



Phân tích sự biến động các chỉ số sinh thái - môi trường sử dụng ảnh viễn thám Sentinel-2 phục vụ đánh giá nguy cơ xảy ra tai biến

Đào Minh Nhật^a, Phan Thị Mai Hoa^b, Nguyễn Quốc Phi^{b*}

^aLiên đoàn Địa chất Tây Bắc, Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam

^bKhoa Môi trường, Trường Đại học Mỏ-Địa chất, Việt Nam

***Tác giả liên hệ:**

Họ và tên: Nguyễn Quốc Phi

Điện thoại: (+84) 123-456-789

Email: nguyenquocphi@humg.edu.vn

Tóm tắt

Nghiên cứu này nhằm phân tích sự biến động thảm thực vật qua thời gian để hỗ trợ đánh giá nguy cơ tai biến bằng cách sử dụng dữ liệu ảnh viễn thám Sentinel-2. Phương pháp được áp dụng bao gồm xử lý ảnh Sentinel-2 nhiều thời điểm (2020–2025) bằng các công cụ GIS viễn thám: loại bỏ mây, hiệu chỉnh khí quyển và tính toán chỉ số NDVI, sau đó phân tích xu hướng biến đổi của NDVI và phân loại rủi ro tai biến. Kết quả chính cho thấy thảm thực vật có những thay đổi đáng kể theo không gian và thời gian. Ví dụ, giá trị NDVI giảm rõ rệt ở một số khu vực ven sông và vùng đất trống, tương ứng với khu vực có nguy cơ tai biến cao hơn. Các bản đồ phân vùng rủi ro tai biến được xây dựng dựa trên mức độ giảm NDVI: khu vực giảm mạnh được đánh giá là có nguy cơ cao. Kết luận của nghiên cứu khẳng định ảnh Sentinel-2 là nguồn dữ liệu hiệu quả để giám sát sức khỏe thảm thực vật; việc phân tích xu hướng NDVI từ ảnh Sentinel-2 giúp cung cấp cơ sở khoa học trong việc dự báo và quản lý nguy cơ tai biến môi trường.

Từ khóa: *thảm thực vật, Sentinel-2, chỉ số NDVI, đánh giá rủi ro, viễn thám.*



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

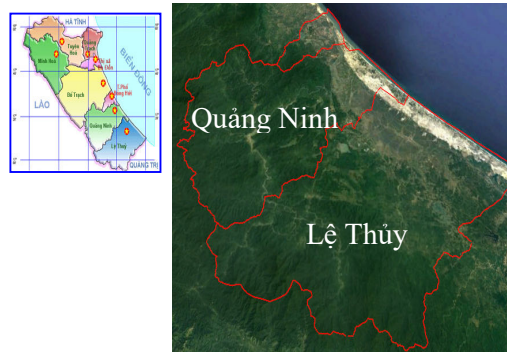
Thảm thực vật có vai trò ổn định đất đai và điều hòa chế độ nước trong đất; do đó, sự thay đổi che phủ cây xanh có thể là chỉ báo tiên tri cho các tai biến địa môi trường như sạt lở đất và lũ bùn đá (Chen et al., 2021; Petley, 2012). Khi thảm thực vật suy giảm, lớp phủ gốc cây giảm sức bám giữ đất, gia tăng xói mòn bề mặt và khả năng xói chân taluy (Chen et al., 2021; Zhang et al., 2023). Ảnh vệ tinh Sentinel-2 cung cấp dữ liệu phổ đa dải với độ phân giải không gian 10m, phù hợp để theo dõi chi tiết mật độ thực vật và độ ẩm đất theo thời gian. Các chỉ số thảm thực vật phổ biến như NDVI, NDMI, SAVI, FVC và BSI cho phép định lượng trực quan sự chuyển biến của độ che phủ và độ ẩm bề mặt (Rouse et al., 1974; Jensen, 2007). Nghiên cứu tập trung vào hai mốc ảnh năm 2020 và 2025 nhằm phân tích xu hướng biến động thảm thực vật trong khoảng thời gian 5 năm, từ đó phục vụ đánh giá nguy cơ tai biến liên quan. Theo đó, mục tiêu là xây dựng bản đồ chỉ số thảm thực vật cho từng thời điểm, tính toán sự thay đổi, và phân tích mối tương quan với các khu vực có tiềm năng xảy ra tai biến, làm cơ sở đề xuất giải pháp quản lý rủi ro phù hợp (Jensen, 2007;

Zhao et al., 2024)..

