

การคาดการณ์การพังทลายของดินด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับข้อมูลระยะไกล ในพื้นที่ประเทศไทย

Assessment of Soil Erosion Using Geographic Information System and Remote Sensing Data in Thailand

ชยพล จุลพูล¹, เปรม รัชฉนิขพงศ์^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: Prem.r@ku.th

บทคัดย่อ

ดินเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สำคัญต่อระบบนิเวศและผลผลิตทางการเกษตร ในพื้นที่ประเทศไทยปัญหาการกัดเซาะดินถือเป็นปัญหาหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อความอุดมสมบูรณ์ของทรัพยากรดิน ซึ่งการประเมินการกัดเซาะดินยังมีความจำเป็นสำหรับการวางแผนป้องกันและจัดการในอนาคต บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์และคาดการณ์การสูญเสียดินในประเทศไทย โดยประยุกต์ใช้สมการการสูญเสียดินสากลฉบับปรับปรุง (RUSLE) และระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS) วิธีการคือวิเคราะห์ปัจจัยทั้งห้าปัจจัยได้แก่ ปัจจัยความสามารถในการกัดเซาะของน้ำฝน (R) ปัจจัยเกี่ยวกับความไวของดินต่อการกัดเซาะ (K) ปัจจัยความยาวของความลาดเทและความชัน (LS) ปัจจัยเกี่ยวกับการจัดการพืช (C) และปัจจัยเกี่ยวกับมาตรการการอนุรักษ์ดิน (P) และนำผลการวิเคราะห์มาสร้างแผนที่การพังทลายดินเฉลี่ยรายปี จากการศึกษาพบว่า การพังทลายของดินในประเทศไทยมีค่าเฉลี่ยการพังทลายอยู่ที่ 13.86 ตัน/ไร่/ปี ซึ่งพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงส่วนใหญ่อยู่ในบริเวณภาคเหนือ และภาคใต้ โดยมีสาเหตุหลักจากลักษณะภูมิประเทศที่ลาดชัน จึงเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลการสูญเสียดินมากกว่าภาคอื่นๆ ขณะที่พื้นที่ความเสี่ยงต่ำอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งมีลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ราบ การประเมินแนวโน้มการสูญเสียดินนี้มีความสำคัญต่อการพัฒนานโยบายอนุรักษ์และจัดการทรัพยากรดินในประเทศไทย

คำสำคัญ: การสูญเสียดิน, การวิเคราะห์เชิงพื้นที่, ประเทศไทย, ปริมาณฝน, ภูมิประเทศ

Abstracts

Soil is an important natural resource for ecosystems and agricultural productivity. In Thailand, soil erosion poses a significant threat to soil fertility, necessitating comprehensive assessments for future prevention and management planning. This study aims to analyze and predict soil loss in Thailand by

applying the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and Geographic Information Systems (GIS). The methodology involves analyzing five factors: rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), slope length and steepness (LS), crop management (C), and conservation practices (P), and the result were used to create a map of soil erosion. The results showed that average soil erosion rate in Thailand approximately 13.86 tons/rai/year, which high-risk areas for soil loss are primarily concentrated in the northern and southern mountains, mainly due to steep topography, which is the dominant factor influence on soil erosion. Conversely, low-risk areas are predominantly located in the northeastern region, characterized by high plains with relatively flat terrain. This assessment of soil loss trends is critical for developing effective policies to conserve and manage soil resources in Thailand.

Keywords: Rainfall, Soil Loss, Spatial Analysis, Thailand, Topography

1. คำนำ

การชะล้างพังทลายของดินนับเป็นหนึ่งปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อความเสื่อมโทรมของทรัพยากรดิน ซึ่งเป็นปัญหาที่ทั่วโลกให้ความสำคัญทั้งในด้านความเสียหายและผลกระทบที่เกิดขึ้นในวงกว้าง [1] การสูญเสียทรัพยากรดินเนื่องจากการกัดเซาะดินกระจายอยู่ในทุกพื้นที่ของประเทศไทยและในพื้นที่ป่าต้นน้ำ รวมถึงพื้นที่เกษตรกรรม ทำให้โครงสร้างและธาตุอาหารในดินเสียหาย อีกทั้งยังขาดการจัดการดินที่เหมาะสมตามสภาพปัญหาในแต่ละพื้นที่ และขาดการอนุรักษ์ดินและน้ำอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ และด้วยเหตุนี้ส่งผลเสมือนตัวเร่งให้เกิดกระบวนการการพังทลายของดินอย่างรวดเร็ว และส่งผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อความสมดุลของระบบนิเวศในวงกว้าง [2] นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก การปรับเปลี่ยนลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน การบุกรุก

ทำลายพื้นที่ป่า รวมถึงกิจกรรมอื่นๆ ซึ่งเป็นปัจจัยกระตุ้นให้เกิดสถานการณ์การชะล้างพังทลายดินที่รุนแรงจนเกิดเป็นดินถล่ม ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน [3,4] นอกจากนี้การพัดพาตะกอนดินที่เกิดจากการกัดเซาะจากร่องเล็กๆ ไหลลงเป็นตะกอนทับถมท้องน้ำ ส่งผลให้ความจุของลำน้ำลดลงและอาจนำพาสารอินทรีย์หรือธาตุอาหารที่มากเกินไปลงสู่ลำน้ำ จนนำไปสู่การเจริญเติบโตของสาหร่ายและการเกิดยูโทรฟิเคชัน ทำให้ต้องเสี่ยงงบประมาณในการบำรุงรักษาลำน้ำ และเมื่อตะกอนได้ถูกพัดพาไปยังอ่างเก็บน้ำ ยังส่งผลทำให้ปริมาณเก็บกักน้ำลดลง หรือในบางกรณีตะกอนที่ถูกพัดพาได้ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและก่อให้เกิดความเสียหายในวงกว้างต่อการอุปโภคบริโภค และการเกษตร

