

การใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศในการประเมินความเสี่ยงของการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีพรรณพืช รอบโบราณสถานในเขตพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ภูพระบาท จังหวัดอุดรธานี

ทวิชญ์ สิงสุพรรณ, กอบการ เป็รียวปี, และ มิ่งกมล ป่องภักดิ์*

โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ อุดรธานี ตำบลบ้านมือ อำเภอบ้านมือ จังหวัดอุดรธานี ประเทศไทย

*Corresponding author: mingkamon.pk@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปแบบผสม มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เชิงบูรณาการการเปลี่ยนแปลงของดัชนีพรรณพืชจากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ร่วมกับการประเมินความเสี่ยงต่อโบราณสถาน และการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงพหุมิตินานุกรณภาพ และสังคม ในเขตพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ภูพระบาท จังหวัดอุดรธานี มีระยะเวลาในการวิจัยตั้งแต่เดือนมิถุนายน-เดือนธันวาคม พุทธศักราช 2568 โดยมีเครื่องในการวิจัย คือ 1) โปรแกรม SNAP 2) แบบประเมินความเสี่ยง 3) แบบสำรวจภาคสนาม และ 4) แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง ซึ่งวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสำรวจในรูปแบบ Factor Analysis และวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพในรูปแบบ Content Analysis ผลการวิจัย 1. การเปลี่ยนแปลงของดัชนีพรรณพืชจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 พบว่า โบราณสถานที่เป็นพื้นที่ให้นักท่องเที่ยวเข้าชมมีทั้งหมด 28 แห่ง โดยมีค่าดัชนีพรรณพืชโดยรอบลดลงจากการประเมินหลังการขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลก ดังนี้ ระดับมากที่สุดมีจำนวน 16 แห่ง ระดับมาก 5 แห่ง ระดับปานกลาง 4 แห่ง ระดับน้อย 2 แห่ง และระดับน้อยที่สุด 1 แห่ง 2. การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีพรรณพืช พบว่า 1) มติกฎหมาย พระราชบัญญัติโบราณสถาน (ฉบับที่ 2) พุทธศักราช 2535 ยังไม่ครอบคลุมประเด็นเชิงสิ่งแวดล้อม จึงควรเพิ่มในหมวดที่ 1 มาตราที่ 14 คือ ห้ามไม่ให้ผู้ใดกระทำการกิจกรรม หรือประพฤติดิน อันก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมรอบโบราณสถาน 2) มติกายภาพ พื้นที่ที่มีลักษณะเป็นดินร่วนปนทรายและหินตะกอนจึงส่งผลต่อความสามารถในการเจริญเติบโตของพืชพรรณทำให้ค่าดัชนีพรรณพืชลดลง และ 3) มติสังคม การเพิ่มขึ้นของกิจกรรมการท่องเที่ยวหลังการขึ้นทะเบียนเป็นแหล่งมรดกโลก รวมถึงการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรโดยชุมชนทำให้มีแนวโน้มลดลงของค่าดัชนีพรรณพืช

คำสำคัญ: ภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 / ดัชนีพรรณพืช / โปรแกรม SNAP / ภูพระบาท / กระบวนการมีส่วนร่วม

Application of geospatial technology for assessing vegetation index change risks around archaeological sites in Phu Phra Bat Historical Park, Udon Thani Province, Thailand

Thawich SingSuphan, Kobkarn Priawpee, and Mingkamol Pongphakdee*

*Triam Udom Suksa Phatthanakan Udon Thani School, Ban Phue Subdistrict, Ban Phue District,
Udon Thani Province, Thailand*

**Corresponding author: mingkamon.pk@gmail.com*

Abstract

This research employed a mixed-methods design with the objective of conducting an integrated analysis of vegetation index changes derived from Sentinel-2 imagery, in conjunction with a risk assessment of archaeological sites and multidimensional factor analysis encompassing legal, physical, and social dimensions within the Phu Phrabat Historical Park area, Udon Thani. The study was conducted from June to December 2025 (B.E. 2568). Research instruments included: (1) SNAP software, (2) a risk assessment form, (3) a field survey form, and (4) a semi-structured interview protocol. Quantitative survey data were analysed using Factor Analysis, while qualitative data were examined through Content Analysis. The findings revealed that, based on Sentinel-2 imagery analysis, 28 archaeological sites open to tourists experienced a decline in surrounding vegetation index values following their inscription as a World Heritage site. The levels of decline were classified as follows: very high (16 sites), high (5 sites), moderate (4 sites), low (2 sites), and very low (1 site). Regarding factors influencing vegetation index changes, three key dimensions were identified. First, in the legal dimension, the Ancient Monuments Act (No. 2), B.E. 2535 (1992), does not adequately address environmental issues; therefore, an amendment to Chapter 1, Section 14 is recommended to prohibit activities or behaviours causing environmental damage around archaeological sites. Second, in the physical dimension, the predominance of sandy loam soils and sedimentary rock affects vegetation growth capacity, contributing to reduced vegetation index values. Third, in the social dimension, increased tourism activities following World Heritage designation, along with community resource utilisation, have led to a downward trend in vegetation index values.

Keywords: Sentinel-2 Satellite Imagery / Vegetation Index / SNAP Software / Phu Phra Bat / Participatory Process

1. บทนำ

การเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อมระดับพื้นที่ เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (Geographic Information Systems: GIS) ได้กลายเป็นเครื่องมือหลักในการอธิบาย วิเคราะห์ และคาดการณ์พลวัตของทรัพยากรธรรมชาติอย่างเป็นระบบ ความสามารถของเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (GIS) ในการบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่จากหลายแหล่ง ทั้งภาพถ่ายดาวเทียม ข้อมูลภาคสนาม และฐานข้อมูลเชิงสังคม ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองเชิงพื้นที่ที่สะท้อนความสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความเปราะบางทางนิเวศและมีคุณค่าทางวัฒนธรรมสูง เช่น อุทยานประวัติศาสตร์ภูพระบาท จังหวัดอุดรธานี ซึ่งเป็นภูมิทัศน์วัฒนธรรมที่ต้องอาศัยการจัดการอย่างรอบด้าน