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu bao gồm hai huyện Quảng Ninh và Lệ Thủy (tỉnh Quảng Trị) với tổng diện tích khoảng 2.706 km² (hình 1), có địa hình chuyển tiếp từ vùng núi Trường Sơn xuống đồng bằng ven biển. Đặc trưng núi thấp xen đồi tạo nên các sườn dốc lớn, thung lũng hẹp và đa dạng hướng phơi sườn. Khí hậu mang tính nhiệt đới gió mùa, lượng mưa trung bình năm khoảng 2.000-2.500mm và tập trung chủ yếu vào các tháng 9-11, trùng với thời kỳ bão lũ. Về địa chất, khu vực đồi núi chủ yếu là đá granit và đá biến chất bị phong hóa mạnh, hình thành lớp vỏ phong hóa dày, một điều kiện thuận lợi cho quá trình trượt lở phát triển khi gặp mưa lớn kéo dài và bão hòa nước.



Hình 1: Khu vực nghiên cứu

2.2. Dữ liệu

Dữ liệu chính gồm ảnh Sentinel-2 (Level-2A) của hai ngày 05/05/2020 và 25/03/2025 (độ phân giải 10m). Bước xử lý ban đầu bao gồm biên tập ảnh, đính không ảnh bằng dữ liệu GCPs, và hiệu chỉnh khí quyển (ATCOR hoặc Sen2Cor) để thu được giá trị phản xạ bề mặt (Smith, 2025; Jensen, 2007). Các lớp bản đồ khác có thể gồm DEM 10m để xác định địa hình nền, và hiện trạng trượt lở đất (hình 2).



Hình 2: Các điểm giải đoán trượt lở

2.3. Trích xuất và ý nghĩa các chỉ số thảm thực vật

ừ ảnh Sentinel-2, các chỉ số truyền thống được tính toán trên mỗi pixel bằng công thức chuẩn. Cụ thể, chỉ số thực vật chuẩn hóa NDVI thể hiện mức độ “xanh” của thảm thực vật được xác định theo công thức:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (1)$$

Trong đó NIR và R lần lượt là phản xạ ở dải gần hồng ngoại (band 8) và đỏ (band 4) của Sentinel-2. NDVI có giá trị từ -1 đến $+1$, giá trị cao (gần $+1$) phản ánh lớp cây xanh dày đặc, ngược lại giá trị thấp (gần 0 hoặc âm) cho thấy đất trống hoặc độ phủ thực vật thấp (Rouse et al., 1974; Tucker, 1979). Chỉ số này được dùng phổ biến để giám sát sức khỏe sinh trưởng cây trồng và thay đổi thảm thực vật theo mùa. Ở những khu vực nghiên cứu, NDVI cao thường thấy ở rừng núi phía tây với lượng mưa dồi dào, trong khi đồng bằng ven biển có NDVI thấp hơn do đất trống hoặc cây bụi thưa thớt (Smith, 2025; Zhao et al., 2024).

Chỉ số độ ẩm thực vật NDMI (Normalized Difference Moisture Index) đặc biệt nhạy với mức độ ẩm của cây cối và đất, được tính theo công thức:

$$NDMI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \quad (2)$$

Với $SWIR$ là phản xạ ở dải sóng cận hồng ngoại sóng ngắn (SWIR, band 11 hoặc 12). NDMI giảm khi cây và đất thiếu nước, biểu hiện độ ẩm bề mặt thấp (Gao, 1996; Xu, 2006). Khi nền thực vật bão hòa nước (sau mưa lớn), NDMI có xu hướng tăng



lên. Ở vùng khảo sát, các thung lũng và khu vực tích nước thường có NDMI cao hơn, trong khi các sườn dốc đứng, thoát nước nhanh có NDMI thấp hơn (Xu, 2006; Lee et al., 2025).

