

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ ĐỘ CHÍNH XÁC CỦA CÁC PHƯƠNG PHÁP NỘI SUY BỀ MẶT TRONG BIÊN TẬP DỮ LIỆU ĐO SÂU PHỤC VỤ THÀNH LẬP BẢN ĐỒ BIỂN

A STUDY ON THE ACCURACY ASSESSMENT OF SURFACE INTERPOLATION METHODS IN BATHYMETRIC DATA EDITING FOR SEAFLOOR TOPOGRAPHIC MAPPING

NGUYỄN QUANG HUY

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: huynq.ctl@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Các phương pháp tính toán nội suy có một vai trò quan trọng trong việc xây dựng mô hình số độ cao DEM (Digital Elevation Model), giúp cải thiện độ chính xác của dữ liệu phục vụ biên tập bản đồ địa hình đáy biển. Ảnh hưởng của các phương pháp nội suy đến độ chính xác của mô hình DEM phụ thuộc vào nhiều yếu tố như nguồn dữ liệu đầu vào, khu vực địa hình, vị trí các điểm khảo sát và một số yếu tố quan trọng khác. Nghiên cứu này đã tiến hành ứng dụng ba kỹ thuật nội suy IDW, Natural Neighbor và Kriging nhằm xây dựng bề mặt địa hình đáy biển tại một khu vực thực nghiệm có sự biến đổi nhiều về độ sâu, nhiều dạng địa hình phức tạp, từ đó tính toán và đánh giá độ chính xác của các kỹ thuật nội suy trong điều kiện địa hình cụ thể.

Từ khóa: Kỹ thuật nội suy không gian, hệ thống thông tin địa lý, mô hình số độ cao, bản đồ biển.

Abstract

Interpolation methods play an important role in building digital elevation models (DEM), helping to improve the accuracy of data for editing seabed topographic maps. The influence of interpolation methods on the accuracy of the DEM depends on many factors such as input data source, terrain area, location of survey points and a number of other important factors. This study applied three interpolation techniques IDW, Natural Neighbor and Kriging to build the seabed topographic surface in an experimental area with a lot of variation in depth values and many complex terrain types, thereby calculating and evaluating the accuracy of interpolation techniques in specific topographic condition.

Keywords: Spatial interpolation, GIS, DEM, seabed topography.

1. Đặt vấn đề

Mô hình số độ cao DEM (Digital Elevation Model) có vai trò ngày càng quan trọng trong các lĩnh vực trắc địa - bản đồ, khảo sát, đo đạc, và đã được ứng dụng vào rất nhiều mục đích khác nhau, trong đó có công tác biên tập dữ liệu độ sâu phục vụ thành lập các bản đồ địa hình dưới đáy biển. Giá trị điểm độ sâu sau khi đã được đo đạc bằng thiết bị đo sâu sẽ được xử lý, nội suy để xây dựng mô hình số độ cao DEM. Mô hình số độ cao DEM thực chất là bề mặt địa hình được mô hình hóa thông qua các điểm được phân bố đều hoặc không đều mà trong đó độ cao của các điểm này có thể được nội suy bằng các phương pháp khác nhau trên cơ sở các điểm gốc (điểm khảo sát) đã biết giá trị độ cao [1]. Độ chính xác của mô hình số độ cao DEM phụ thuộc rất nhiều vào độ chính xác của các điểm gốc, độ phức tạp của địa hình, mật độ và độ chính xác của các điểm nội suy,... mà trong đó, độ chính xác của các điểm nội suy trong bề mặt đóng vai trò rất quan trọng vì trong nhiều trường hợp, do mật độ điểm và phương pháp nội suy không phù hợp mà mô hình số độ cao sau khi xây dựng có thể bỏ qua một số đặc điểm bất thường của địa hình, khiến cho sản phẩm không đạt độ chính xác theo yêu cầu. Chính vì vậy, việc đánh giá và tối ưu các phương pháp nội suy là hết sức cần thiết, sẽ góp phần nâng cao độ chính xác của dữ liệu, giúp cho công tác biên tập bản đồ độ sâu đạt được hiệu quả, nhanh chóng, giảm thiểu thời gian và chi phí xử lý dữ liệu.