การประเมินการเปลี่ยนแปลงของพืชพรรณรอบโบราณสถานจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่และเชิงเวลา ภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ซึ่งพัฒนาโดยองค์การอวกาศยุโรป (European Space Agency: ESA) มีศักยภาพในการตรวจวัดค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) ด้วยความละเอียดสูงและครอบคลุมหลายช่วงคลื่น ส่งผลให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่สีเขียวในระดับจุลภาคได้อย่างแม่นยำ [1] งานวิจัยจำนวนมากในวารสารด้านการสำรวจระยะไกลยืนยันว่า การประมวลผลข้อมูลหลายช่วงเวลา (multi-temporal analysis) จาก Sentinel-2 ช่วยเพิ่มความถูกต้องในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและความเสื่อมโทรมของระบบพืชพรรณ [2] ซึ่งสะท้อนบทบาทของดัชนีพรรณพืชในฐานะตัวชี้วัดสถานะระบบนิเวศที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล นอกจากนี้ ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (GIS) ทำให้การวิเคราะห์เชิงพื้นที่ไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการทำแผนที่ หากแต่สามารถเชื่อมโยงข้อมูลสิ่งแวดล้อมเข้ากับข้อมูลทางสังคม เศรษฐกิจ และกฎหมาย เพื่อประเมินความเสี่ยงในมิติพหุองค์ประกอบได้อย่างเป็นระบบ [3] ซึ่งให้เห็นว่าเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (GIS) ได้พัฒนาไปสู่การเป็นโครงสร้างพื้นฐานเชิงความรู้ (spatial knowledge infrastructure) ที่สนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบาย ขณะที่แนวคิดภูมิทัศน์วัฒนธรรมเสนอว่าการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่เป็นผลลัพธ์ของปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกายภาพกับกระบวนการทางสังคมและเศรษฐกิจ [4] การบูรณาการข้อมูลเชิงพื้นที่กับการวิเคราะห์ทางสังคมจึงเป็นแนวทางที่ช่วยอธิบาย “เหตุ” และ “ผล” ของการเปลี่ยนแปลงได้อย่างลุ่มลึก ภายใต้กรอบการวิจัยแบบผสม (Mixed Methods Research) การผสมผสานข้อมูลเชิงปริมาณจากเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (GIS) และภาพถ่ายดาวเทียมเข้ากับข้อมูลเชิงคุณภาพจากการศึกษาปรากฏการณ์ในพื้นที่ ช่วยเพิ่มความสมบูรณ์ของการตีความ [5] โดยเฉพาะในบริบทของแหล่งมรดกทางวัฒนธรรมที่ต้องอาศัยกระบวนการมีส่วนร่วมของชุมชนและผู้มีส่วนได้ส่วนเสียในการกำหนดแนวทางจัดการพื้นที่อย่างยั่งยืน

ดังนั้น การใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (GIS) ในการประเมินความเสี่ยงของการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีพรรณพืชรอบโบราณสถานในอุทยานประวัติศาสตร์ภูพระบาท จึงไม่ใช่เพียงการประยุกต์ใช้เครื่องมือเชิงเทคนิค หากแต่เป็นกระบวนการสร้างองค์ความรู้เชิงบูรณาการที่เชื่อมโยงข้อมูลเชิงพื้นที่กับบริบททางสังคม กายภาพ และกฎหมาย เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายและการพัฒนาที่ยั่งยืนบนฐานข้อมูลเชิงประจักษ์

2. วัตถุประสงค์

เพื่อวิเคราะห์เชิงบูรณาการการเปลี่ยนแปลงของดัชนีพรรณพืชจากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ร่วมกับ การประเมินความเสี่ยงต่อโบราณสถาน และการวิเคราะห์ปัจจัยเชิงพหุมิติด้านกฎหมาย กายภาพ และสังคมในเขตพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ภูพระบาท จังหวัดอุดรธานี

3. ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษารูปแบบผสม (Mixed Methods Research) โดยการบูรณาการทางเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (GIS) ร่วมกับวิเคราะห์เชิงสังคมวิทยาจากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในพื้นที่การวิจัย เพื่อสร้างการมีส่วนร่วมในการแก้ไขปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรธรรมชาติสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

1. ตัวแปรต้น คือ การเปลี่ยนแปลงของดัชนีพรรณพืช (NDVI)
2. ตัวแปรตาม คือ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงพหุมิติด้านกฎหมาย กายภาพ และสังคม
3. กลุ่มเป้าหมาย คือ 1) โบราณสถานที่เป็นพื้นที่ให้นักท่องเที่ยวเข้าชมมีทั้งหมด 28 แห่ง 2) นักท่องเที่ยวที่มาเข้าชมจำนวน 30 คน 3) ผู้นำชุมชน และประชาชนที่ใช้ประโยชน์บริเวณเขตพื้นที่วิจัย จำนวน 27 คน และ 3) บุคลากรของหน่วยงานรัฐบาลที่เกี่ยวข้อง จำนวน 9 คน รวมกลุ่มเป้าหมายเชิงประชากร จำนวนทั้งสิ้น 66 คน
4. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล คือ 1) โปรแกรม SNAP 2) แบบประเมินความเสี่ยง 3) แบบสำรวจภาคสนาม และ 4) แบบสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้าง (Semi-structured Interview)

4. วิธีการศึกษา

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการตามรูปแบบวิจัยเชิงผสมผสาน (Mixed Methods Research) โดยได้นำกระบวนการของ [6] มาใช้ในการวิจัย ซึ่งทำให้การดำเนินงานเป็นระบบขั้นตอนมีความเหมาะสมต่อการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดในเชิงพื้นที่มากยิ่งขึ้น โดยมี 6 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดกรอบแนวคิดและเหตุผลในการใช้วิธีแบบผสม คือ กำหนดปัญหาการวิจัยจากการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) รอบโบราณสถานในเขตอุทยานประวัติศาสตร์ภูพระบาท ซึ่งไม่สามารถอธิบายได้ด้วยข้อมูลเชิงพื้นที่เพียงอย่างเดียว จึงต้องบูรณาการการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (GIS และภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2) ร่วมกับการวิเคราะห์เชิงสังคมวิทยา เพื่ออธิบายสาเหตุเชิงพหุมิติ ทั้งด้านกฎหมาย กายภาพ และสังคม