ในปี 1978 [5] ได้พัฒนาและนำเสนอสมการการสูญเสียดินสากล (Universal Soil Loss Equation, USLE) เพื่อใช้ในการประเมินการพังทลายของดินในพื้นที่สหรัฐอเมริกา ซึ่งสมการนี้ได้รับการยอมรับและนำไปใช้ในงานวิจัยด้านการประเมินการพังทลายดินอย่างแพร่หลาย ต่อมา [6] (1994) ได้ทำการปรับปรุง USLE ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น จนกลายเป็นสมการการสูญเสียดินฉบับปรับปรุง (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) ซึ่งสามารถนำไปใช้ร่วมกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์และคาดการณ์การพังทลายของดิน ในปัจจุบันการใช้ข้อมูลระยะไกล (Remote Sensing) ควบคู่กับ RUSLE และ GIS ช่วยให้สามารถประเมินการพังทลายของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถวิเคราะห์ได้ถึงจะมีพื้นที่ขนาดใหญ่

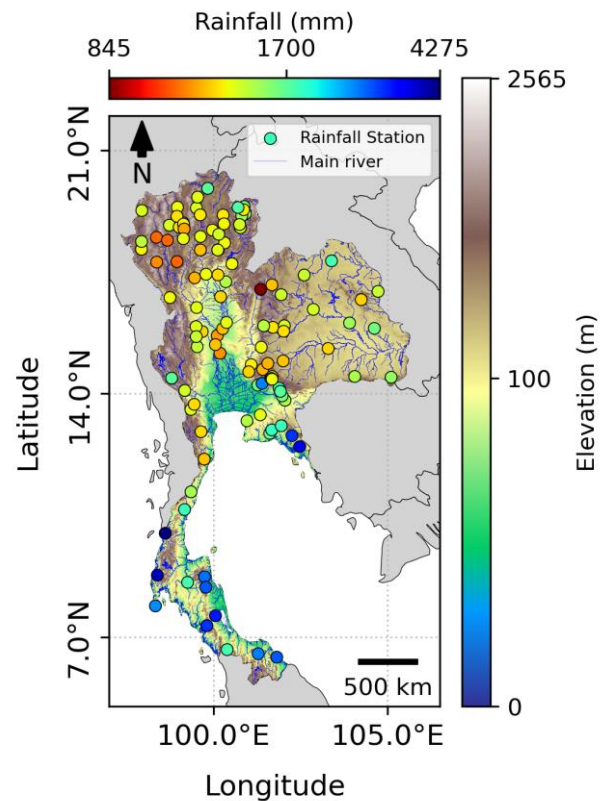
ดังนั้นในการศึกษานี้ได้นำสมการการสูญเสียดินสากลนำมาปรับใช้กับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) และข้อมูลระยะไกล (RS) เพื่อประเมินถึงสถานการณ์ของพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดการชะล้างพังทลายดินในประเทศไทย เป็นข้อมูลสำคัญเพื่อนำไปสู่การควบคุม การป้องกันและฟื้นฟูพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากสถานการณ์การชะล้างพังทลายดิน

2. วิธีการวิจัย

2.1 พื้นที่ศึกษา

ประเทศไทยมีพื้นที่ 320.7 ล้านไร่ มีอาณาเขตด้านทิศตะวันออกติดกับสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาวและราชอาณาจักรกัมพูชา ด้านทิศเหนือและทิศตะวันตกติดกับสาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมาและทางทิศใต้ติดกับประเทศมาเลเซีย ประเทศไทยตั้งอยู่ในช่วงพิกัด 5°37' N ถึง 20°27' N และ 97°22' E ถึง 105°37' E ภูมิประเทศของประเทศไทยแบ่งออกเป็น 5 ภูมิภาค ได้แก่ ที่ราบลุ่มภาคกลาง พื้นที่เชิงเขาภาคเหนือ ภาคตะวันตก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ชายฝั่งตะวันออกเฉียงใต้ และพื้นที่ชายฝั่งประมาณ 20% ของพื้นที่ประเทศไทยเป็นภูเขาและเนินเขา โดยเฉพาะในภูมิภาคตอนเหนือและตอนใต้ [11] ซึ่งมีจุดที่สูงที่สุดอยู่ที่ 2,565 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล (รูปที่ 1) พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยมีลักษณะภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ในขณะที่ภาคใต้และทางตะวันออกสุดของภาคตะวันออกเป็นเขตภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อน โดยได้รับอิทธิพลมรสุม 2 ฤดูกาล คือ ฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม) และฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-เมษายน) ในฤดูฝนมักจะมีฝนตกหนักจากมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และพายุดีเปรสชันเขตร้อนจาก

ทะเลจีนใต้ ทำให้เกิดฝนตกหนักและน้ำท่วมฉับพลัน โดยมีปริมาณฝนเฉลี่ยอยู่ที่ 1,530 มิลลิเมตรและอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 28.65 องศาเซลเซียส



รูปที่ 1 พื้นที่ประเทศไทย

ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินของประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรมคิดเป็นร้อยละ 55.49 ของพื้นที่ทั้งหมด ทำให้พื้นที่การเกษตรเป็นพื้นที่หลักของประเทศ

2.2 ประมาณค่าข้อมูลฝนเชิงพื้นที่

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลน้ำฝนเฉลี่ยโดยครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2537-2566 (30ปี) จากสถานีน้ำฝน 110 แห่งของกรมชลประทานมาหาค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่จากเทคนิค Inverse Distance Weighted (IDW) ซึ่งเป็นการประมาณค่าจากหลักการที่ว่าตำแหน่งที่อยู่ใกล้เคียงกันย่อมมีความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ที่มากกว่าตำแหน่งที่อยู่ไกลออกไป มีรูปแบบของสมการดังแสดงในสมการที่ (1)

$$Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z(x_i)}{d(x_0, x_i)^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d(x_0, x_i)^p}} \quad (1)$$