Nhằm nghiên cứu tính toán và đánh giá độ chính xác của các phương pháp nội suy bề mặt trong biên tập dữ liệu đo sâu phục vụ thành lập bản đồ biển, trong nghiên cứu này tác giả đã sử dụng phần mềm ArcGIS for Desktop phiên bản 10.8 của hãng Esri cùng các phương pháp nội suy IDW, Natural Neighbor và Kriging nhằm xây dựng bề mặt và từ đó đưa ra đánh giá độ chính xác của các phương pháp nội suy trong điều kiện địa hình cụ thể.

2. Các thuật toán nội suy bề mặt địa hình

2.1. Thuật toán nội suy IDW (Inverse Distance Weighting)

Thuật toán nội suy IDW, hay nội suy trọng số khoảng cách nghịch đảo là một trong những phương pháp nội suy được sử dụng phổ biến để nội suy giá trị của các điểm phân tán. Phương pháp IDW đưa ra giả định rằng những điểm ở gần nhau thì sẽ có xu hướng mang giá trị có mức độ “tương đồng” cao hơn là những điểm ở cách xa nhau. Để có thể nội suy giá trị cho các điểm chưa biết, IDW sẽ sử dụng các điểm đã được khảo sát xung quanh vị trí các điểm cần xác định giá trị. Những điểm nằm càng gần điểm cần tính giá trị thì càng ảnh hưởng nhiều đến giá trị tính toán nội suy, trong khi các điểm ở càng xa thì trọng số càng giảm. Thuật toán IDW là thuật toán nội suy khá đơn giản, được ứng dụng rất nhiều, đặc biệt là trong các công cụ phân tích, tính toán không gian của hệ thống GIS (Geographic Information System). Công thức tính toán giá trị nội suy tại một điểm chưa biết theo phương pháp IDW như sau [2]:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i \times \frac{1}{d^k}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d^k}} \quad (1)$$

Trong đó:

- Z : Là giá trị ước tính tại vị trí điểm cần tìm;
- Z_i : Giá trị thực tế của điểm thứ i ;
- d : Khoảng cách từ điểm cần tìm đến các điểm đã biết giá trị;
- k : Tham số thể hiện sự suy giảm trọng số do khoảng cách tăng.

Phương pháp nội suy IDW có một số ưu điểm chính như sau: (1) Đây là phương pháp nội suy đơn giản, nhanh chóng và dễ dàng thực hiện, (2) IDW giúp “đơn giản hóa” sự phức tạp của địa hình bằng việc sử dụng mô hình trọng số khoảng cách, (3) Nếu các điểm đã được khảo sát có mật độ đủ dày, phân bố đều trên bề mặt thì thuật toán IDW có thể được thực hiện một cách tối ưu.

2.2. Thuật toán nội suy Natural Neighbor

Natural Neighbor là kỹ thuật nội suy bề mặt không gian được phát triển bởi R. Sibson (1981). Thuật toán nội suy này dựa trên lưới Voronoi của một tập hợp các điểm không gian được phân bố rời rạc. Công thức xác định giá trị ước tính theo phương pháp Natural Neighbor được thể hiện bằng công thức sau [3]:

$$G(x) = \sum_{i=1}^n W_i(x) f(x_i) \quad (2)$$

Trong đó: $G(x)$ là giá trị ước tính tại vị trí x , W_i là

các giá trị trọng số và $f(x_i)$ là giá trị đã biết tại điểm x_i .

Các giá trị trọng số W_i được tính toán như sau:

$$W_i(x) = \frac{A(x_i)}{A(x)} \quad (3)$$

2.3. Thuật toán nội suy Kriging

Phương pháp nội suy không gian Kriging sẽ tính toán ước tính giá trị cho các điểm phân tán quanh một điểm đã biết. Những điểm nằm ở gần vị trí điểm gốc (điểm đã biết giá trị) sẽ chịu ảnh hưởng nhiều hơn là điểm nằm ở vị trí xa. Thuật toán Kriging sử dụng một hàm toán học cho tất cả các điểm hoặc các điểm nằm trong 1 vùng bán kính nhất định, để tính toán giá trị đầu ra cần tìm cho mỗi vị trí. Quy trình thực hiện phương pháp nội suy Kriging gồm nhiều bước như: Thống kê dữ liệu, mô hình hóa variogram, xây dựng bề mặt. Phương pháp Kriging được thực hiện theo công thức tính toán giá trị cần nội suy như sau [4]:

$$T^* - \mu = \sum_{i=1}^n W_i (g_i - \mu_i) \quad (4)$$

Trong đó:

- T^* : Giá trị ước tính của điểm cần tìm;
- μ : Trị số trung bình;
- W : Trọng số phụ thuộc vào yếu tố vị trí của các điểm dữ liệu;
- g_i : Giá trị thực tế của những điểm khác;
- n : Số lượng điểm dữ liệu gốc được dùng để ước tính nội suy giá trị T .