ขั้นตอนที่ 2 เลือกรูปแบบการออกแบบการวิจัย (Research Design Selection) คือ เลือกใช้ Explanatory Sequential Design โดยดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณก่อน แล้วจึงเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพเพื่อนำมาอธิบายผลที่ค้นพบ การออกแบบลักษณะนี้เหมาะสมกับงานที่ต้องการอธิบายปรากฏการณ์เชิงพื้นที่ด้วยบริบททางสังคมและนโยบาย

ขั้นตอนที่ 3 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ คือ ดำเนินการประมวลผลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ด้วยโปรแกรม SNAP เพื่อคำนวณค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงเวลา (temporal analysis) และจัดระดับความเสี่ยงของโบราณสถานทั้ง 28 แห่งจากนั้นใช้แบบประเมินความเสี่ยงและแบบสำรวจภาคสนามเพื่อเก็บข้อมูลเชิงโครงสร้าง และวิเคราะห์ด้วยสถิติ Factor Analysis เพื่อจำแนกองค์ประกอบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ

ขั้นตอนที่ 4 การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ คือ ดำเนินการสัมภาษณ์กึ่งโครงสร้างกับผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ได้แก่ 1) นักท่องเที่ยวที่มาเข้าชม จำนวน 30 คน 2) ผู้นำชุมชน และประชาชนที่ใช้ประโยชน์บริเวณเขตพื้นที่วิจัย จำนวน 27 คน และ 3) บุคลากรของหน่วยงานรัฐบาลที่เกี่ยวข้อง จำนวน 9 คน รวมกลุ่มเป้าหมายเชิงประชากร จำนวนทั้งสิ้น 66 คน เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ทางสังคมที่เกี่ยวข้องกับการใช้ทรัพยากร การท่องเที่ยว และข้อจำกัดด้านกฎหมาย ข้อมูลที่ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยวิธี Content Analysis เพื่อสกัดประเด็นสำคัญและเชื่อมโยงกับผลเชิงปริมาณ

ขั้นตอนที่ 5 การบูรณาการข้อมูล (Integration Phase) คือ นำผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพมาสังเคราะห์ร่วมกันในระดับการตีความ (interpretation level integration) โดยเปรียบเทียบความสอดคล้องของผลค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) กับข้อมูลเชิงสังคม กฎหมาย และกายภาพ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์เชิงเหตุและผลของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในพื้นที่อุทยานประวัติศาสตร์ภูพระบาท จังหวัดอุดรธานี

ขั้นตอนที่ 6 การตีความเชิงองค์รวมและเสนอแนวทางเชิงนโยบาย คือ สังเคราะห์ข้อค้นพบในมิติพหุมิติ เพื่อเสนอแนวทางการจัดการพื้นที่มรดกโลกอย่างยั่งยืน ทั้งในเชิงกฎหมาย (ข้อเสนอปรับปรุงพระราชบัญญัติ) เชิงกายภาพ (การจัดการสภาพดินและระบบนิเวศ) และเชิงสังคม (การบริหารจัดการการท่องเที่ยวและการมีส่วนร่วมของชุมชน) โดยใช้ฐานข้อมูลเชิงพื้นที่จากเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (GIS) เป็นเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจ

5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

อุทยานประวัติศาสตร์ภูพระบาท ตั้งอยู่ในเขตตำบลเมืองพาน อำเภอบ้านผือ จังหวัดอุดรธานี ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 3,740 ไร่ และอยู่ภายใต้การกำกับดูแลของ กรมศิลปากร ซึ่งมีกลุ่มโบราณสถานที่เปิดให้นักท่องเที่ยวเข้าชมและศึกษาจำนวน 28 แห่ง จากทั้งหมด 74 แห่ง พื้นที่ดังกล่าวตั้งอยู่บนแนวเทือกเขาภูพานตอนปลาย ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของภูมิประเทศแบบหินทราย (sandstone plateau) ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย อันมีลักษณะเด่นด้านธรณีสัณฐานและ ภูมิทัศน์วัฒนธรรมที่สัมพันธ์กับการตั้งถิ่นฐานของมนุษย์มาอย่างต่อเนื่อง [7] โดยอุทยานประวัติศาสตร์ภูพระบาทเป็นแหล่งโบราณคดีที่สะท้อนพัฒนาการทางความคิด ความเชื่อ และความสามารถเชิงเทคโนโลยีของมนุษย์ตั้งแต่สมัยก่อนประวัติศาสตร์จนถึงสมัยประวัติศาสตร์ตอนต้น ลักษณะเด่นของพื้นที่คือกลุ่มเพิงหินและโขดหินรูปทรงคล้ายดอกเห็ด (mushroom-shaped rock formations) อันเกิดจากกระบวนการผุพังและการกัดเซาะของหินทรายตามธรรมชาติในระยะเวลายาวนาน อีกหนึ่งลักษณะสำคัญของพื้นที่คือการปรากฏของหลุมหินรูปทรงกระบอกหรือก้นหม้อที่เรียกว่า “กุ่มกลักษณะ” (potholes) ซึ่งเกิดจากกระบวนการกัดเซาะเชิงกล (mechanical erosion) โดยกระแสน้ำในฤดูน้ำหลากพัดพาเศษกรวด หิน และทรายหมุนวนอยู่ในแอ่งเล็ก ๆ บนผิวหิน จนกัดเซาะให้เกิดหลุมลึกและกว้างขึ้น [8] กระบวนการดังกล่าวสะท้อนพลวัตทางธรณีวิทยาที่ดำเนินมาอย่างยาวนานก่อนการเข้ามาของมนุษย์ ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นแหล่งมรดกโลกโดย UNESCO ภายใต้อนุสัญญาคุ้มครองมรดกโลก ค.ศ. 1972 (Convention Concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage) ซึ่งกำหนดหลักการสำคัญว่าพื้นที่ที่มี “คุณค่าโดดเด่นเป็นสากล” (Outstanding Universal Value: OUV) ต้องได้รับการคุ้มครองและบริหารจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ [9] การขึ้นทะเบียนดังกล่าวไม่ได้เป็นเพียงการยอมรับคุณค่าเชิงสัญลักษณ์ หากยังมีนัยต่อพันธกรณีของรัฐภาคีในการจัดทำแผนบริหารจัดการ (management plan) การกำหนดเขตกันชน (buffer zone) และการติดตามสภาพการอนุรักษ์อย่างต่อเนื่อง การขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลกมีผลเชิงโครงสร้างอย่างน้อย 3 ประการ ได้แก่ 1) ด้านการบริหารจัดการ ต้องมีการจัดทำแผนบริหารจัดการที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากล รวมถึงการติดตามและรายงานสถานะการอนุรักษ์ต่อคณะกรรมการมรดกโลกอย่างต่อเนื่อง 2) ด้านเศรษฐกิจและสังคม การเพิ่มขึ้นของนักท่องเที่ยวและการลงทุนด้านโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งอาจสร้างรายได้แก่ชุมชน แต่ในขณะเดียวกันก็เพิ่มแรงกดดันต่อทรัพยากร และ 3) ด้านสิ่งแวดล้อมและภูมิทัศน์ การปรับปรุงสิ่งอำนวยความสะดวก การก่อสร้าง และการใช้พื้นที่ท่องเที่ยวอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศโดยรอบ หากไม่มีการกำหนดขีดความสามารถรองรับอย่างชัดเจน ดังนั้น พื้นที่มรดกโลกจำเป็นต้องมีระบบบริหารจัดการแบบบูรณาการที่เชื่อมโยงมิติทางวัฒนธรรม เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อมเข้าด้วยกัน มิฉะนั้น การรักษาคุณค่าโดดเด่นเป็นสากลอาจถูกบั่นทอน [10]