โดยที่ $Z(x_0)$ คือค่าปริมาณฝนที่ได้จากการประมาณค่า ณ ตำแหน่งที่ต้องการ, $Z(x_i)$ คือค่า Z ที่ตำแหน่ง x_i , $d(x_i, x_0)$ คือระยะทางระหว่างจุด x_i และ x_0 , n คือจำนวนจุดที่ทราบค่า, p คือค่ากำลังระยะทาง(2)

2.3 สมการการสูญเสียดินสากลฉบับปรับปรุง (RUSLE)

แบบจำลอง RUSLE เป็นแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการประเมินการกัดเซาะดินในพื้นที่เชิงเขา ป่าไม้ และเกษตรกรรม [7] โดยมีพื้นฐานมาจากสมการ USLE เนื่องจากมีประสิทธิภาพและมีการวิเคราะห์ข้อมูลที่ไม่ซับซ้อน แบบจำลองนี้จึงถูกใช้ในการคาดการณ์การพังทลายดินในหลายงานวิจัย [2,5,7-14,23-27]

ในงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลอง RUSLE ร่วมกับระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS) และข้อมูลระยะไกล (RS) เพื่อประเมินการพังทลายของดินในแต่ละกริดของพื้นที่ประเทศไทยโดยใช้สมการดังแสดงตามสมการที่ (2)

$$A=R \times K \times LS \times C \times P \quad (2)$$

โดยที่ A คือ การสูญเสียดินรายปีต่อหน่วยพื้นที่ (ตัน/เฮกตาร์/ปี), R คือ ปัจจัยการชะล้างของฝน (เมกะจูล. มิลลิเมตร/เฮกตาร์/ชั่วโมง/ปี), K คือ ปัจจัยความไวต่อการกัดเซาะของดิน (ตัน. ชั่วโมง/เมกะจูล/มิลลิเมตร), LS คือปัจจัยทางภูมิประเทศ, C คือ ปัจจัยการครอบคลุมของพืชพรรณ, P คือ ปัจจัยการอนุรักษ์ดิน

2.2.1 ปัจจัยการชะล้างของฝน (R)

ความรุนแรงของเม็ตฝนที่ตกกระทบพื้นดินจะมีพลังงานจลน์ที่ส่งผลให้เกิดการกระจายของเม็ตดิน การชะล้างของน้ำฝนเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการกัดเซาะของดิน โดยการวิเคราะห์ปัจจัยการชะล้างของฝนจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางภูมิอากาศของพื้นที่ [9] ซึ่งประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร ทำให้ภูมิอากาศของประเทศไทยมีลักษณะเป็นแบบร้อนชื้น ซึ่งในปีพ.ศ. 2545 กรมพัฒนาที่ดินได้สร้างสมการเพื่อใช้ประเมินค่าปัจจัยการชะล้างของฝน (R) โดยคำนวณจากข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี [10,11] ดังสมการตามสมการที่ (3)

$$R=0.4669X - 12.141559 \quad (3)$$

โดยที่ R คือปัจจัยการชะล้างของฝน (เมกะจูล. มิลลิเมตร/เฮกตาร์/ชั่วโมง/ปี), X คือ ปริมาณฝนรายปี (มิลลิเมตร)

2.2.2 ปัจจัยความไวต่อการกัดเซาะของดิน (K)

การกัดเซาะของดินขึ้นอยู่กับประเภทดินและลักษณะทางธรณีวิทยา เช่น ลักษณะพื้นผิวดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และโครงสร้างดิน [12] ซึ่งดินแต่ละชนิดจะมีอัตราการถูกกัดเซาะไม่เท่ากันเนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของดินที่เรียกว่าความคงทนต่อการถูกชะล้างพังทลายของดิน [5] โดยใช้เทคนิคที่พัฒนาโดย [15] ดังสมการที่ (4)

$$K=0.2+0.3 \exp \left(-0.0256 \times Sa \times \left(1 - \frac{Si}{100} \right) \right) \times \left(\frac{Si}{CI+Si} \right)^{0.3} \times \left(1 - \frac{0.25 \times C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right) \quad (4)$$

$$\times \left(1 - \frac{0.7 \times SN}{SN + \exp(-5.51 + 22.9SN)} \right)$$

โดยที่ K คือ ปัจจัยความไวต่อการกัดเซาะ (ตัน. ชั่วโมง/เมกะจูล/มิลลิเมตร), Sa คือเปอร์เซ็นต์ทราย (%), Si คือเปอร์เซ็นต์ดินร่วน (%), CI คือเปอร์เซ็นต์ดินเหนียว (%), C คือเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุ (%), $SN = 1 - Sa/100$

2.2.3 ปัจจัยทางภูมิประเทศ (LS)

ปัจจัยนี้เป็นการรวมกันระหว่าง ปัจจัยความยาวลาดเท (L) และความชัน (S) ต่อการพังทลายของดิน [5] โดยงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM) ความละเอียด 30x30 เมตร จากโครงการสำรวจภูมิประเทศด้วยเรดาร์บนกระสวยอวกาศ (The Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) ในการวิเคราะห์ต้องพิจารณาสูตรที่ใช้ให้เหมาะสมกับพื้นที่ถึงแม้ว่าสูตรจะมีพื้นฐานมาจากแบบจำลอง RUSLE แต่ละสูตรมีวิธีการคำนวณที่แตกต่างกันและมีความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ที่แตกต่างกัน [13] สมการปัจจัยความชันดังสมการที่ (5)

$$LS = L \times S \quad (5)$$

L คือ ความยาวความลาดชันวิเคราะห์ที่ตั้งสมการ (5) พัฒนาโดย [6]

$$L = \left(\frac{\lambda}{\psi} \right)^m \quad (6)$$

โดยที่ λ = ความยาวการไหล (เมตร), ψ = ความยาวมาตรฐานแปลงทดลองในการพัฒนาแบบจำลอง USLE (22.13), m คืออัตราส่วนของการชะล้างพังทลายแบบริ้ว (rill erosion) ที่เกิดจากน้ำไหลบ่า ต่อการชะล้างพังทลายระหว่างริ้ว (interrill erosion) ที่เกิดจากพลังงานของเม็ตฝน [14] อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์พื้นที่ลุ่มน้ำที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่จะมีค่าความยาวในแนวราบและความลาดชันสูง การวิเคราะห์ค่า λ อาจเกิดความผิดพลาดได้ง่าย [28] และส่งผลทำให้ทำให้เกิดค่าที่สูงเกินความเป็นจริง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้สมการที่ (7) ในการวิเคราะห์ความยาวการไหล

$$\lambda = \frac{\Delta H}{\sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{\Delta H}{I_o} \right) \right]} \quad (7)$$