Thuật toán nội suy Kriging có một số ưu điểm chính như sau: Giá trị ước tính của các điểm tính toán không chỉ phụ thuộc vào yếu tố khoảng cách mà còn chịu ảnh hưởng của sự phân bố trong không gian của tập điểm, điều này giúp cho việc ước tính giá trị nội suy của các điểm sẽ có tính tương quan không gian nhiều hơn các phương pháp khác. Tuy nhiên, phương pháp nội suy Kriging lại khá phức tạp, cần nhiều thời gian để mô hình hóa, tính toán cũng như yêu cầu nhiều dữ liệu điểm đầu vào.

3. Phương pháp đánh giá độ chính xác của các kỹ thuật nội suy

Trong nghiên cứu này, cao độ đáy biển (Z) được xác định bằng các kỹ thuật nội suy bề mặt sẽ được so sánh với các giá trị tại mỗi điểm kiểm tra ngẫu nhiên được đo đạc thực tế ngoài thực địa bằng các thiết bị đo sâu hồi âm chuyên dụng. Các tham số nhằm đánh giá độ chính xác của các kỹ thuật nội suy bề mặt gồm [5]:

+ Sai số trung phương tương đối (RMSE - Root Mean Square Error):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (Z_k - \bar{z}_k)^2}{n}} \quad (5)$$

+ Giá trị sai số tuyệt đối trung bình (MAE - Mean Absolute Error):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (|Z_k - \bar{z}_k|) \quad (6)$$

+ Hệ số R^2 thể hiện sự tương quan giữa 2 tập dữ liệu:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (Z_k - \bar{z}_k)^2}{\sum_{k=1}^n (Z_k - \bar{z})^2} \quad (7)$$

Trong đó: Z_k là giá trị cao độ đáy của điểm thứ k được nội suy từ bề mặt DEM, $\bar{z}_k$ là giá trị cao độ đáy thực tế của điểm thứ k , $\bar{z}$: Giá trị trung bình của những điểm cao độ đáy thực tế, n là số lượng điểm kiểm tra.

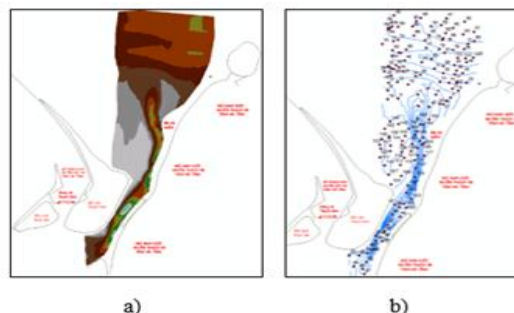
Bên cạnh các tham số tính toán, bài báo cũng sử dụng phương pháp khớp đường đẳng sâu cũng như xếp chồng mô hình DEM dạng 3D giữa các dữ liệu độ sâu được nội suy bằng 3 phương pháp IDW, Natural Neighbor và Kriging với tập dữ liệu độ sâu gốc nhằm đánh giá, kiểm tra lỗi đường đẳng sâu và cao độ trong toàn vùng khảo sát.