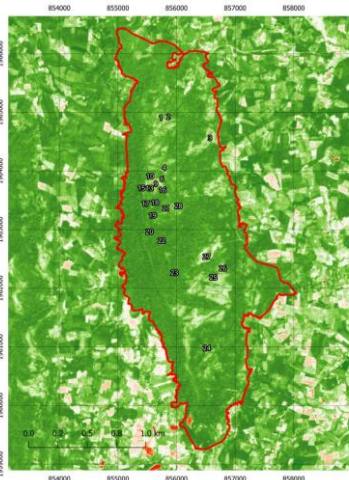
5.1 ผลการศึกษา

1. การวิเคราะห์ค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ในโปรแกรม SNAP

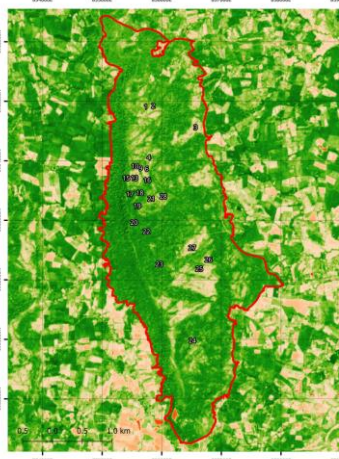
การศึกษานี้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 ให้ข้อมูลเชิงสเปกตรัมที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 100 เมตร ในช่วงคลื่นแสงสีแดง (Red) และใกล้อินฟราเรด (Near Infrared: NIR) สำหรับการคำนวณค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) โดยดำเนินการประมวลผลผ่านโปรแกรม SNAP (Sentinel Application Platform) ตามขั้นตอนมาตรฐาน ได้แก่ การปรับแก้ค่า

การสะท้อนเชิงบรรยากาศ (Atmospheric Correction) การตัดขอบเขตพื้นที่ศึกษา (Spatial Subset) และการสร้างชั้นข้อมูลดัชนีพรรณพืชด้วยสมการ $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$ ผลการวิเคราะห์เชิงพื้นที่ พบว่า ค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) ในพื้นที่ศึกษามีช่วงค่าระหว่างประมาณ -0.05 ถึง 0.78 โดยมีค่าเฉลี่ยรวมอยู่ที่ระดับปานกลาง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเชิงเปรียบเทียบระหว่าง “พื้นที่โบราณสถานและพื้นที่กันชน” กับ “พื้นที่ป่าธรรมชาติที่อยู่ห่างออกไป” พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเชิงพื้นที่ กล่าวคือ พื้นที่โดยรอบโบราณสถานสะท้อนถึงความหนาแน่นของพืชพรรณที่ลดลง

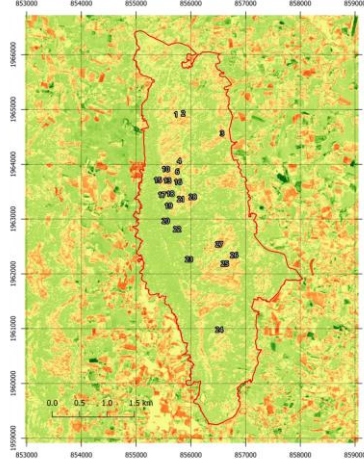
จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ผ่านภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 ในรูปแบบการวิเคราะห์ค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) การประกาศขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลกของอุทยานประวัติศาสตร์พระบาทใน พ.ศ. 2567 คณะผู้วิจัยได้นำภาพถ่ายดาวเทียมในช่วง 2 ปีย้อนหลัง ดังรูปที่ 1 (ก) มาวิเคราะห์หาค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) พบว่า ป่าไม้มีความอุดมสมบูรณ์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งต่างจากรูปที่ 1 (ข) หลังประกาศเป็นมรดกโลกได้ 2 ปี พบว่า ป่าไม้บางส่วนมีความเบาบางลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเอาค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) ทั้ง 2 ปี มาลบกัน โดยจะเห็นได้จากรูปที่ 1 (ค) พบว่า บริเวณจุดสำคัญของโบราณสถานที่เปิดให้เข้าชมมีสีแดงและเหลือง สะท้อนถึงความหนาแน่นของป่าไม้ลดลงเพียงในระยะเวลา 2 ปี



