

NGHIÊN CỨU CÁC CHỈ SỐ NHẬN BIẾT NƯỚC TỪ ẢNH SENTINEL-2 TRÊN NỀN GOOGLE EARTH ENGINE: ỨNG DỤNG CHO THÀNH PHỐ SA ĐÉC, TỈNH ĐỒNG THÁP

Phạm Văn Chiến

Trường Đại học Thủy lợi

Tóm tắt: Bài báo này trình bày các kết quả nghiên cứu ba chỉ số NDWI, MNDWI và WNDWI cho nhận biết, phân biệt và giải đoán pixel có nước và không nước từ ảnh Sentinel-2 trong thành phố Sa Đéc, tỉnh Đồng Tháp trên nền Google Earth Engine. Bộ lọc thông cao trước tiên được áp dụng để đồng nhất độ phân giải theo không gian cho dải băng hồng ngoại sóng ngắn (SWIR) từ 20 về 10 m trong vùng nghiên cứu. Các diện tích nước và không phải nước trong miền quan tâm sau đó được số hóa trực tiếp từ Google Earth sử dụng công cụ GIS để tạo bộ dữ liệu tham chiếu. Tiếp theo, phân tích độ nhạy của giá trị ngưỡng và hệ số trọng số được thực hiện khi sử dụng chỉ số WNDWI, kết quả thể hiện rằng giá trị -0.11 và 0.50 được xác định tương ứng cho giá trị ngưỡng và hệ số trọng số. Sai số tổng thể, hệ số kappa, sai số EC và EO lần lượt tương ứng là 0,98, 0,85, 0,015 và 0,006. Trong số ba chỉ số đã chọn, chỉ số WNDWI và MNDWI phù hợp nhất để phát hiện các vùng nước trong khu vực nghiên cứu, với sai số tổng thể > 0,98 và hệ số kappa > 0,84. Cuối cùng, khả năng và hiệu quả của việc ứng dụng GEE cho việc giải đoán ảnh cũng được thảo luận.

Từ khóa: Google Earth Engine, WNDWI, MNDWI, NDWI, Sentinel-2

Summary: This paper presents the results of using three popular water indices namely NDWI, MNDWI, and WNDWI on detecting water bodies for the Sa Dec city, Dong Thap province based on Google Earth Engine (GEE) cloud platform. The high pass filter is firstly applied for pan-sharpening of the shortwave infrared (SWIR) band from 20 to 10 m in spatial resolution of the domain of interest. The real water and non-water areas in the domain of interest are then digitized directly from Google Earth using the GIS tool in order to create the reference dataset. Next, sensitivity analysis of the threshold value and weighted coefficient are performed when using the WNDWI, resulting in values of -0.11 and 0.50 are obtained for the threshold value and weighted coefficient, respectively. The overall accuracy, kappa coefficient, error of commission and error of omission equal 0.98, 0.85, 0.015 and 0.006, respectively. Among three selected water indices, WNDWI and MNDWI are the most suitable indices for detecting water bodies in the studied area, with the overall accuracy > 0.98 and kappa coefficient > 0.84. Finally, capacity and time consuming on detecting water bodies using Sentinel-2 images based on GEE are also discussed.

Keywords: Google Earth Engine, WNDWI, MNDWI, NDWI, Sentinel-2

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Ngày nay, ảnh Sentinel-2 đã và đang được sử dụng rộng rãi cho các mục đích xây dựng các bản đồ đặc trưng của bề mặt đệm cũng như giám sát và quản lý rủi ro thiên tai [1-3], bởi vì ảnh

Sentinel-2 cho phép xem xét các yếu tố bề mặt đệm với độ phân giải theo không gian thay đổi từ quy mô lưu vực tới quy mô vùng hoặc toàn cầu, tại các thời điểm khác nhau. Bart et al. [1] đã sử dụng dữ liệu ảnh Sentinel-2 có độ phân