Chỉ số đất trống BSI (Bare Soil Index) được thiết kế để làm nổi bật bề mặt đất trống chưa che phủ thực vật, kết hợp các dải B (xanh dương), R (đỏ), NIR và SWIR. Công thức BSI thường được dùng là:

$$BSI = \frac{(\rho_{SWIR} + \rho_R) - (\rho_{NIR} + \rho_B)}{(\rho_{SWIR} + \rho_R) + (\rho_{NIR} + \rho_B)} \quad (3)$$

Chỉ số BSI tăng khi độ che phủ thực vật giảm và mặt đất lộ thiên (Lillesand & Kiefer, 2015; Jensen, 2007). Vùng đất trống do mất cây (như khu vực vừa xảy ra trượt taluy hoặc khai hoang) thường có giá trị BSI cao, ngược lại những nơi rừng nguyên sinh thì BSI thấp. Do đó, BSI giúp phân biệt rõ khu vực suy thoái thảm thực vật.

SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) là biến thể của NDVI được điều chỉnh để giảm ảnh hưởng của nền đất sáng khi che phủ thưa (Huete, 1988). Công thức SAVI là:

$$SAVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)(1 + L)}{\rho_{NIR} + \rho_R + L} \quad (4)$$

Trong đó L là hệ số hiệu chỉnh (thường lấy 0.5 khi độ che phủ thực vật trung bình).

SAVI cho độ nhạy với thảm thực vật tương đương NDVI ở khu vực cây dày nhưng ổn định hơn khi có nhiều đất trống. Chỉ số này hữu ích khi đánh giá thảm thực vật ở sườn độ dốc lớn, nơi xen kẽ đồi trọc và rừng rải rác.

Chỉ số bao phủ thực vật FVC (Fractional Vegetation Cover) biểu thị tỷ lệ diện tích mặt chiếm bởi cây xanh trên mỗi pixel. Một cách đơn giản để tính FVC là sử dụng mô hình hai thành phần dựa trên NDVI:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (5)$$

Trong đó $NDVI_{soil}$ và $NDVI_{veg}$ lần lượt là giá trị NDVI tham chiếu của đất trống và lớp phủ cây xanh đầy đủ. Tại khu vực nghiên cứu, sử dụng $NDVI_{soil} = 0.15$ và $NDVI_{veg} = 0.80$ (Zhao et al., 2024). FVC dao động từ 0–1, giá trị gần 1 tương ứng thảm thực vật dày đặc. Theo Zhao et al. (2024), FVC là chỉ số quan trọng để đánh giá tổng lượng sinh khối và mật độ lá, hữu ích trong theo dõi xu thế thay đổi che phủ cây (Zhao et al., 2024; Jensen, 2007).

Các bước xử lý tiếp theo bao gồm tái dựng lưới: tất cả bản đồ chỉ số (NDVI, NDMI, SAVI, FVC, BSI) được nội suy từ độ phân giải gốc 10m lên 30m để khớp với các lớp dữ liệu khác (DEM, LULC) phục vụ phân



tích liên kết không gian. Phương pháp nội suy song tuyến (bilinear) áp dụng cho các bản đồ liên tục như trên nhằm giữ đẳng hướng, đảm bảo tính mượt mà. Kết quả là bộ dữ liệu đa nhóm chỉ số thảm thực vật cho hai thời điểm 2020 và 2025 sẵn sàng cho việc phân tích sự biến động và lập bản đồ khu vực có nguy cơ tai biến.