โดยที่ I_o คือ ระยะห่างระหว่างจุดในแต่ละกริดเซลล์, ΔH คือ ความแตกต่างระหว่างจุดสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละพิกเซล ($\Delta H = \tan \theta * I_o$), θ คือ องศาความชัน (°)

งานวิจัยนี้จะแบ่งวิเคราะห์ค่า m ออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่ พื้นที่ที่มีความชันน้อยกว่าเท่ากับ 10 องศา จะคำนวณดังสมการที่ (8) [15] ส่วนพื้นที่มากกว่า 10 องศา จะใช้สมการที่ (9) [16]

$$m = \frac{\frac{\sin\theta}{0.0896} [3 \times (\sin\theta)^{0.8} + 0.56]}{1 + \frac{\sin\theta}{0.0896} [3 \times (\sin\theta)^{0.8} + 0.56]} \quad (8)$$

$$m = 0.6 [1 - \exp(-35.83 \times \tan\theta)] \quad (9)$$

โดยที่ θ คือ องศาความชัน ($^{\circ}$)

ความลาดชันของภูมิประเทศมีผลกระทบอย่างมากต่อการพังทลายของดิน ภูมิประเทศที่มีลักษณะลาดชันมากจะส่งผลต่อการไหลบ่าของน้ำผิวดิน ทำให้เพิ่มความเค้นเฉือนต่ออนุภาคดิน [17] โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ความชันออกเป็น 2 ระดับ ได้แก่ พื้นที่ที่มีความชันน้อยกว่าเท่ากับ 18 องศา จะคำนวณดังสมการที่ (10) [16] ส่วนพื้นที่มากกว่า 18 องศา จะใช้สมการที่ (11) พัฒนาโดย [21]

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin(\theta) + 0.03, & (\theta < 5^{\circ}) \\ 16.8 \sin(\theta) - 0.55, & (5^{\circ} \leq \theta < 10^{\circ}) \\ 21.9 \sin(\theta) - 0.96, & (\theta \geq 10^{\circ}) \end{cases} \quad (10)$$

$$S = 65.41 \sin^2(\theta) + 4.56 \sin(\theta) + 0.065 \quad (11)$$

โดยที่ θ คือ องศาความชัน ($^{\circ}$)

2.2.4 ปัจจัยการครอบคลุมของพืชพรรณ (C)

เป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ระหว่างพืชพรรณและการกัดเซาะดิน โดยเป็นอัตราส่วนของการสูญเสียดินในพื้นที่ที่มีการปกคลุมพืชพรรณ เปรียบเทียบกับพื้นที่ที่ไม่มีพืชปกคลุม [19] ด้วยเหตุนี้การจัดการพืชพรรณอย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยลดอัตราการพังทลายของดินได้ ปัจจัยนี้จะวัดปริมาณการพังทลายของดินที่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีพืชคลุมเทียบกับที่ดินเปล่า [20] โดยงานวิจัยนี้จะใช้ดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (NDVI) ที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ปี 2567 ซึ่งเป็นช่วงฤดูแล้งของประเทศไทย โดยค่า NDVI จะมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 สามารถวิเคราะห์ดังสมการที่ (12) ซึ่งค่า NDVI ที่คำนวณได้ยังมีค่าใกล้เคียง 1 บ่งชี้ว่าพื้นที่นั้นมีความอุดมสมบูรณ์สูง ส่วนบริเวณพืชไม่สมบูรณ์หรือบริเวณที่เกิดความแห้งแล้งค่าจะยิ่งเข้าใกล้ -1

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (12)$$

โดยที่ NIR คือ ค่าความเข้มของแสงในช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด, R คือ ค่าความเข้มของแสงในช่วงคลื่นสีแดง พัฒนาโดย [22]

$$C = (-0.7388 \times NDVI + 0.4948) \quad (13)$$

ในการคำนวณค่าปัจจัย C จะวิเคราะห์จากค่า NDVI แสดงดังสมการที่ (13) [9] โดยค่า C ที่วิเคราะห์ได้ยังมีค่าเข้าใกล้ 1 บ่งชี้ว่าพื้นที่บริเวณนั้นขาดความอุดมสมบูรณ์ของพืชปกคลุมดิน ในทางกลับกันบริเวณที่มีความสมบูรณ์ของพืชพรรณปกคลุมดินค่าจะยิ่งเข้าใกล้ 0

2.2.5 ปัจจัยการอนุรักษ์ดิน (P)

ปัจจัยนี้แสดงถึงแนวทางการอนุรักษ์ ซึ่งจะช่วยลดปริมาณและอัตราการไหลของน้ำและแรงกระทำจากเม็ดฝนที่ส่งผลต่อการพังทลายของดิน โดยจะพิจารณาวิธีอนุรักษ์ดินในพื้นที่เกษตรกรรม เช่น การทำเกษตรแบบขั้นบันได การปลูกพืชเป็นแถว ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ค่าปัจจัย P โดยแบ่งเป็นหกค่าตามระดับความชันในพื้นที่เกษตรกรรม [19] ดังที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าปัจจัย P

ลักษณะการใช้ที่ดิน	ความชัน (%)	ค่าปัจจัย P
พื้นที่เกษตรกรรม	0-5	0.1
	5-10	0.12
	10-20	0.14
	20-30	0.19
	30-50	0.25
	50-100	0.33
อื่นๆ	ทั้งหมด	1.00