Ngày nhận bài: 02/4/2020

Ngày thông qua phản biện: 20/5/2020

Ngày duyệt đăng: 05/6/2020

giải 10 m để thiết lập các bản đồ ngập nước với nhiều cấp độ đặc trưng khác nhau, trong đó bao gồm cả phân loại các kiểu thảm thực vật và thay đổi diện tích mặt nước vùng đầm lầy St. Lucia (Nam Phi). Douglas et al. [2] đã kết hợp ảnh Sentinel-2 và Landsat 8 OLI để nghiên cứu sự biến động theo thời gian của các hệ sinh thái trên mặt đất. Bar et al. [3] đã xác định các khu vực cháy rừng dưới ảnh hưởng của các điều kiện thời tiết khô hanh trong mùa khô cho vùng Western Himalaya sử dụng ảnh Sentinel-2 và Landsat-8 OLI. Những ví dụ trên khẳng định rằng nguồn dữ liệu bề mặt đệm thu thập, giải đoán được từ ảnh Sentinel-2 là nguồn dữ liệu vô cùng quý giá, giúp việc quản lý rủi ro thiên tai trở nên hiệu quả hơn.

Để nhận biết và xác định các đặc trưng bề mặt đệm quan tâm, các chỉ số NDWI (Normalized Difference Water Index), MNDWI (modified normalized difference water index) và WNDWI (weighted normalized difference water index) thường được sử dụng [1-4]. Liên quan đến phân biệt và nhận diện các khu vực có nước và không có nước, cả ba chỉ số nêu trên đều cho phép phân biệt và nhận diện các vùng ngập nước và không ngập nước một cách nhanh chóng với độ chính xác nhất định [5]. Chỉ số NDWI có thể tăng cường các thông tin liên quan đến nước trên ảnh vệ tinh. Tuy nhiên, khi ứng dụng chỉ số NDWI trong việc giải đoán các vùng ngập nước và không ngập nước (nhất là trong các khu đô thị) thì chỉ số này cho kết quả giải đoán các điểm ảnh có chứa nước và không chứa nước thường không chính xác [6]. Để khắc phục được nhược điểm trên, chỉ số MNDWI đã được phát triển và sử dụng, bởi vì chỉ số MNDWI sử dụng bước sóng ngắn cận hồng ngoại (SWIR) thay thế cho bước sóng cận hồng ngoại (NIR). Lưu ý rằng trong các vùng ngập nước mà có nồng độ bùn cát cao, chỉ số NDWI hoặc MNDWI thường cho kết quả là các vùng không ngập nước. Do đó, để khắc phục các hạn chế của hai chỉ số trên, kể từ năm 2017, chỉ số WNDWI đã được sử dụng cho phân biệt và nhận biết các khu vực có nước và không có nước, bởi vì chỉ

số này cho phép xem xét kết hợp sử dụng ban cận hồng ngoại, bước sóng ngắn cận hồng ngoại và Green trên ảnh để tăng cường khả năng giải đoán các điểm ảnh chứa nước và không chứa nước cho vùng nghiên cứu (nhất là trong các vùng nghiên cứu mà tại đó có nồng độ bùn cát lớn).

Các đặc trưng bề mặt đệm có thể được giải đoán từ các vệ tinh, như MODIS, LANDSAT, Sentinel. Trong các loại ảnh vệ tinh nêu trên thì ảnh Sentinel, cụ thể là Sentinel-2 có độ phân giải tốt nhất và được cung cấp miễn phí bởi Cơ quan vũ trụ hàng không Châu Âu (ESA). Do đó, ảnh Sentinel-2 được chọn là nguồn dữ liệu đầu vào trong nghiên cứu này. Quá trình giải đoán ảnh Sentinel-2 thường yêu cầu và đòi hỏi các hệ thống máy tính hiệu năng cao bởi vì dung lượng ảnh lớn. Trong bối cảnh đó, Google Earth Engine (GEE) gần đây đã ra đời và cho phép người dùng trong các lĩnh vực khác nhau sử dụng hệ thống máy tính hiệu suất cao và nền tảng điện toán song song của máy chủ Google để xử lý hình ảnh vệ tinh một cách nhanh chóng và hiệu quả [6].