3. KẾT QUẢ

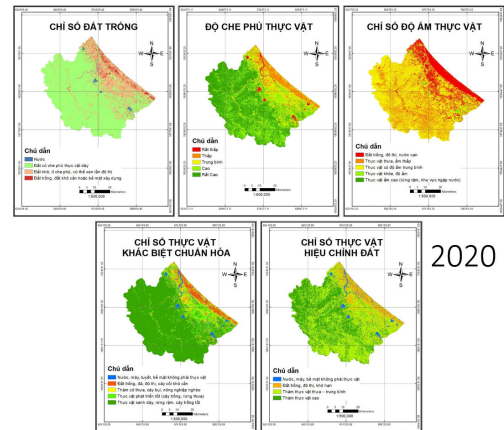
3.1. Hiện trạng năm 2020

Bản đồ các chỉ số viễn thám năm 2020 cho thấy sự tương phản rõ rệt theo địa hình (hình 3):

Khu vực phía Tây (núi và trung du): Thể hiện bằng các gam màu xanh lá cây trên hầu hết các chỉ số (NDVI, SAVI, FVC cao; BSI thấp), phản ánh thảm thực vật dày đặc, che phủ tốt. Chỉ số độ ẩm (NDMI) chủ yếu ở mức trung bình. Đây là yếu tố quan trọng giúp ổn định sườn dốc, giảm xói mòn.

Khu vực phía Đông (ven biển, ven sông): Thể hiện bằng các gam màu vàng, cam, đỏ (NDVI, SAVI, FVC thấp; BSI, NDMI cao), tương ứng với thảm thực vật thưa thớt, đất trống, đất canh tác hoặc đô thị hóa. Các khu vực này có độ ẩm bề mặt thấp, phản ánh tác

động mạnh của hoạt động nhân sinh và điều kiện sinh thái khắc nghiệt, làm tăng tính dễ bị tổn thương của sườn dốc.



Hình 3. Bản đồ các chỉ số năm 2020

3.2. Hiện trạng năm 2025

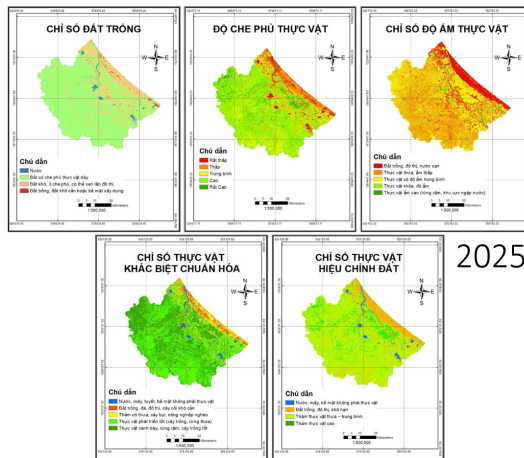
Bản đồ năm 2025 về cơ bản vẫn bảo lưu cấu trúc phân bố theo địa hình của năm 2020 (hình 4). Tuy nhiên, xuất hiện một số xu hướng đáng chú ý:

Xu hướng suy giảm cục bộ: Các khu vực có giá trị chỉ số thấp (màu vàng, cam, đỏ) thể hiện thảm thực vật nghèo, đất trống hoặc khô hạn (thể hiện trên NDVI, SAVI, FVC, BSI, NDMI) có xu hướng mở rộng, đậm hơn và phân mảnh hơn, đặc biệt xung quanh các khu vực ven biển, cụm dân cư và dọc theo các trục giao thông.

Nguyên nhân tiềm ẩn: Xu hướng này gợi ý quá trình suy giảm chất lượng lớp

phủ và độ ẩm do áp lực đô thị hóa gia tăng, chuyển đổi mục đích sử dụng đất thiếu bền vững, hoặc ảnh hưởng tích lũy của thời tiết cực đoan.