4. Thực nghiệm và kết quả

4.1. Nguồn dữ liệu thực nghiệm

Dữ liệu thực nghiệm sử dụng để tính toán, phân tích trong bài báo là dữ liệu đo sâu khảo sát phục vụ dự án nạo vét nạo vét luồng đảm bảo giao thông bãi cạn tuyến sông Nghèn (Km 00+000 - Km 03+500), khu vực Cửa Sót tại huyện Thạch Hà, tỉnh Hà Tĩnh. Khu vực này địa hình đáy biển có nhiều chỗ biến đổi phức tạp, tại vùng cửa biển, đáy biển khá bằng phẳng tuy nhiên khi luồng vào sâu bên trong thì xuất hiện nhiều bãi cạn với sự thay đổi nhiều về cao độ của các điểm độ sâu. Dữ liệu độ sâu thực nghiệm được thu thập bằng máy đo sâu hồi âm đơn chùm tia 1 tần số Hydrotrac II của hãng Teledyne Odom, Mỹ có độ chính xác đo sâu là $1\text{cm} \pm 0,1\%$ giá trị độ sâu (sau khi đã hiệu chỉnh vận tốc âm) khi sử dụng sóng âm có tần số 200kHz. Bài báo ứng dụng module phần mềm ArcGIS for Desktop phiên bản 10.8 để phân tích dữ liệu [6], xây dựng bề mặt DEM nội suy từ dữ liệu độ sâu. Số lượng điểm kiểm tra là 150 điểm được phân bố đều tại các khu vực địa hình đáy biển bằng phẳng cũng như những vị trí có sự biến đổi nhiều về giá trị cao độ, các bãi cạn, bãi đá ngầm,... 150 điểm độ sâu kiểm tra này được khảo sát và xử lý bằng máy đo sâu hồi âm đơn chùm tia 1 tần số Hydrotrac II có độ chính xác đo sâu là $1\text{cm} \pm 0,1\%$ giá trị độ sâu với sóng âm

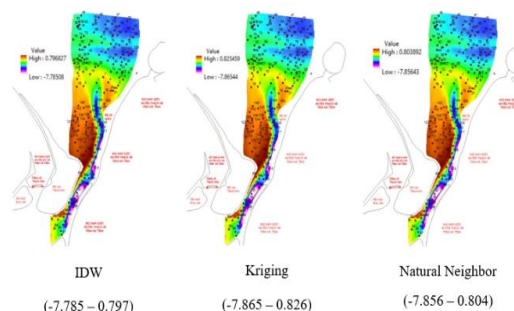
có tần số 200kHz kết hợp với phần mềm dẫn đường và xử lý số liệu đo sâu Hydropro.



Hình 1. a) Dữ liệu độ sâu tại khu vực Cửa Sót, Hà Tĩnh
b) 150 điểm kiểm tra được khảo sát đo sâu ngoài thực địa

4.2. Kết quả phân tích dữ liệu

Từ tập dữ liệu điểm độ sâu tại khu vực tuyến sông Nghèn - Cửa Sót, sử dụng module phần mềm ArcGIS for Desktop để tiến hành nội suy bề mặt đáy biển DEM bằng 3 phương pháp IDW, Kriging, Natural Neighbor. Mô hình số bề mặt đáy biển được tạo bởi 3 phương pháp nội suy được thể hiện như Hình 2. Kết quả của việc xây dựng mô hình số độ cao DEM cho thấy, thuật toán Kriging cho kết quả nội suy với phạm vi dữ liệu lớn hơn so với 2 phương pháp còn lại (-7,865 - 0,826). Khi quan sát bằng mắt thường cơ bản không có nhiều sự sai lệch về dữ liệu giữa 3 kỹ thuật nội suy.



Hình 2. Mô hình DEM bề mặt đáy biển được xây dựng bằng 3 kỹ thuật nội suy

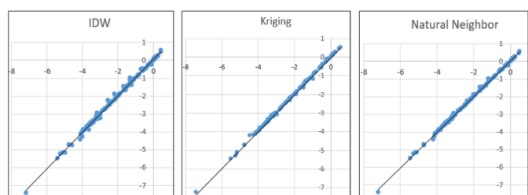
Để kiểm tra, đánh giá tính chính xác của các phương pháp nội suy, sử dụng công cụ phân tích trong ArcGIS trích xuất các giá trị cao độ của mô hình DEM cho 150 điểm kiểm tra, tính toán các sai số theo công thức (5), (6) và (7), sau đó biểu thị tập hợp các điểm kiểm tra này trên biểu đồ phân tán tập dữ liệu, các kết quả tính toán được thể hiện ở Bảng 1 và Hình 3, 4 [7].