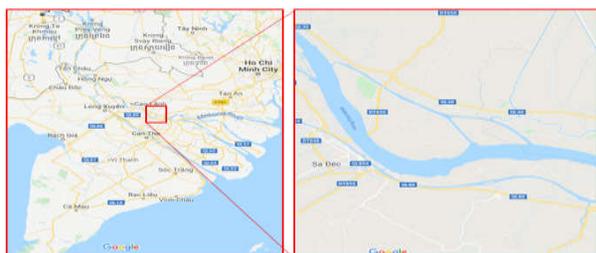
Mục tiêu chính của bài báo này là nghiên cứu ứng dụng ba chỉ số (NDWI, MNDWI và WNDWI) để phân biệt và nhận biết các khu vực có nước và không có nước cho thành phố Sa Đéc, tỉnh Đồng Tháp khi sử dụng hình ảnh Sentinel-2 trên nền điện toán đám mây GEE. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng nhằm mục đích xác định chỉ số phù hợp cho phân biệt và nhận biết các khu vực có nước và không nước trong vùng nghiên cứu.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

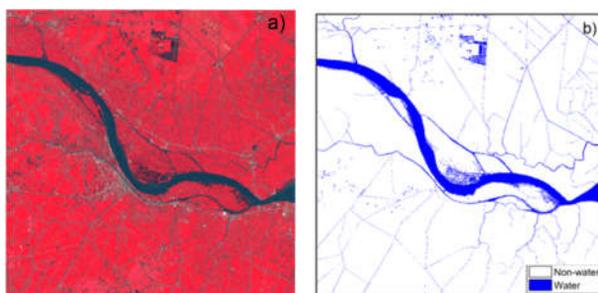
2.1. Vùng nghiên cứu và dữ liệu ảnh Sentinel-2 cho vùng nghiên cứu

Thành phố Sa Đéc, tỉnh Đồng Tháp thuộc hạ lưu sông Mekong, đã được lựa chọn làm miền nghiên cứu trong bài báo này (*Hình 1*). Thành phố Sa Đéc là nơi mà phân bố diện tích ngập nước theo không gian diễn biến rất phức tạp, bởi vì ngoài ảnh hưởng do lũ lụt từ phía thượng

lưu sông Mekong, thành phố Sa Đéc cũng thường xuyên bị ảnh hưởng mạnh mẽ của thủy triều. Do đó, nhận biết các vùng ngập nước và các vùng không bị ngập nước cho thành phố Sa Đéc là một việc làm hết sức quan trọng, nhằm hỗ trợ không chỉ cho các nhà quản lý trong quá trình ra quyết định mà còn cho các tổ chức có thể tiến hành lập kế hoạch một cách nhanh chóng trong việc tiêu thoát cũng như xây dựng các kế hoạch phát triển chiến lược cho thành phố trong tương lai. Hình 2a thể hiện ảnh Sentinel-2 thu thập ngày 01 tháng 01 năm 2020 cho vùng nghiên cứu, với độ phân giải 10m cho các band Green and NIR, 20m cho band SWIR. Hình 2b thể hiện các vùng ngập nước và các vùng không bị ngập nước trong vùng nghiên cứu sử dụng công cụ số hóa của ArcGIS.



Hình 1: Bản đồ khu vực nghiên cứu

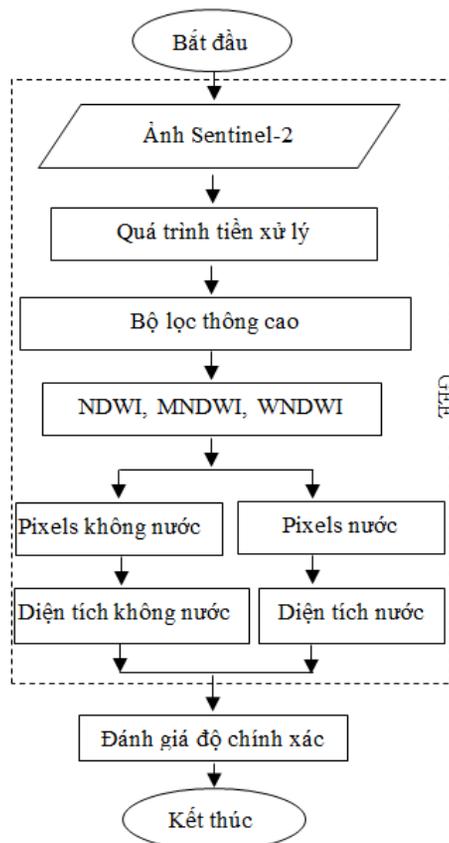


Hình 2: Vùng nghiên cứu: a) ảnh Sentinel-2 cho vùng nghiên cứu và b) các diện tích nước và không nước trong vùng nghiên cứu sau khi số hóa