(ก) ค่าดัชนีพรรณพืชใน พ.ศ. 2565



(ข) ค่าดัชนีพรรณพืชใน พ.ศ. 2569



(ค) ค่าดัชนีพรรณพืชที่เปลี่ยนแปลง

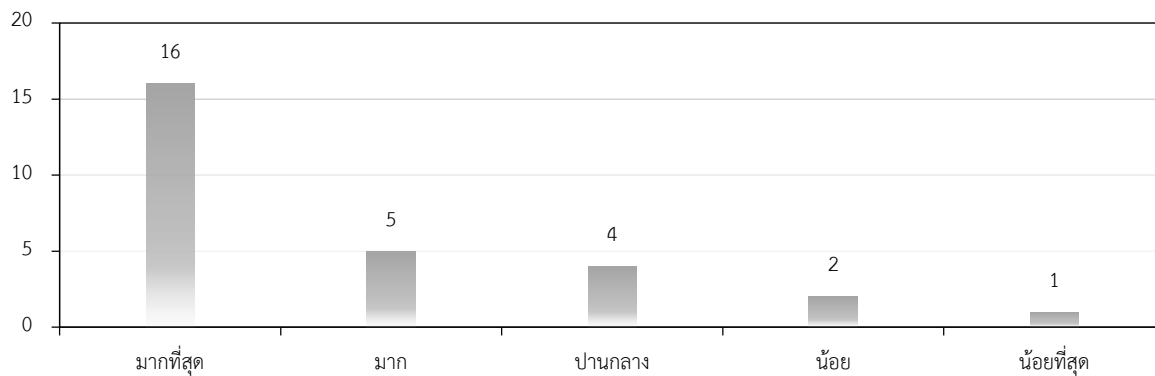
รูปที่ 1 แสดง (ก) ดัชนีพรรณพืชก่อนการเป็นมรดกโลก (ข) ดัชนีพรรณพืชหลังการเป็นมรดกโลก (ค) ค่าการเปลี่ยนแปลงของดัชนีพรรณพืช

2. การประเมินความเสี่ยงของการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีพรรณพืชรอบโบราณสถาน (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 รายชื่อโบราณสถานที่เปิดให้นักท่องเที่ยวเยี่ยมชม [11]

ลำดับ	ชื่อโบราณสถาน	ลำดับ	ชื่อโบราณสถาน	ลำดับ	ชื่อโบราณสถาน
1	ถ้าพระเสียด	11	ถ้าช้าง	21	คอกมาทวารสาร
2	เจดีย์ร้าง	12	หีบศพนางอุสา	22	ภาพเขียนสีกลุ่มห้วยหินร่อง
3	ถ้าป.ปลา	13	บ่อน้ำนางอุสา	23	พระบาทหลังเตา
4	ถ้าดินเพียง	14	หอนางอุสา	24	ถ้าเก็งหรือถ้ากาง
5	วัดพอดตา	15	ฉางขานายพราน	25	เพิงหินดานใหญ่
6	วัดลูกเขย	16	เพิงหินนกระทา	26	โนนสาวเอ้
7	ถ้าพระ	17	ผาเสด็จ	27	วัดพระพุทธรูปทวาร
8	หีบศพพอดตา	18	ถ้าวิ-คน	28	คอกมาน้อย
9	หีบศพทวารสาร	19	ถ้าฤๅษี		
10	กุนางอุสา	20	ผาสวรรค์		

การศึกษานี้เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลในโปรแกรม SNAP มาวิเคราะห์ร่วมกับการลงสำรวจพื้นที่จริงซึ่งผลการดำเนินงาน พบว่า โบราณสถานที่เป็นพื้นที่ให้นักท่องเที่ยวเข้าชมมีทั้งหมด 28 แห่ง โดยมีค่าดัชนีพรรณพืชโดยรวมลดลงจากการประเมินหลังการขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลก ดังนี้ ระดับมากที่สุดมีจำนวน 16 แห่ง ได้แก่ 1,2,3,4,6,8,10,11,12,13,15,21,25,26,27, และ 28 ระดับมาก 5 แห่ง ได้แก่ 5,7,9,14, และ 24 ระดับปานกลาง 4 แห่ง ได้แก่ 16,17,20, และ 23 ระดับน้อย 2 แห่ง ได้แก่ 18, และ 19 สุดท้ายระดับน้อยที่สุด 1 แห่ง ได้แก่ 22 จากผลการศึกษานี้แสดงเป็นแผนภูมิแท่งได้ ดังนี้



รูปที่ 2 แสดงผลการประเมินระดับความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงของทรัพยากรธรรมชาติรอบโบราณสถาน

3. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีพรรณพืชรอบโบราณสถาน

มติกฎหมาย พระราชบัญญัติโบราณสถาน โบราณวัตถุ ศิลปวัตถุ และพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ (ฉบับที่ 2) พุทธศักราช 2535 มีเป้าหมายหลักในการคุ้มครองคุณค่าทางประวัติศาสตร์และโบราณคดี แต่ยังมีได้ระบุข้อห้ามหรือกลไกเชิงป้องกันที่ชัดเจนเกี่ยวกับ “ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมรอบโบราณสถาน” โดยตรง โดยเฉพาะประเด็นความเสื่อมโทรมของพืชพรรณหรือการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิทัศน์เชิงนิเวศ ข้อเสนอให้เพิ่มเติมในหมวดที่ 1 มาตรา 14 โดยกำหนดว่า “ห้ามมิให้ผู้ใดกระทำการกิจกรรมหรือประพฤติดนองก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมรอบโบราณสถาน” สะท้อนแนวคิดการขยายขอบเขตการคุ้มครองจาก “ตัวโบราณสถาน” ไปสู่ “ภูมิทัศน์วัฒนธรรม (cultural landscape)” ซึ่งเป็นแนวทางที่สอดคล้องกับกรอบการอนุรักษ์ของ UNESCO ที่เน้นการจัดการพื้นที่กันชน (buffer zone) และบริบทโดยรอบอย่างเป็นระบบในเชิงความสัมพันธ์กับค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) ช่องว่างทางกฎหมายดังกล่าวอาจทำให้กิจกรรมที่กระทบต่อโครงสร้างพืชพรรณ เช่น การปรับพื้นที่ การก่อสร้างสิ่งอำนวยความสะดวก หรือการใช้ประโยชน์ที่ดินเชิงพาณิชย์ เกิดขึ้นโดยไม่มีมาตรการควบคุมเฉพาะด้านสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้ค่าดัชนีพรรณพืชมีแนวโน้มลดลงในระยะยาว การแก้ไขกฎหมายจึงมีใช้เพียงการเพิ่มข้อห้าม แต่คือการสร้าง “กลไกกำกับเชิงระบบนิเวศ” เพื่อเชื่อมโยงการอนุรักษ์มรดกวัฒนธรรมกับความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ การเปิดให้นักท่องเที่ยวเข้าชมส่งผลต่อการปรับสภาพแวดล้อมเชิงพื้นที่ที่อาจส่งผลต่อกฎหมายข้างต้น และแนวทางการอนุรักษ์ของ UNESCO โดยจะเห็นได้จากรูปที่ 3 (ข)