Từ các giá trị tham số RMSE (m), MEA (m) và R^2 đã được tính toán trong Bảng 3 cho thấy, phương pháp nội suy Kriging cho kết quả có độ chính xác cao nhất,

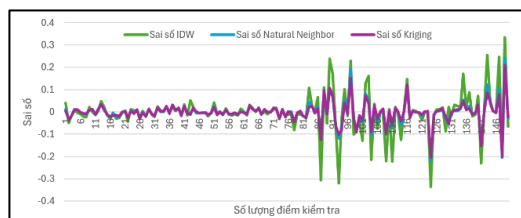
tiếp theo là phương pháp nội suy Natural Neighbor và cuối cùng là IDW. Hình 4 phản ánh đường cong giá trị sai số của 3 phương pháp nội suy cũng cho kết quả tương tự khi kỹ thuật nội suy Kriging có sai số là nhỏ nhất, tiếp theo là phương pháp Natural Neighbor và cuối cùng là phương pháp IDW cho biên độ sai số là lớn nhất.

Bảng 1. Các giá trị tham số đánh giá mức độ chính xác của 3 kỹ thuật nội suy bề mặt

Thuật toán nội suy	MAE (m)	RMSE (m)	R ²
IDW	0.0493	0.089	0.9965
Kriging	0.0271	0.048	0.99903
Natural Neighbor	0.0286	0.051	0.9988



Hình 3. Biểu đồ thể hiện sự phân tán của tập dữ liệu nội suy bởi 3 phương pháp IDW, Kriging, Natural Neighbor (trục OX: giá trị cao độ điểm kiểm tra, trục OY: giá trị cao độ điểm nội suy)

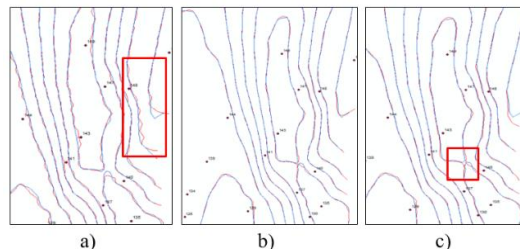


Hình 4. Biểu đồ thể hiện đường cong sai số của 3 phương pháp nội suy

Bên cạnh việc sử dụng các tham số đánh giá sai số, tác giả cũng sử dụng phương pháp “khớp” đường đẳng sâu để đánh giá mức độ chính xác của các bề mặt sau nội suy. Đường đẳng sâu của tập dữ liệu độ sâu gốc được biểu thị bằng đường màu xanh, còn các đường đẳng sâu được xây dựng từ bề mặt DEM được nội suy bằng 3 phương pháp IDW, Kriging và Natural Neighbor sẽ được biểu thị bằng màu đỏ. Tiến hành sử dụng công cụ lần lượt xếp chồng 2 dữ liệu đường đẳng sâu để so sánh ta được kết quả như ở Hình 5 [8].

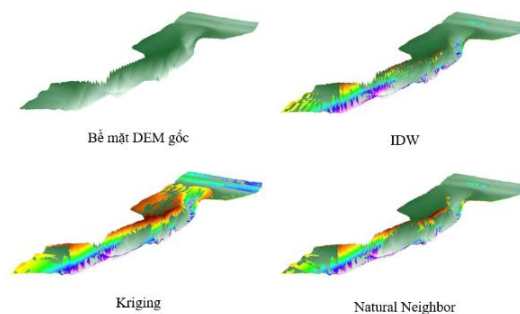
Từ kết quả ở Hình 5 cho thấy đường đẳng sâu được xây dựng từ bề mặt DEM nội suy bằng phương pháp Kriging là khớp nhất so với đường đẳng sâu gốc đồng thời cũng ít sai số hơn so với 2 phương pháp còn lại. Phương pháp IDW cho kết quả kém chính xác nhất

khi các đường đẳng sâu có sự sai lệch nhiều so với đường đẳng sâu gốc, các đường cong cũng bị gấp khúc, không cong tròn như 2 phương pháp nội suy Kriging và Natural Neighbor.