2.2. Sơ đồ quá trình thực hiện trên nền GEE

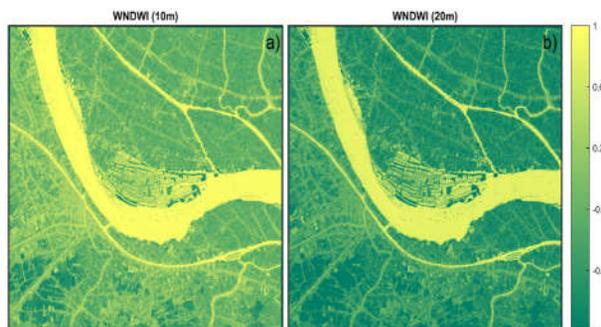
Hình 3 thể hiện sơ đồ quá trình phân biệt và nhận biết vùng ngập nước và các vùng không bị ngập nước sử dụng các chỉ số NDWI, MNDWI và WNDWI trên nền GEE mà nghiên cứu thực hiện. Các bước và quá trình chính cho giải đoán ảnh Sentinel-2 có thể tóm tắt như sau. Đầu tiên,

ảnh Sentinel-2 bao phủ vùng nghiên cứu được thu thập. Sau đó, quá trình tiền xử lý được thực hiện nhằm loại bỏ các ảnh hưởng của các yếu tố nhiễu. Tiếp đến, bộ lọc thông cao được áp dụng để đồng nhất độ phân giải theo không gian (10 m) cho tất cả các band. Sau đó, ba chỉ số NDWI, MNDWI và WNDWI lần lượt được áp dụng để xác định các pixel có nước và không nước, từ đó xác định các diện tích không nước và có nước trong vùng nghiên cứu. Cuối cùng, bốn chỉ tiêu đánh giá sai số, bao gồm sai số tổng thể (OA), hệ số Kapa (KC), sai số chủ quan (EC) và sai số bỏ sót (EO) được tính toán để đánh giá độ chính xác của các kết quả nhận biết, phân biệt và giải đoán các khu vực nước và không nước trong vùng nghiên cứu.



Hình 3: Sơ đồ quá trình phân biệt và nhận biết nước và không nước

2.3. Bộ lọc thông cao cho đồng nhất độ phân giải theo không gian của các band



Hình 4: Phân bố theo không gian của chỉ số WNDWI sau khi sử dụng bộ lọc thông cao, với độ phân giải: a) 10 m và b) 20 m

Lưu ý rằng trên ảnh Sentinel-2, band Green và NIR có độ phân giải không gian là 10 m, trong khi band SWIR có độ phân giải là 20m. Do đó, để thu được kết quả nhận biết, phân biệt và giải đoán các pixel có nước và không nước tốt nhất, độ phân giải theo không gian của các band phải đồng nhất. Cụ thể, độ phân giải theo không gian của band SWIR nên được đưa về 10 m, trước khi nó được áp dụng. Một số phương pháp thường được ứng dụng để nâng cao độ phân giải cho band SWIR có thể kể đến, như: phương pháp phân tích thành phần chính (PCA), phương pháp chuyển đổi hệ màu (IHS), phương pháp bộ lọc thông cao (HPF) và phương pháp chuyển đổi sóng (ATWT). Trong các phương pháp nêu trên, phương pháp bộ lọc thông cao được lựa chọn và sử dụng trong nghiên cứu này, bởi vì phương pháp này kết quả chuyển đổi tốt nhất [6]. Phương pháp bộ lọc thông cao sử dụng thuật toán lựa chọn các thông tin cao tần về bề mặt không gian từ band Pan-chromatic của ảnh Sentinel-2, trong đó cho phép xem xét các toán tử như Gaussian, Laplacian. Hình 4 thể hiện giá trị của chỉ số WNDWI cho vùng nghiên cứu trước và sau khi sử dụng phương pháp bộ lọc thông cao.