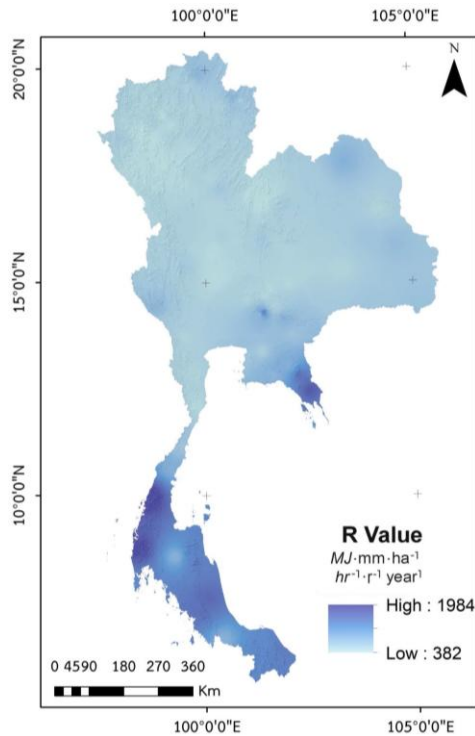
3. ผลการศึกษา

3.1 ค่าปัจจัยของสมการการสูญเสียดินในประเทศไทย

งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลอง RUSLE ในการคาดการณ์การพังทลายของดิน ร่วมกับระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์และข้อมูลระยะไกล ปัจจัยทั้ง 5 มีความละเอียดจุดภาพ 30x30 เมตร แผนที่ปัจจัยการชะล้างของฝน (R) ใช้ข้อมูลน้ำฝนเฉลี่ยรายปี ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยตั้งแต่ปี 2537-2566 (30ปี) จากสถานีน้ำฝน 110 แห่งของกรมชลประทาน มาทำการปรับแก้ข้อมูลด้วยวิธี Inverse Distance Weighting (IDW) เป็นการประมาณค่าโดยจุดตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์เชิงพื้นที่ตามสมการที่ (3) พบว่าค่าประมาณของปัจจัยการชะล้างของฝน (R) อยู่ในช่วงระหว่าง 382 ถึง 1984 เมกะจูล. มิลลิเมตร/เฮกตาร์/ชั่วโมง/ปี ดังแสดงในรูปที่ 2 พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากปัจจัย R ต่อการกัดเซาะดินส่วนใหญ่อยู่ทางตอนใต้และตะวันออกของประเทศ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณน้ำฝนกระจายตัวอยู่มาก

ปัจจัยทางด้านภูมิประเทศ (LS) คำนวณเชิงพื้นที่โดยใช้สมการที่ (5) โดยทั่วไปแล้วลักษณะภูมิประเทศที่มีความลาดชันมาก ก็ยิ่งส่งผลต่ออัตราการกัดเซาะดินมาก [9] ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าปัจจัยนี้มีค่าระหว่าง 0-257 ดังแสดงในรูปที่ 4a ซึ่งส่วนใหญ่พบค่าสูงในทางตอนเหนือและทางตอนใต้ของประเทศแสดงให้เห็นว่าสภาพภูมิประเทศที่มีความชันสูงมีความสัมพันธ์กับความเร็วการไหลบ่าของน้ำบนผิวดิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อการพัดพาของเม็ดดินในกระบวนการกัดเซาะดิน

ปัจจัยความไวต่อการกัดเซาะของดิน (K) ปัจจัยนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของดิน ในงานวิจัยนี้ได้ข้อมูล Digital Soil Map of the World ขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO)



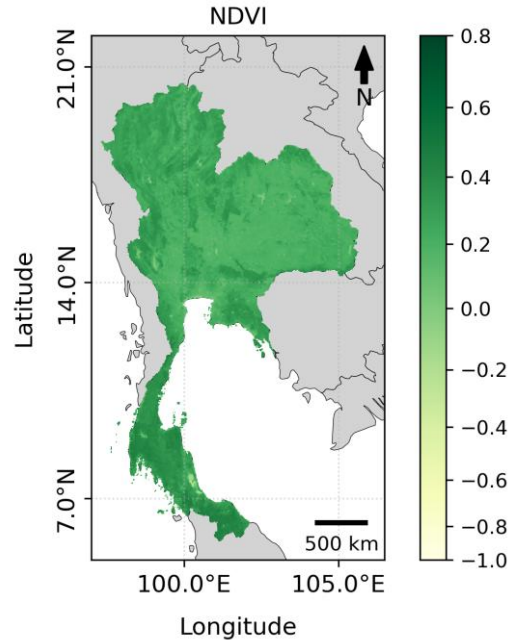
รูปที่ 2 แผนที่ปัจจัยการชะล้างจากฝน

ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลดินทั่วโลก ซึ่งจะแสดงรายละเอียดข้อมูลดิน โครงสร้างดิน และอินทรีย์วัตถุในดินประเภทนั้นๆ นำมาวิเคราะห์ตาม สมการที่ (4) พบว่ามีค่าอยู่ระหว่างช่วง 0 -0.31 ตัน·ชั่วโมง/เมกะจูล/ มิลลิเมตร ซึ่งค่าใกล้ 0 จะบ่งบอกถึงความไวต่อการกัดเซาะสูงว่าดิน โดยทั่วไปแล้วดินร่วนและทรายจะมีอัตราความไวต่อการกัดเซาะสูงกว่าดินเหนียว ทำให้สามารถกัดเซาะได้ง่ายกว่าดินเหนียว โดยพื้นที่ประเทศไทย มีค่าเฉลี่ยที่ 0.18 ตัน·ชั่วโมง/เมกะจูล/มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 4c