Hình 5. So sánh đường đẳng sâu gốc (màu xanh) và các đường đẳng sâu từ bề mặt địa hình được nội suy bằng 3 phương pháp a) IDW, b) Kriging, c) Natural Neighbor (màu đỏ)

Hình 6 thể hiện sự so sánh một cách trực quan hóa mô hình 3D của bề mặt DEM được tạo bởi các thuật toán nội suy khác nhau so với bề mặt DEM tham chiếu của dữ liệu gốc. Bề mặt DEM tham chiếu dữ liệu gốc có màu xanh xám trong khi bề mặt DEM nội suy được thể hiện bằng các dải màu sắc khác nhau theo độ sâu. Bằng việc xếp chồng các bề mặt 3D [8], có thể thấy mô hình DEM được tạo bởi kỹ thuật nội suy Kriging có sự tương đồng, phù hợp nhất với mô hình DEM tham chiếu dữ liệu gốc. Trong khi 2 phương pháp IDW và Natural Neighbor đều có độ lệch và sai số lớn khi so sánh với mô hình DEM tham chiếu.



Hình 6. Xếp chồng bề mặt DEM 3D của 3 phương pháp nội suy so với bề mặt 3D gốc

4. Kết luận

Các kỹ thuật nội suy không gian có một vai trò quan trọng trong việc tạo mô hình số DEM với độ chính xác cao. Độ chính xác của mô hình số độ cao DEM phụ thuộc rất nhiều vào độ chính xác của các điểm gốc, sự phân bố của tập dữ liệu, độ phức tạp của bề mặt địa hình, mật độ và độ chính xác của các điểm nội suy. Nghiên cứu này tập trung vào việc kiểm tra độ chính xác của 3 phương pháp nội suy phổ biến gồm

có IDW, Kriging và Natural Neighbor tại khu vực ven biển có địa hình phức tạp, nhiều bãi cạn, đá ngầm, dữ liệu độ sâu có nhiều sự biến đổi. Qua việc sử dụng các phương pháp đánh giá độ chính xác bằng các sai số cho thấy thuật toán nội suy Kriging cho kết quả tốt nhất với các giá trị sai số RMSE (m), MAE (m) và R^2 là nhỏ nhất, các điểm nội suy cũng ít có sự sai lệch so với các điểm kiểm tra, đường đẳng sâu và bề mặt 3D DEM cũng có sự tương đồng nhất đối với đường đẳng sâu và bề mặt DEM gốc. Phương pháp Natural Neighbor cho kết quả có độ chính xác tốt thứ 2 và phương pháp IDW cho giá trị nội suy có độ chính xác thấp nhất.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, tác giả sẽ tiếp tục tính toán đánh giá độ chính xác của các thuật toán nội suy xây dựng mô hình DEM phục vụ việc biên tập bình đồ độ sâu tại một số khu vực biển, luồng hàng hải có những đặc điểm về địa hình khác nhau, để từ đó có thể đưa ra được đánh giá tổng quan nhất về việc lựa chọn kỹ thuật nội suy phù hợp cho từng điều kiện địa hình cụ thể.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT24-25.81**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] E.J. Englund, D. Wener (1992), *Comperative evaluation of some spatial interpolations*, Mathematical Geology, Vol.24, pp.381-391.
- [2] D.F. Watson (1985), *A refinement of IDW interpolation*, Geoprocessing, Vol 2, pp.316-327.
- [3] Silson R. (1981), *A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation*, Interpolating M. Data, pp.21-35.
- [4] Jari. P, Tarmo. L, Jari. T, (2009), *Creating High-resolution DEM, Using Spline Interpolation method and M. Carlo Simulation*, Wortking Report, Vol.56.
- [5] Q. Tan, X. Xu, (2014), *Analysis & Comperison of Six Spatial Interpolation Methods*, Sensors and Transducers, Vol.65, pp.155-164.
- [6] Using ArcGIS.10 - Spatial Analyst.
- [7] P.Q. Yen, N.T.T. Nga, T.T. Hanh (2019), *Nghiên cứu, thực nghiệm so sánh các phương pháp mô hình hóa địa hình*, Tạp chí Khoa học: VNU, Số thứ 35, tr.68-79.
- [8] B. Aivazi & K.Czimer, (2019), *A comperative analysis of different four DEM interpolation methods in GIS*, Geodesy & Cartographies, Vol.45, No1, pp.42-48.

Ngày nhận bài:	25/03/2025
Ngày nhận bản sửa:	13/04/2025
Ngày duyệt đăng:	13/04/2025