2.4. Các chỉ số nước

Ba chỉ số nhận biết nước (NDWI, MNDWI, và WNDWI) đã được sử dụng trong nghiên cứu này bởi vì các chỉ số này cho phép nhận biết, phân biệt và giải đoán các diện tích có nước và

không có nước trong các vùng đồng bằng có địa hình bằng phẳng (Du et al., 2016). biểu thức tính của chỉ số WNDWI được thể hiện như sau:

$$WNDWI = \frac{\rho_{Band 2} - \alpha \times \rho_{Band 4} - (1 - \alpha) \times \rho_{Band 5}}{\rho_{Band 2} + \alpha \times \rho_{Band 4} + (1 - \alpha) \times \rho_{Band 5}} \quad (1)$$

Trong đó $\rho_{Band 3}$, $\rho_{Band 8}$ và $\rho_{Band 11}$ lần lượt là giá trị phản xạ của các band Green, NIR và SWIR trên ảnh Sentinel-2, α là hệ số trọng số có giá trị thay đổi từ 0 đến 1.0.

Chỉ số WNDWI có thể trở thành chỉ số NDWI khi $\alpha=0$, trong khi đó chỉ số này chính là chỉ số MNDWI nếu $\alpha=1$. Giá trị ngưỡng thường được sử dụng để phân nhận biết và phân loại các pixel có nước và không nước cho ảnh, từ đó xác định các diện tích ngập nước và không ngập nước trong vùng nghiên cứu. Cụ thể, một pixel (với độ phân giải 10 m x 10) nào đó trên ảnh Sentinel-2 được nhận biết là pixel có chứa nước nếu giá trị của các chỉ số (NDWI, MNDWI, WNDWI) lớn hơn giá trị ngưỡng. Trong nghiên cứu này, giá trị thích hợp của giá trị ngưỡng để phân loại pixel có nước và không nước (và hệ số trọng số) được xác định theo phương pháp thử sai và dựa trên sự so sánh các pixel có nước số hóa và các pixel có nước giải đoán từ ảnh sử dụng bốn chỉ tiêu đánh giá sai số.

2.5. Đánh giá độ chính xác

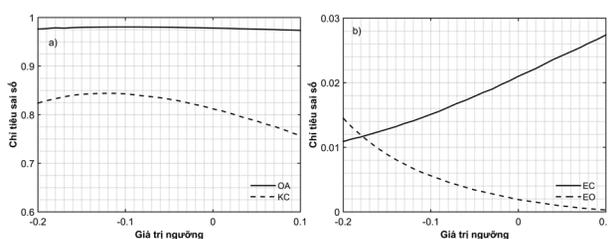
Để đánh giá độ chính xác kết quả giải đoán các pixel có nước và không nước từ ảnh Sentinel-2 cho vùng nghiên cứu, bốn chỉ tiêu sai số, bao gồm sai số tổng thể (OA - overall accuracy), hệ số Kappa (KC - Kappa coefficient), sai số chủ quan (EC - error of commission) và sai số bỏ sót (EO - error of omission) đã được tính toán. Sai số tổng được xác định dựa trên tỷ số giữa tổng số pixel được phân loại chính xác chia cho tổng số pixel. Hệ số KC thể hiện sự phù hợp giữa các pixel phân loại và các pixel đúng, và nó được tính như sau:

$$KC = \frac{N \sum_{i=1}^N m_{i,i} - \sum_{i=1}^N (G_i C_i)}{N^2 - \sum_{i=1}^N (G_i C_i)} \quad (2)$$