Khu vực ổn định: Phần lớn diện tích khu vực miền núi phía Tây vẫn duy trì các chỉ số tích cực (màu xanh), khẳng định vai trò phòng hộ bền vững của hệ sinh thái rừng



Hình 4. Bản đồ các chỉ số năm 2025

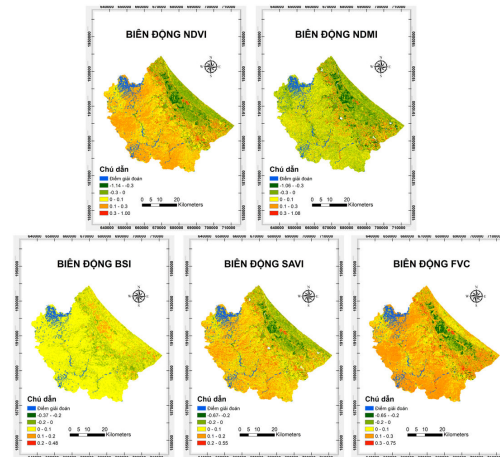
3.3. Nhận xét biến động 2020 – 2025

Việc xây dựng bản đồ biến động dựa trên phép tính:

$$\Delta \text{Chỉ số} = \text{Chỉ số 2020} - \text{Chỉ số 2025}$$

Cho phép trực quan hóa xu hướng thay đổi theo thời gian. Theo đó, các giá trị Δ dương (thể hiện bằng thang màu từ vàng đến đỏ) cho thấy sự suy giảm của chỉ số vào năm 2025 so với năm 2020. Ngược lại, giá trị Δ âm (thể hiện bằng

màu xanh) phản ánh xu hướng được cải thiện (hình 5).



Hình 5. Bản đồ biến động các chỉ số

Phương pháp hiệu số hai thời điểm này là công cụ hữu hiệu, giúp nhận diện nhanh các xu hướng suy thoái hay phục hồi của thảm thực vật và độ ẩm bề mặt, đồng thời làm nổi bật các "điểm nóng", những khu vực có biến động dị thường mạnh so với xu thế chung của vùng. Tuy nhiên, việc diễn giải kết quả cần hết sức thận trọng, xem xét đến ảnh hưởng của các yếu tố như mùa vụ thực vật, lượng mưa tích lũy trước khi chụp ảnh, hiện tượng mây, bóng mây và hiệu ứng địa hình. Sự khác biệt về các điều kiện này giữa hai thời điểm có thể tạo ra tín hiệu biến động "giả", không phản ánh đúng xu thế dài hạn nếu dữ liệu



không được chuẩn hóa về cùng điều kiện mùa vụ và khí quyển.

Phân tích nhóm chỉ số thực vật, bao gồm NDVI, SAVI và FVC, cho thấy một cấu trúc biến động rất nhất quán và có tính đồng quy cao. Trên cả ba bản đồ, các vùng có giá trị Δ dương từ trung bình đến khá (phổ biến trong khoảng 0.1–0.3) chiếm ưu thế trên diện rộng, khẳng định xu thế suy giảm về độ xanh, sức sống và mức độ che phủ của thảm thực vật trong giai đoạn 2020–2025 trên phần lớn khu vực nghiên cứu. Song song đó, vẫn xuất hiện những dải hoặc vùng có giá trị Δ âm phân bố thành mảng, phản ánh xu hướng phục hồi, tăng xanh cục bộ, có thể liên quan đến hoạt động trồng rừng, chu kỳ sinh trưởng cây lâu năm hoặc thay đổi trong quản lý sử dụng đất. Đáng chú ý, việc chỉ số SAVI (đã giảm thiểu ảnh hưởng của phong nền đất) cho xu thế tương đồng với NDVI là một dấu hiệu đáng tin cậy, củng cố nhận định rằng xu hướng suy giảm không chỉ là "nhiều" từ sự thay đổi độ sáng của đất trống, mà nhiều khả năng phản ánh biến động thực tế của thảm phủ hoặc tình trạng

sinh trưởng.