มติกายภาพ พื้นที่รอบโบราณสถานมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทรายร่วมกับหินตะกอน ซึ่งมีคุณสมบัติการระบายน้ำสูงและความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3 (ค) ส่งผลให้พืชพรรณเผชิญข้อจำกัดด้านความชุ่มชื้น โดยเฉพาะในฤดูแล้ง โครงสร้างดินลักษณะนี้ยังมีความเปราะบางต่อการชะล้างพังทลาย เมื่อมีการเหยียบย่ำหรือการปรับสภาพพื้นที่ ในเชิงการรับรู้ระยะไกล (RS) ดัชนีพรรณพืช (NDVI) เป็นตัวชี้วัดความเขียวชอุ่มและความหนาแน่นของพืชพรรณ การที่ค่าดัชนีลดลง

จึงอาจสะท้อนถึงความเครียดของพืช (plant stress) และการลดลงของชีวมวล (biomass) ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับข้อจำกัดทางกายภาพของดินและชั้นหิน อย่างไรก็ตาม การอธิบายการลดลงของดัชนีพรรณพืช (NDVI) ควรหลีกเลี่ยงการเหมารวมว่าเป็นผลจากธรรมชาติทั้งหมด เพราะปัจจัยกายภาพอาจทำหน้าที่เป็น “ตัวเร่ง (amplifier)”



(ก) โบราณสถานลำดับที่ 14 (จุดศูนย์กลาง)

(ข) ลักษณะการทำเส้นทางท่องเที่ยว

(ค) บริเวณพื้นที่ที่เป็นลานหินตะกอน

รูปที่ 3 แสดง (ก) จุดที่นักท่องเที่ยวหนาแน่น (ข) การตัดพืชคลุมดินออกเพื่อทำเส้นทาง (ค) พื้นที่ที่ไม่ยึดดินไม่สามารถเติบโตได้

มิติสังคม หลังการขึ้นทะเบียนเป็นแหล่งมรดกโลกใน พ.ศ. 2567 (ค.ศ. 2024) ภายใต้การรับรองของ UNESCO พื้นที่ที่มีแนวโน้มได้รับความสนใจจากนักท่องเที่ยวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การขยายตัวของกิจกรรมการท่องเที่ยว เช่น การสร้างจุดศูนย์กลางในการท่องเที่ยว จนทำให้เป็นจุดสำคัญที่นักท่องเที่ยวเกือบทุกคนต้องมา ดังจากเห็นจากรูปที่ 3 (ก) รวมถึงมีการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน การสร้างเส้นทางเดิน หรือการจัดกิจกรรมส่งเสริมการท่องเที่ยว อาจก่อให้เกิดการบดอัดหน้าดินและการรบกวนพืชพรรณ ในขณะเดียวกัน การใช้ประโยชน์ทรัพยากรโดยชุมชน เช่น การเก็บของป่า การเลี้ยงสัตว์ หรือการใช้พื้นที่โดยรอบเพื่อกิจกรรมทางเศรษฐกิจ ล้วนเป็นแรงกดดันเชิงพื้นที่ที่อาจสะท้อนผ่านค่าดัชนีพรรณพืชที่ลดลง อย่างไรก็ตาม ในเชิงวิพากษ์ การเพิ่มขึ้นของการท่องเที่ยวมิได้มีผลเชิงลบโดยอัตโนมัติ หากมีระบบบริหารจัดการพื้นที่ที่ดี และการมีส่วนร่วมของชุมชน การขึ้นทะเบียนอาจนำไปสู่การลงทุนด้านการอนุรักษ์และการฟื้นฟูระบบนิเวศได้เช่นกัน ดังนั้น การลดลงของดัชนีพรรณพืช (NDVI) ควรถูกวิเคราะห์ควบคู่กับนโยบายการจัดการ ไม่ใช่เพียงปริมาณนักท่องเที่ยวเท่านั้น จากข้อมูลดังกล่าว แสดงให้เห็นถึงกิจกรรมของมนุษย์ที่ส่งผลกระทบ ดังตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์ต่อไปนี้

ผู้ให้สัมภาษณ์ รหัส T7 (นักท่องเที่ยวหญิงจากกรุงเทพมหานคร อายุ 34 ปี)

“หลังจากที่ภูพระบาทได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลก ดิฉันเห็นข้อมูลในสื่อออนไลน์มากขึ้น เลยตั้งใจมาท่องเที่ยวค่ะ แต่บางจุดรู้สึกว่าการเดินทางยังไม่ชัดเจน คนเดินเหยียบพื้นดินและหญ้าเยอะ บางบริเวณดูเหมือนพืชไม่ค่อยขึ้น...”