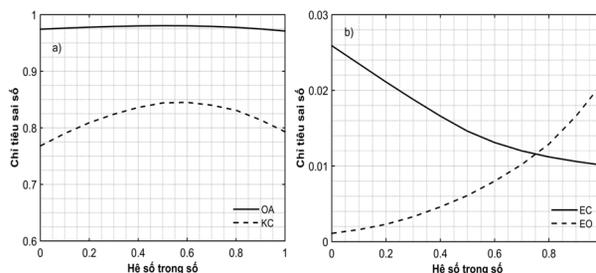
trong đó i là pixel thứ i , N là tổng số pixels được phân loại so với pixel đúng, $m_{i,i}$ là số pixel thuộc lớp thứ i (nghĩa là các giá trị được tìm thấy dọc theo đường chéo của ma trận), C_i là tổng số pixel dự đoán thuộc về lớp i và G_i là tổng số pixel đúng thuộc lớp thứ i . Sai số chủ quan EO được tính bằng cách xem xét các pixel phân loại không chính xác do chủ quan. Giá trị của EO được xác định dựa trên tỷ số số pixel phân loại không chính xác và tổng số pixel. Tương tự, sai số bỏ sót EC cũng được xác định bằng tỷ số giữa tổng số pixel được phân loại không chính xác do bỏ sót và tổng số pixel tham chiếu.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.2. Ảnh hưởng của giá trị ngưỡng và hệ số trọng số



Hình 5: Ảnh hưởng của giá trị ngưỡng tới kết quả giải đoán ($\alpha=0.50$)



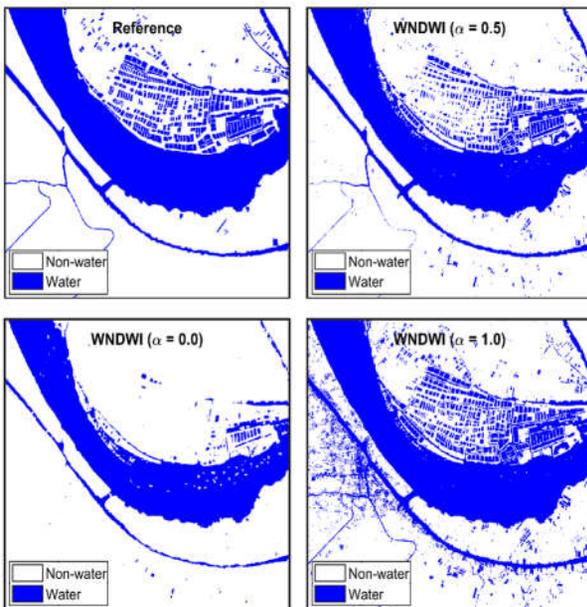
Hình 6: Ảnh hưởng của hệ số trọng số tới kết quả giải đoán (giá trị ngưỡng bằng -0.11)

Như đã trình bày, chỉ số WNDWI có thể trở thành chỉ số NDWI hoặc MNDWI tùy theo sự thay đổi giá trị của hệ số trọng số. Do đó, chỉ số WNDWI đã được lựa chọn để khảo sát sự ảnh hưởng của giá trị ngưỡng (cũng như hệ số trọng số) tới các kết quả giải đoán và nhận biết nước và không nước từ ảnh Sentinel-2 cho khu vực nghiên cứu. Hình 5-6 thể hiện giá trị của các chỉ tiêu sai số tương ứng với các giá trị ngưỡng và hệ số trọng số khác nhau, trong khi đó giá trị cụ thể của bốn chỉ tiêu sai số được thống kê như trong Bảng 1. Giá trị của OA rất gần một, trong khi giá trị của hệ số KC thay đổi từ 0.75 đến 0.85. Giá trị của EC thay đổi giữa 0.011 và 0.028, giá trị của EO biến đổi từ 0.0003 đến 0.021. Đồng thời, trong bốn chỉ tiêu sai số, chỉ số OA là chỉ số sai số ít nhạy nhất đối với sự thay đổi của các giá trị ngưỡng và hệ số trọng số.

Bảng 1: Giá trị của 4 chỉ tiêu sai số ứng với các giá trị hệ số khác nhau

Hệ số		OA	KC	EC	EO
α	Giá trị ngưỡng				
0.50	-0.20	0.9764	0.824	0.0109	0.0145
	-0.15	0.9798	0.842	0.0128	0.0089
	-0.11	0.9808	0.848	0.0146	0.0061
	-0.10	0.9806	0.843	0.0151	0.0056
	-0.05	0.9800	0.832	0.0179	0.0034
	0.00	0.9783	0.812	0.0210	0.0019
	0.05	0.9761	0.787	0.0242	0.0009
	0.10	0.9735	0.757	0.0274	0.0003