ปัจจัยการครอบคลุมของพืช (C) แสดงถึงผลกระทบของพืชคลุมดินต่อการกัดเซาะของดิน ในงานวิจัยนี้คำนวณจากค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (NDVI) ตามสมการที่ (12) ค่าจะอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ซึ่งบริเวณที่มี พืชพรรณที่สมบูรณ์จะมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงดังรูปที่ 3 ในการคำนวณปัจจัย C นั้นจะนำค่า NDVI มาวิเคราะห์เชิงพื้นที่ตามสมการ (13) ค่าที่น้อยบ่ง บอถึงการปกคลุมของพืชพรรณที่หนาแน่นกว่า ดังนั้นจึงมีศักยภาพในการ ลดการพังทลายดินสูง ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าปัจจัย C ที่สูง (0.6–0.8) เกิดขึ้นในพื้นที่ปลายของลุ่มน้ำตอนกลางและพื้นที่ราบสูงทาง ตะวันออกเฉียงเหนือ (รูปที่ 5a) โดยทั่วไปแล้วพื้นที่ที่ราบสูงทาง ตะวันออกเฉียงเหนือเป็นพื้นที่แห้งแล้งขาดความอุดมสมบูรณ์ของพืชพรรณ แตกต่างกับพื้นที่ทางเหนือและใต้ที่ปกคลุมด้วยพืชพรรณ ซึ่งสามารถ ป้องกันและช่วยสลายพลังงานจากเม็ดฝนซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญในการ พังทลายดิน

นอกจากนี้ปัจจัยการอนุรักษ์ดิน (P) ยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่สามารถช่วยป้องกันการกัดเซาะดิน โดยงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาวิธีการ อนุรักษ์ดินในพื้นที่เกษตรกรรมที่มีส่วนช่วยลดการพังทลายของดิน ปัจจัย P มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่าที่ยิ่งเข้าใกล้ 0 แสดงถึงแนวทางปฏิบัติที่มี

ประสิทธิภาพ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าพื้นที่ส่วนใหญ่มีค่าเท่ากับ 1 (รูปที่ 5b) บ่งชี้ว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ในประเทศไทยยังไม่มีมาตรการอนุรักษ์ดิน นอกจากนี้ การรุกรานบริเวณพื้นที่ต้นน้ำเพื่อใช้ประโยชน์มีผลกระทบอย่างมากต่อการ พังทลายดิน [9]



รูปที่ 3 แผนที่ค่าดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ

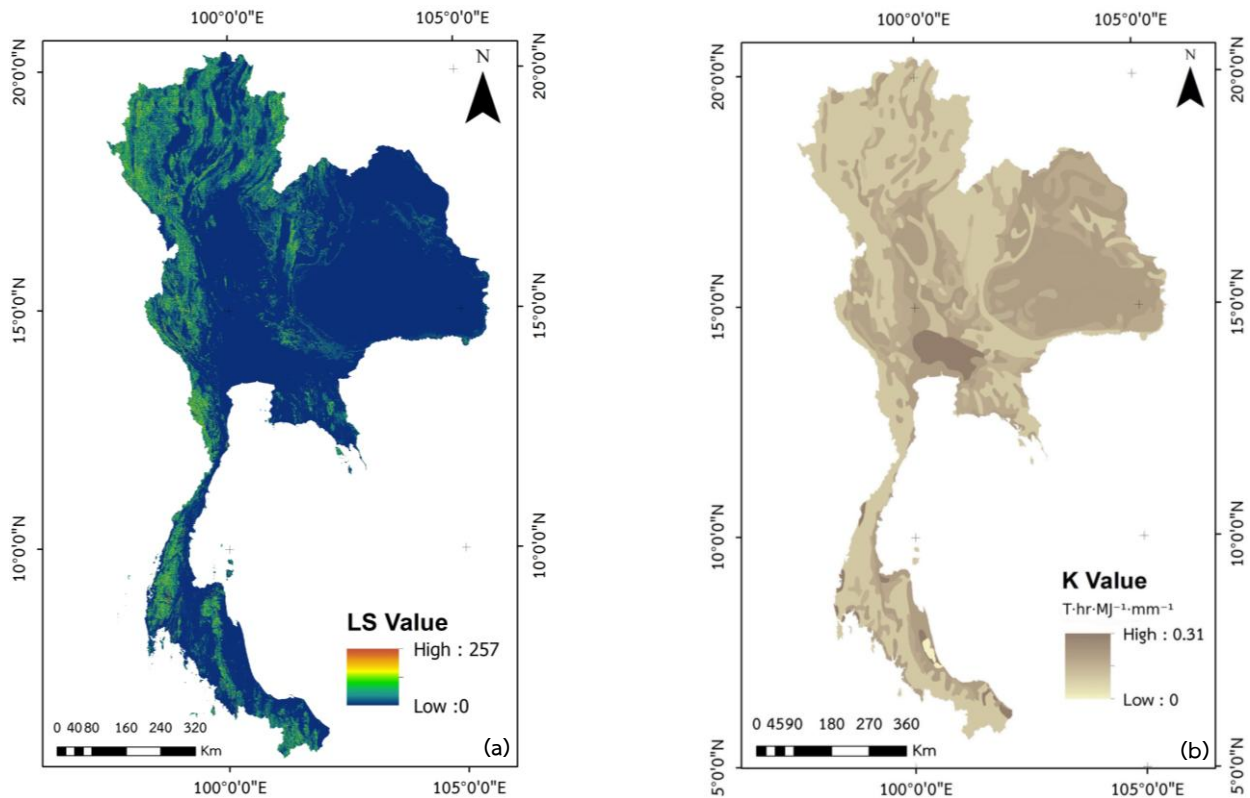
3.2 การพังทลายของดินเฉลี่ยรายปีในประเทศไทย

จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการพังทลายดินตามแบบจำลอง RUSLE ผลการคาดการณ์การพังทลายดินด้วยความละเอียดภาพ 30x30 เมตรตามสมการที่ (2) ปรากฏว่าค่าการพังทลายดินในประเทศไทยมีค่า ระหว่าง 0-65 ตัน/ไร่/ปี และจากรูปที่ 6 จะเห็นความแตกต่างของการ พังทลายดินในแต่ละพื้นที่ ซึ่งส่วนใหญ่จะกัดเซาะในพื้นที่ที่มีความลาดชัน สูงและมีการกระจายตัวของฝนในพื้นที่นั้นอยู่มาก