Bản đồ biến động của chỉ số độ ẩm NDMI lại thể hiện một bức tranh phức tạp hơn. Phần lớn diện tích có biến động rất nhỏ, xoay quanh giá trị 0 đến dương nhẹ, xen kẽ những dải hoặc đốm có giá trị âm rõ rệt tại một số khu vực. Δ NDMI âm cho thấy độ ẩm bề mặt/tán lá năm 2025 cao hơn năm 2020, trong khi Δ NDMI dương phản ánh xu hướng khô hạn hơn. Do NDMI rất nhạy với độ ẩm tức thời, đặc biệt sau các sự kiện mưa, nên các "dải ẩm tăng" có thể bắt nguồn từ thay đổi thủy văn-thảm phủ, nhưng cũng dễ bị chi phối bởi sự khác biệt về điều kiện thời tiết ngay trước thời điểm chụp ảnh. Vì vậy, việc diễn giải xu thế từ NDMI cần thận trọng, nên đối chiếu với dữ liệu mưa hoặc sử dụng ảnh đã được chuẩn hóa theo cùng một cửa sổ mùa để tăng cường ý nghĩa của xu thế dài hạn.

Trái ngược với nhóm chỉ số thực vật, bản đồ biến động của chỉ số đất trống BSI cho thấy biên độ thay đổi nhỏ hơn, với lớp giá trị gần 0 chiếm ưu thế. Điều này phản ánh mức độ thay đổi về tỷ lệ đất trống trên toàn vùng là không quá



cực đoan, chủ yếu mang tính cục bộ và ở mức nhẹ đến vừa. Một phát hiện quan trọng là: trong khi NDVI, SAVI và FVC đều chỉ ra xu thế suy giảm thảm phủ khá rộng, thì BSI lại chỉ ghi nhận biến động nhẹ. Sự khác biệt này hàm ý rằng quá trình suy giảm chủ yếu có thể đến từ việc giảm sức sống, mật độ tán lá hoặc thay đổi độ ẩm bề mặt, hơn là một sự chuyển đổi trực tiếp và trên diện rộng sang đất trống hoàn toàn. Điều này đặc biệt đúng trong bối cảnh các hệ sinh thái cây trồng theo mùa, trảng cỏ hoặc các khu vực có biến động độ ẩm đất lớn. Từ góc độ đánh giá tai biến địa môi trường, sự tích hợp các lớp bản đồ biến động cung cấp những chỉ dẫn quan trọng. Các khu vực đồng thời có Δ NDVI, Δ SAVI và Δ FVC dương cần được xác định là những "điểm nóng" suy giảm lớp phủ bảo vệ bề mặt. Những vùng này tiềm ẩn nguy cơ gia tăng dòng chảy mặt, xói mòn và giảm ổn định sườn dốc, đặc biệt khi chúng trùng với địa hình dốc, đất phong hóa dày hoặc mạng lưới sông suối dày đặc. Ngược lại, các vùng có Δ NDMI âm (âm tăng) cung cấp manh mối về điều kiện thuận

lợi cho quá trình bão hòa nước cục bộ trong đất. Sự gia tăng áp lực nước lỗ rỗng tại đây, khi kết hợp với các sự kiện mưa cực đoan, có thể trở thành cơ chế khởi phát chính cho các hiện tượng trượt lở. Như vậy, NDMI đóng vai trò như một mắt xích quan trọng, kết nối chuỗi cơ chế "mưa – độ ẩm đất – mất ổn định mái dốc". Sự tương thích giữa các vùng biến động nổi bật từ bản đồ với vị trí các điểm trượt lở thực tế chính là minh chứng cho tính thực tiễn và giá trị cảnh báo sớm của bộ chỉ số tích hợp này.