ผู้ให้สัมภาษณ์ รหัส C3 (ชาวบ้านในชุมชนใกล้เคียงพื้นที่ อายุ 56 ปี)

“เมื่อก่อนคนมาเที่ยวไม่มาก พื้นที่ป่าก็ยังคงสมบูรณ์ แต่ช่วงหลังคนมาเยอะขึ้น ชาวบ้านบางส่วนก็ขายของ เปิดร้าน ทำที่จอดรถเพิ่ม บางจุดต้องถางหญ้าเพื่อความสะดวก ผมคิดว่ามันก็ดีเรื่องรายได้ แต่ก็เห็นว่าต้นไม้บางส่วนลดลงจริง...”

ผู้ให้สัมภาษณ์ รหัส O1 (เจ้าหน้าที่อุทยาน อายุ 39 ปี)

“หลังจากขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลก จำนวนนักท่องเที่ยวเพิ่มขึ้นชัดเจน เราพยายามจัดทำเส้นทางศึกษาธรรมชาติและจำกัดพื้นที่บางส่วน แต่การควบคุมยังมีข้อจำกัดเรื่องงบประมาณและบุคลากรจึงมีผลกระทบต่อพืชพรรณ...”

5.2 อภิปรายผล

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจาก Sentinel-2 ทำให้สามารถประเมินพลวัตของพืชพรรณโดยรอบ อุทยานประวัติศาสตร์ภูพระบาท ได้อย่างเป็นระบบและมีหลักฐานเชิงประจักษ์

ผลการวิจัยที่พบแนวโน้มการลดลงของดัชนีพรรณพืช (NDVI) ในพื้นที่โบราณสถานส่วนใหญ่หลังการขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลก สะท้อนให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของภูมิทัศน์ที่สัมพันธ์กับกิจกรรมมนุษย์และแรงกดดันด้านการใช้ประโยชน์พื้นที่ ในเชิงทฤษฎีดัชนีพรรณพืช (NDVI) เป็นดัชนีที่พัฒนาเพื่อสะท้อนความแตกต่างของการสะท้อนคลื่นแสงย่านใกล้อินฟราเรดและแสงสีแดง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเขียวและผลผลิตภาพชีวภาพของพืช ซึ่งชี้ให้เห็นว่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) สามารถใช้เป็นตัวแทน (proxy) ของการตอบสนองระบบนิเวศต่อการเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การลดลงของค่าดัชนีในพื้นที่ศึกษาจึงอาจสะท้อนภาวะความเครียดของพืชพรรณจากแรงกดดันทั้งทางกายภาพและทางสังคม อย่างไรก็ตาม การตีความผลควรดำเนินไปอย่างระมัดระวังในเชิงวิธีวิทยา เนื่องจากดัชนีพรรณพืช (NDVI) วัด “ความหนาแน่นเชิงสเปกตรัม” ไม่ใช่ “คุณภาพเชิงนิเวศ” โดยตรง กล่าวคือ พื้นที่ที่มีการจัดภูมิทัศน์ใหม่หรือปรับปรุงเพื่อรองรับการท่องเที่ยว อาจมีพืชพรรณบางส่วนถูกตัดแต่งหรือเปลี่ยนชนิด ส่งผลให้ค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) ลดลง แม้ไม่ได้หมายถึงการเสื่อมโทรมเชิงระบบทั้งหมด นอกจากนี้ ปัจจัยด้านฤดูกาล ความชื้นในดิน และโครงสร้างดินล้วนมีอิทธิพลต่อค่าดัชนี [12] จึงควรมีการตรวจสอบข้อมูลภาคสนามประกอบเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์จากภาพถ่ายดาวเทียม อย่างไรก็ตาม การขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลกภายใต้กรอบของ UNESCO ตามอนุสัญญาคุ้มครองมรดกโลก ค.ศ. 1972 มีนัยสำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของการรับรู้ในระดับสากลและการขยายตัวของการท่องเที่ยว งานวิจัยด้านการท่องเที่ยวมรดกวัฒนธรรมเสนอว่า การยกระดับสถานะเป็นมรดกโลกมักนำไปสู่การเพิ่มจำนวนนักท่องเที่ยวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งก่อให้เกิดทั้งโอกาสทางเศรษฐกิจและแรงกดดันต่อทรัพยากรพื้นที่ [13] ผลการศึกษาครั้งนี้ที่พบแนวโน้มค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) ลดลงในหลายจุด จึงอาจสะท้อนปรากฏการณ์ดังกล่าวในบริบทเชิงพื้นที่ของภูพระบาท ทั้งนี้ ประเด็นสำคัญไม่ได้อยู่ที่การลดลงของค่าดัชนีเพียงอย่างเดียว หากแต่อยู่ที่กลไกการจัดการรองรับแรงกดดันดังกล่าว กล่าวคือ แม้สถานะมรดกโลกจะกำหนดให้มีการจัดทำแผนบริหารจัดการและการติดตามสภาพการอนุรักษ์ แต่หากการบริหารจัดการมุ่งเน้นการอนุรักษ์เชิงวัตถุ (monument-centered conservation) โดยละเลยบริบทภูมิทัศน์โดยรอบ ก็อาจทำให้ระบบนิเวศที่เป็นฐานรองรับคุณค่าทางวัฒนธรรมค่อย ๆ เสื่อมถอย การอภิปรายผลจึงชี้ให้เห็นความจำเป็นของแนวทางบูรณาการที่เชื่อมโยงข้อมูลภูมิสารสนเทศเข้ากับการกำหนดขีดความสามารถรองรับ (carrying capacity) และมาตรการควบคุมกิจกรรมการท่องเที่ยวอย่างเหมาะสม ดังนั้น ผลการวิจัยสนับสนุนข้อเสนอเชิงนโยบายว่าการอนุรักษ์พื้นที่มรดกโลกควรดำเนินไปบนฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ตรวจสอบได้ พร้อมทั้งตระหนักถึงความสัมพันธ์เชิงซ้อนระหว่างธรรมชาติ วัฒนธรรม และสังคม การใช้ดัชนีพรรณพืช (NDVI) และเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ (GIS) จึงไม่ใช่เพียงเครื่องมือทางเทคนิค หากเป็นกลไกสำคัญในการสร้าง “หลักฐานเชิงประจักษ์” เพื่อสนับสนุนการจัดการพื้นที่อย่างยั่งยืนในระยะยาว

