Tran Hong T.T., Do H.T. & Tra Hong K.T. (2019). Rainfall-Runoff and Inundation of Ma River Basin Under Global Warming. *Journal of Mining and Earth Sciences*. 60(6): 13-22.