4. THẢO LUẬN

Trên cơ sở phân tích kết quả, có thể xếp hạng tầm quan trọng của năm chỉ số theo ảnh hưởng tới nguy cơ tai biến liên quan đến thảm thực vật. Nhóm chỉ số độ phủ cây (NDVI, FVC) cho thấy vai trò then chốt trong đánh giá sức khỏe lớp phủ sinh học; NDVI là thước đo cơ bản, trong khi FVC phản ánh tỷ lệ che phủ thực sự (Zhao et al., 2024; Rouse et al., 1974). Nhóm này có ảnh hưởng cao nhất, bởi ở các khu vực này, việc cây xanh suy giảm làm giảm khả năng giữ đất và hấp thụ nước, từ đó tăng nguy cơ sạt lở (Chen et al., 2021). Tiếp theo, chỉ số



NDMI thể hiện điều kiện ẩm ướt của thảm thực vật và đất mặt; NDMI thấp ở sườn đồi cảnh báo mất ẩm, dễ tạo điều kiện trượt lở khi mưa trở lại (Gao, 1996; Xu, 2006). Nhóm độ ẩm này đóng vai trò quan trọng như yếu tố kích hoạt, cụ thể là điều kiện bão hòa nước trong đất (Zhang et al., 2023).

Ở mức ảnh hưởng trung bình, chỉ số SAVI và các biến thể như MSAVI có tác dụng giảm sai số do nền đất; chúng phản ánh tương quan với NDVI ở các vùng cây thưa và do đó có ý nghĩa trong môi trường hỗn hợp (Huete, 1988; Lillesand & Kiefer, 2015). Những nơi có giá trị SAVI giảm cũng cho thấy khu vực suy thoái thực vật và đất trồng gia tăng. Chỉ số BSI có thể xếp vào nhóm ảnh hưởng thứ yếu nhưng đặc biệt hữu ích trong nhận diện chi tiết các điểm đất trống; BSI cao nếu lộ nhiều đất trống không có thực vật phủ sẽ chỉ ra các khe trống rỗng hoặc taluy mới bị khai phá (Lillesand & Kiefer, 2015; Jensen, 2007). Mặc dù BSI không phải nhân tố kiểm soát độc lập chính, nó bổ sung thông tin quan trọng về địa bàn tiếp nhận vật liệu trượt (đất tràn tại chân sườn).

Như vậy, nhóm chỉ số ảnh hưởng lớn gồm độ che phủ thực vật (NDVI, FVC) và độ ẩm (NDMI), nhóm vừa gồm SAVI, nhóm

nhỏ hơn là BSI. Các phát hiện này phù hợp với các kết quả trước đó cho rằng mật độ và độ che phủ thực vật là yếu tố then chốt trong mô hình nhảy cảm trượt lở (Pradhan & Youssef, 2010; Chen et al., 2021). Đặc biệt, sự gia tăng giá trị BSI đồng thời với giảm NDVI tại cùng vị trí cho thấy mối liên hệ trực tiếp giữa phá rừng (hoặc xói mòn) và trượt đất (Chen et al., 2021). Kết quả này khuyến nghị rằng các giải pháp phòng ngừa nên tập trung duy trì và phục hồi thảm thực vật ở những taluy dốc cao, đồng thời quan tâm cải thiện tiêu thoát nước mặt (giảm độ bão hòa sau mưa) ở các khu vực nhạy cảm (Zhang et al., 2023; Chen et al., 2021).

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã khẳng định giá trị của việc phân tích biến động thảm thực vật trong đánh giá rủi ro tai biến địa chất tại khu vực nghiên cứu. Bằng việc sử dụng ảnh viễn thám Sentinel-2 ở hai mốc thời gian, năm chỉ số (NDVI, NDMI, SAVI, FVC, BSI) đã được tính toán và phân tích, giúp định lượng các khía cạnh về độ che phủ và trạng thái ẩm của hệ sinh thái.