6. สรุปผลการศึกษา

การเปลี่ยนแปลงค่าดัชนีพรรณพืช (NDVI) จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 สะท้อนให้เห็นแนวโน้มการลดลงของความสมบูรณ์พืชพรรณรอบโบราณสถานทั้ง 28 แห่ง ภายในอุทยานประวัติศาสตร์ภูพระบาท จังหวัดอุดรธานี ภายหลังจากการขึ้นทะเบียนเป็นแหล่งมรดกโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ที่อยู่ในระดับการลดลงมากที่สุดจำนวน 16 แห่ง ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนมากกว่าครึ่งหนึ่งของพื้นที่ศึกษา ข้อค้นพบดังกล่าวมีนัยสำคัญเชิงพื้นที่และเชิงนโยบาย

1. มิติกายภาพ ลักษณะดินร่วนปนทรายและชั้นหินตะกอนของพื้นที่ศึกษาเป็นปัจจัยพื้นฐานที่ส่งผลต่อศักยภาพในการอุ้มน้ำและการยึดเกาะของรากพืช เมื่อประกอบกับการเหยียบย่ำ การเปิดหน้าดิน และการเปลี่ยนแปลงการไหลบ่าของน้ำผิวดินจากกิจกรรมการท่องเที่ยว ย่อมเร่งให้เกิดการเสื่อมโทรมของพืชพรรณอย่างรวดเร็ว ค่าดัชนีพรรณพืชที่ลดลงจึงไม่ได้เป็นเพียงตัวเลขเชิงเทคนิค หากแต่เป็นตัวชี้วัดเชิงนิเวศที่สะท้อนภาวะความเครียดของระบบนิเวศโดยรอบโบราณสถาน

2. มิติกฎหมาย ผลการศึกษาชี้ให้เห็นช่องว่างเชิงนโยบายของพระราชบัญญัติโบราณสถาน (ฉบับที่ 2) พุทธศักราช 2535 ซึ่งมุ่งเน้นการคุ้มครองตัวโบราณสถานเป็นหลัก โดยยังไม่ได้กำหนดมาตรการเฉพาะต่อการป้องกันความเสียหายทางสิ่งแวดล้อมโดยรอบอย่างชัดเจน สถานการณ์ดังกล่าวสะท้อนปัญหาเชิงโครงสร้างในการจัดการพื้นที่มรดกทางวัฒนธรรมที่ยังแยกส่วนระหว่างการอนุรักษ์โบราณสถานกับการอนุรักษ์ภูมิทัศน์ การเสนอให้เพิ่มเติมบทบัญญัติด้านสิ่งแวดล้อมจึงไม่ใช่เพียงข้อเสนอทางกฎหมาย หากแต่เป็นการปรับกรอบคิดการอนุรักษ์ให้ครอบคลุมมิติภูมิทัศน์วัฒนธรรมอย่างองค์รวม

3. มิติสังคม การเพิ่มขึ้นของกิจกรรมการท่องเที่ยวภายหลังการขึ้นทะเบียนเป็นมรดกโลก แม้ส่งผลเชิงบวกต่อเศรษฐกิจท้องถิ่นและการรับรู้คุณค่าทางวัฒนธรรม แต่กลับก่อให้เกิดแรงกดดันต่อทรัพยากรธรรมชาติในพื้นที่อย่างมีนัยสำคัญ การใช้ประโยชน์ทรัพยากรโดยชุมชนและผู้ประกอบการ หากขาดกลไกกำกับดูแลที่สอดคล้องกับศักยภาพรองรับของพื้นที่ (carrying capacity) อาจนำไปสู่การเสื่อมโทรมสะสมในระยะยาว ผลการวิจัยจึงสะท้อนให้เห็นว่าการบริหารจัดการพื้นที่มรดกโลกจำเป็นต้องคำนึงถึงความสมดุลระหว่างการใช้ประโยชน์และการอนุรักษ์อย่างรอบด้าน

ดังนั้น การลดลงของค่าดัชนีพรรณพืชในพื้นที่ศึกษาเป็นผลจากปฏิสัมพันธ์เชิงพหุมิติระหว่างข้อจำกัดทางกายภาพ ช่องว่างเชิงกฎหมาย และพลวัตทางสังคม ไม่ได้เกิดจากปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งโดยลำพัง ข้อค้นพบนี้ตอกย้ำความสำคัญของการใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศเป็นเครื่องมือเฝ้าระวังเชิงพื้นที่ควบคู่กับการวิเคราะห์เชิงสังคมและเชิงนโยบาย เพื่อสนับสนุนการกำหนดมาตรการจัดการที่ตั้งอยู่บนฐานข้อมูลเชิงประจักษ์ และนำไปสู่การพัฒนาพื้นที่มรดกทางวัฒนธรรมอย่างยั่งยืน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36.
- [2] Immitzer, M., Vuolo, F., & Atzberger, C. (2016). First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classification in central Europe. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 118, 1-12.
- [3] Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: The world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), 211-221.
- [4] Antrop, M. (2005). Why landscapes of the past are important for the future. *Landscape and Urban Planning*, 70(1-2), 21-34.
- [5] Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). United States of America: SAGE Publications.
- [6] Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). United States of America: SAGE Publications.
- [7] กรมศิลปากร. (2560). *อุทยานประวัติศาสตร์ภูพระบาท*. กรุงเทพมหานคร: กรมศิลปากร.
- [8] กรมทรัพยากรธรณี. (2558). *ธรณีวิทยาและแหล่งท่องเที่ยวเชิงธรณีในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ*. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- [9] UNESCO. (1972). *Convention concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage*. Paris: UNESCO.
- [10] Bandarin, F., & van Oers, R. (2012). *The historic urban landscape: Managing heritage in an urban century*. Oxford: Wiley-Blackwell.
- [11] อุทยานประวัติศาสตร์ภูพระบาท. (2567). *โบราณคดีและพิพิธภัณฑ์*, 25 มิถุนายน 2568. <https://shorturl.asia/sfwkK>
- [12] Turner, M. G. (1989). Landscape ecology: The effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 20, 171-197.
- [13] Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150.