Hệ số		OA	KC	EC	EO
α	Giá trị ngưỡng				
0.00	-0.11	0.9743	0.768	0.0259	0.0011
0.20		0.9779	0.809	0.0211	0.0023
0.40		0.9801	0.836	0.0166	0.0046
0.50		0.9808	0.848	0.0146	0.0061
0.60		0.9803	0.845	0.0131	0.0080
0.80		0.9776	0.831	0.0112	0.0129
1.00		0.9711	0.793	0.0101	0.0211



Hình 7: Nước trong khu vực nghiên cứu khi sử dụng các hệ số trọng số khác nhau ($\alpha=0, 0.5$ và 1.0) và giá trị ngưỡng bằng -0.11

Hình 7 thể hiện kết quả phân biệt các khu vực có nước và không nước trong vùng nghiên cứu tương ứng với các giá trị khác nhau của hệ số trọng số và giá trị tối ưu của trị số ngưỡng. Kết quả giải đoán thể hiện rằng có sự tương quan chặt chẽ giữa kết quả giải đoán (các khu vực có nước và không nước) với kết quả số hóa các khu vực có nước và không nước trong vùng nghiên cứu khi sử dụng chỉ số WNDWI (với $\alpha=0.50$ và giá trị ngưỡng bằng -0.11). Giá trị của các chỉ tiêu sai số OA, KC, EC, và EO lần lượt là 0.98, 0.85, 0.015, và 0.006. Các kết quả

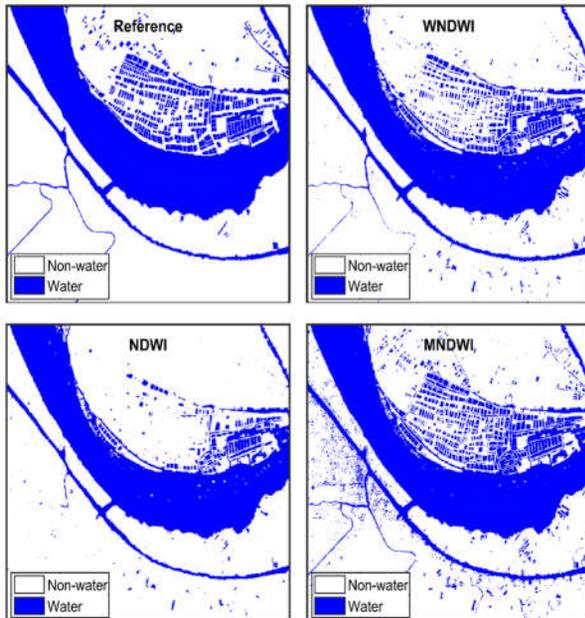
giải đoán khu vực có nước khi sử dụng chỉ số NDWI và MNDWI thì thiên nhỏ so với giá trị tham khảo. Nguyên nhân chính dẫn đến hiện tượng trên là do sử dụng giá trị ngưỡng bằng -0.11 .

3.4. Kết quả phân biệt nước và không nước từ các chỉ số

Như đã trình bày, các kết quả giải đoán khu vực có nước trong vùng nghiên cứu có thể thiên lớn hoặc thiên nhỏ khi sử dụng chỉ số NDWI hoặc MNDWI. Do đó, các giá trị ngưỡng khác nhau đã được thử để xác định được giá trị phù hợp nhất cho việc phân biệt và nhận diện nước khi sử dụng các chỉ số nêu trên. Bảng 2 thống kê các giá trị thích hợp nhất khi sử dụng chỉ số NDWI, MNDWI và WNDWI được xác định dựa trên phương pháp thử sai, trong khi kết quả phân biệt các khu vực có nước và không nước theo không gian trong vùng nghiên cứu được thể hiện như trên Hình 8. Các kết quả phân biệt, nhận biết và giải đoán từ ảnh Sentinel-2 cho thể hiện rất tốt các khu vực có nước và không nước trong vùng nghiên cứu. Trong ba chỉ số đã sử dụng trong nghiên cứu này, chỉ số WNDWI và MNDWI thì phù hợp hơn cho việc nhận biết và phân biệt các khu vực có nước và không nước, với giá trị của $OA>0.98$, $KC>0.84$, $EC=0.014$, $EO=0.006$.