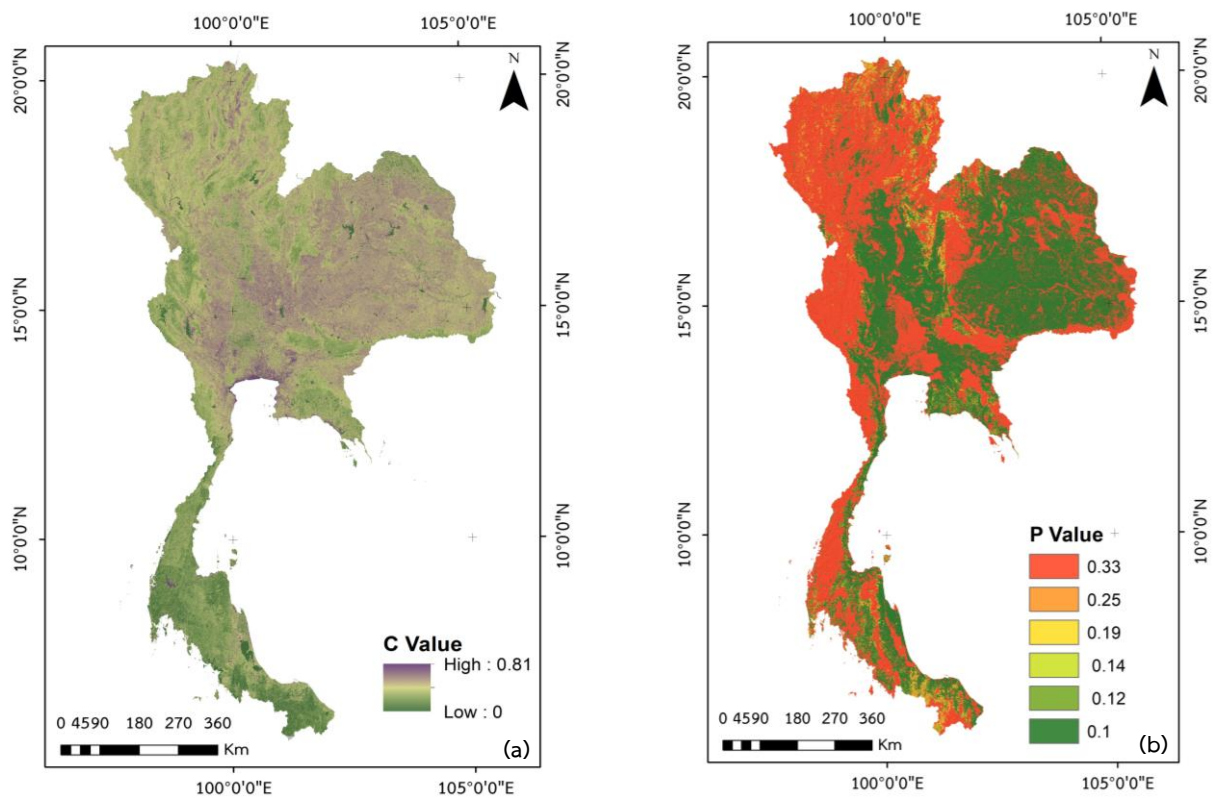
เพื่อประเมินระดับความเสี่ยงต่อการพังทลายดินในแต่ละพื้นที่ งานวิจัย นี้ได้หาค่าเฉลี่ยการพังทลายดินในระดับพื้นที่ลุ่มน้ำ (รูปที่ 7) จากผลการ วิเคราะห์แบบจำลอง RUSLE (รูปที่ 6) โดยแบ่งประเภทความรุนแรง ออกเป็น 5 ระดับ ได้แก่ ต่ำมาก ต่ำ ปานกลาง สูง และสูงมาก ตามที่กรม พพัฒนาที่ดินได้ (LDD) ได้แบ่งไว้ในปี 2000 [14] ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ระดับความเสี่ยงของการพังทลายดิน

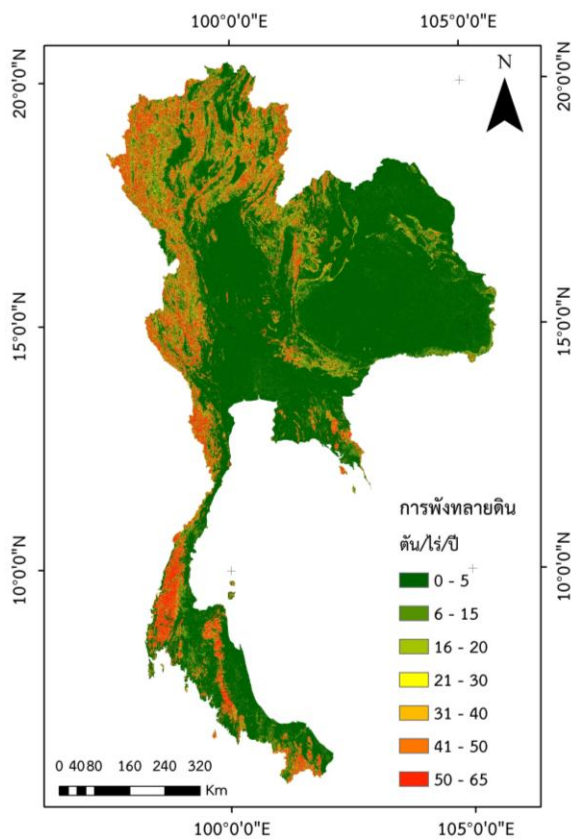
ระดับความรุนแรง	อัตราการพังทลายดิน (ตัน/ไร่/ปี)	เนื้อที่	
		ไร่	ร้อยละ
ต่ำมาก	0-2	177,709,743	55.24
ต่ำ	2-5	36,109,788	11.34
ปานกลาง	5-15	30,888,939	9.72
สูง	15-20	11,998,583	3.86
สูงมาก	>20	63,536,144	19.84
เนื้อที่รวม		322,575,271	100.00