Kết quả phân tích cho thấy sự phân hóa rõ rệt theo không gian. Khu vực miền núi phía Tây thể hiện xu hướng biến động bất lợi rõ nét nhất với sự suy giảm đáng kể về



độ xanh và độ che phủ (thể hiện qua NDVI và FVC), kèm theo độ ẩm giảm (NDMI) và xu hướng lộ đất tăng (BSI). Những diễn biến này hàm ý một quá trình suy thoái thảm thực vật và gia tăng độ lộ thiên của bề mặt, trực tiếp làm suy giảm khả năng bảo vệ sườn dốc. Trong khi đó, khu vực đồng bằng thấp phía Đông duy trì trạng thái ổn định hơn với mức che phủ vốn đã thấp. Trong các chỉ số sử dụng, NDVI tỏ ra là chỉ báo chủ đạo phản ánh hiệu quả lớp phủ thực vật và khả năng chống xói mòn, trượt lở của khu vực. Chỉ số NDMI đóng vai trò bổ trợ quan trọng, cung cấp thông tin về trạng thái ẩm ướt, một yếu tố then chốt trong cơ chế mất ổn định mái dốc. Các chỉ số SAVI và BSI hỗ trợ tăng cường độ tin cậy và diễn giải chi tiết hơn về ảnh hưởng của nền đất.

Dựa trên những phát hiện này, nghiên cứu đề xuất một số định hướng quản lý. Trước mắt, cần ưu tiên các biện pháp bảo tồn và phục hồi thảm thực vật, đặc biệt tại các sườn dốc lớn ở khu vực phía Tây. Việc giám sát định kỳ các biến động của NDVI và NDMI cần được thiết lập như một công cụ cảnh báo sớm nguy cơ lũ quét và trượt lở. Đồng thời, việc áp dụng các giải pháp kỹ thuật như cải thiều thoát nước bề mặt là cần thiết nhằm giảm thiểu độ bão hòa

nước trong đất. Việc tích hợp chặt chẽ dữ liệu thực địa với hệ thống bản đồ chỉ số này sẽ giúp xác định chính xác các khu vực trọng điểm cần can thiệp, từ đó tối ưu hóa nguồn lực cho công tác phòng ngừa tai biến.

Về lâu dài, nghiên cứu mở ra hướng tiếp cận quan trọng trong quản lý rủi ro thiên tai, đó là tích hợp hệ thống chỉ số thảm phủ viễn thám vào các mô hình dự báo và đánh giá định lượng. Cách tiếp cận này không chỉ nâng cao hiệu quả cảnh báo sớm mà còn góp phần hoạch định các chiến lược giảm thiểu thiệt hại một cách chủ động và khoa học hơn.

Tài liệu tham khảo

1. Chen, W., Xie, X., Peng, L., Shahabi, H., & Hong, H. (2021). GIS-based landslide susceptibility modeling with geo-environmental factors and event-based probabilistic rainfall thresholds. *Geomorphology*, 378, 107601.
2. Gao, B.-C. (1996). NDWI: A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257–266.
3. Huete, A. R. (1988). A



- soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295–309.
4. Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
 5. Lee, J., Lee, S., & Lee, H. (2025). Evaluating landslide detection and prediction potential using satellite-derived vegetation indices in South Korea. *Land*, 14(12), 2410.
 6. Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7th ed.). Wiley.
 7. Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40(10), 927–930.
 8. Pradhan, B., & Youssef, A. M. (2010). Manifestation of remote sensing data and GIS on landslide hazard analysis using spatial-based statistical models. *Arabian Journal of Geosciences*, 3, 319–326.
 9. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA SP-351, 309–317.
 10. Smith, J. M. (2025, February 19). The Harmonized Landsat Sentinel-2 Project releases vegetation indices. *NASA Earthdata News*.
 11. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127–150.
 12. Xu, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remote sensing of environment. *Remote Sensing of Environment*, 112, 114–125.
 13. Zhang, Y., Zhang, Y. Y., & Liu, C. (2023). Assessing global landslide casualty risk under moderate climate change scenarios. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14(3), 345–362.
 14. Zhao, T., Song, W., Mu, X., Xie, Y., Xie, D., & Yan, G. (2024). Normalized difference vegetation index maps of pure pixels over China's mainland for estimation of fractional vegetation cover. *Earth System Science Data Discussions*, under review.

Ngày nộp: 13/8/2025

Ngày chấp nhận đăng: 22/12/2025