Bảng 2: Giá trị của bốn chỉ tiêu sai số khi sử dụng các chỉ số phân biệt nước khác nhau

Chỉ số	Hệ số		OA	KC	EC	EO
	α	Giá trị ngưỡng				
WNDWI	0.5	-0.11	0.9808	0.848	0.0146	0.0061
NDWI	0.0	-0.18	0.9779	0.816	0.0185	0.0050
MNDWI	1.0	0.15	0.9804	0.844	0.0140	0.0069



Hình 8: Kết quả phân biệt nước trong khu vực nghiên cứu khi sử dụng giá trị thích hợp cho từng chỉ số phân biệt nước

Lưu ý rằng trong các diện tích bãi ngập của khu vực nghiên cứu, các kết quả giải đoán các khu vực có nước và không nước có thể vẫn thiên lớn hoặc thiên nhỏ cho dù sử dụng các giá trị tối ưu cho các chỉ số NDWI hoặc MNDWI. Nguyên nhân xảy ra hiện tượng này là do sự tồn tại các thành phần nhà, thảm phủ thực vật, đường xá, và đô thị hóa trong các diện tích bãi ngập của vùng nghiên cứu. Mặt khác, liên quan đến thời gian xử lý và giải đoán các khu vực có nước và không nước trong vùng nghiên cứu từ ảnh Sentinel-2 trên nền GEE, thời gian xử lý, giải đoán và chiết xuất kết quả nhỏ hơn 10 giây, bởi

TÀI LIỆU THAM KHẢO

vì toàn bộ quá trình tiền xử lý, xử lý và chiết xuất kết quả được thực hiện trên hệ thống siêu máy tính và song song của Google. Do đó, việc nhận diện, phân biệt và xác định các khu vực có nước và không nước không mất nhiều thời gian, và hoàn toàn có thể được thực hiện cho các vùng nghiên cứu khác.

4. KẾT LUẬN

Ba chỉ số NDWI, MNDWI, và WNDWI đã được sử dụng để phân biệt và nhận biết các khu vực có nước và không nước của thành phố Sa Đéc, tỉnh Đồng Tháp. Quá trình xử lý và giải đoán được thực hiện trên nền điện toán đám mây GEE, thể hiện rằng một sự cải tiến rất lớn về thời gian xử lý và giải đoán ảnh Sentinel-2 cho khu vực nghiên cứu. Đồng thời, trong ba chỉ số mà nghiên cứu đã lựa chọn thì chỉ số WNDWI và MNDWI cho kết quả phân biệt và nhận diện các khu vực có nước và không nước trong vùng nghiên cứu tốt hơn chỉ số NDWI, với giá trị của OA lớn hơn 0.98 và hệ số KC lớn hơn 0.84 khi sử dụng các chỉ số này. Chỉ số WNDWI được xác định là chỉ số cho kết quả phân biệt và nhận diện các khu vực có nước và không nước tốt nhất, với giá trị của OA, KC, EC và EO lần lượt bằng 0.98, 0.85, 0.015 và 0.006.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 105.06-2017.320.

- [1]. Bart S., Nandin-Erdene T., Vollrath A., Reiche J. (2020). Mapping wetland characteristics using temporally dense Sentinel-1 and Sentinel-2 data: A case study in the St. Lucia wetlands, South Africa. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, 86, 102009.
- [2]. Douglas K.B., Gray J.M., Melaas E.K., Moon M., Eklundh L., Friedl M.A. (2020). Continental-scale land surface phenology from harmonized Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111685, 1-16.
- [3]. Bar, S., Parida, B.R., Chandra Pandey, A. (2020). Landsat-8 and Sentinel-2 based Forest fire burn area mapping using machine learning algorithms on GEE cloud platform over Uttarakhand, Western Himalaya. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100324>.
- [4]. Du Y, Zhang Y, Ling F, Wang Q, Li W, Li X (2016). Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing*, 8, 354.
- [5]. Xu H. (2006). Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 3025–3033.
- [6]. Gorelick N., Matt HanCher, Mike Dixon, Simon Ilyushchenko, David Thau, Rebecca Moore (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27.