รูปที่ 4 แผนที่ปัจจัยของแบบจำลอง RUSLE : (a) แผนที่ปัจจัย LS,
 (b) แผนที่ปัจจัย K



รูปที่ 5 แผนที่ปัจจัยของแบบจำลอง RUSLE : (a) แผนที่ปัจจัย C,
 (b) แผนที่ปัจจัย P

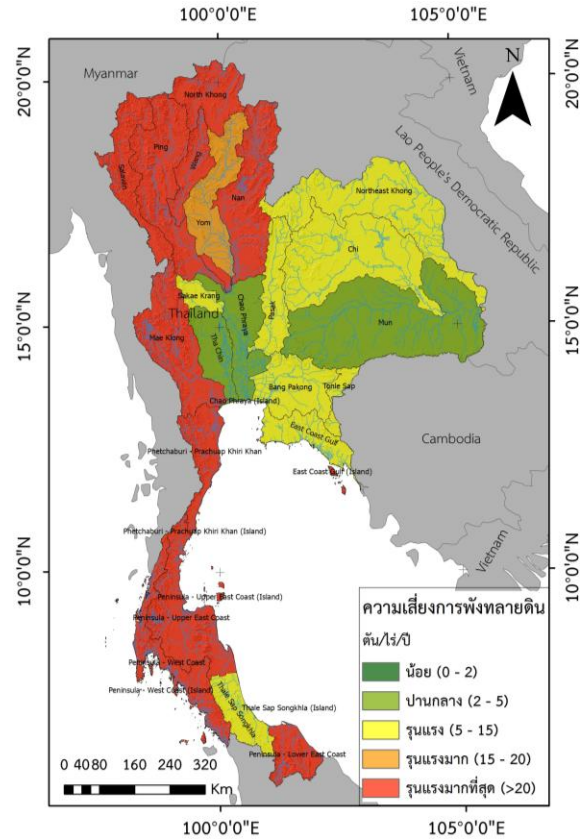


รูปที่ 6 แผนที่การกัดเซาะดินจากแบบจำลอง RUSLE ในประเทศไทย

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าลุ่มน้ำที่มีค่าการพังทลายดินเฉลี่ยในระดับสูงจะเป็นลุ่มน้ำที่มีสันปันน้ำเป็นแนวภูเขาลาดชันกระจายอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำ และพื้นที่ที่เป็นเกาะ โดยลุ่มน้ำที่มีค่าการพังทลายของดินเฉลี่ยสูงที่สุด (46.50 ตัน/ไร่/ปี) คือลุ่มน้ำสาละวิน ครอบคลุมจังหวัดแม่ฮ่องสอน พื้นที่บางส่วนของจังหวัดตากและเชียงใหม่ รองลงมาคือลุ่มน้ำภาคใต้ฝั่งตะวันตกมีค่าเฉลี่ยการพังทลายของดินเท่ากับ (45.28 ตัน/ไร่/ปี) มีพื้นที่ครอบคลุม 7 จังหวัดได้แก่ ระนอง พังงา ภูเก็ต กระบี่ นครศรีธรรมราช ตรังและสตูล ส่วนลุ่มน้ำที่มีการพังทลายดินเฉลี่ยน้อยที่สุดคือลุ่มน้ำมูล (2.32 ตัน/ไร่/ปี) เนื่องจากเป็นพื้นที่ราบครอบคลุมพื้นที่เขาพนมดงรักในจังหวัดนครราชสีมา บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ ยโสธร และอุบลราชธานี ผลการวิเคราะห์บ่งบอกถึงผลกระทบของปัจจัยด้านภูมิประเทศต่อกระบวนการพังทลายของดิน

4. บทสรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการพังทลายดินด้วยสมการการสูญเสียดินสากล (RUSLE) ร่วมกับ ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) และข้อมูลระยะไกล (RS) ด้วยความละเอียดจุดภาพ 30 x 30 เมตร ในพื้นที่ประเทศไทย ซึ่งช่วยให้การคาดการณ์การพังทลายมีประสิทธิภาพมากขึ้น และสร้างแผนที่ความเสี่ยงการพังทลายดินโดยวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยทั้ง 5 ได้แก่ ปัจจัยความรุนแรงเม็ดฝน (R), ปัจจัยความไวต่อการกัดเซาะดิน (K), ปัจจัยภูมิประเทศ (LS), ปัจจัยพืชคลุมดิน (C), ปัจจัยการอนุรักษ์ดิน (P)



รูปที่ 7 แผนที่ระดับความเสี่ยงการพังทลายดินแบ่งตามพื้นที่ลุ่มน้ำ

ผลการวิจัยพบว่า การกัดเซาะดินเกิดขึ้นในทุกส่วนของประเทศมีค่าระหว่าง 0 ถึง 65.70 ตัน/ไร่/ปี และค่าเฉลี่ยการพังทลายดินทั้งประเทศอยู่ที่ 13.86 ตัน/ไร่/ปี การประเมินความเสี่ยงแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ได้แก่ ต่ำมาก ต่ำ ปานกลาง สูง และสูงมาก โดยพื้นที่ส่วนใหญ่จากการประเมินและแบ่งตามระดับความรุนแรงพบว่าส่วนใหญ่มีค่าการสูญเสียดินอยู่ในระดับน้อย (0-2 ตัน/ไร่/ปี) หรือคิดเป็นร้อยละ 55.24 ของเนื้อที่ทั้งหมด รองลงมาคือ ระดับสูงมาก (มากกว่า 20 ตัน/ไร่/ปี) มีเนื้อที่ 63,536,144 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 19.84 พบกระจายอยู่ในพื้นที่ภูเขาและที่ลาดหุบเขา โดยเฉพาะแถบแนวเขาตั้งแต่ทางเหนือถึงทางตอนใต้ของประเทศ ต่อมาในระดับต่ำและปานกลางจะมีขนาดใกล้เคียงกันคิดเป็นร้อยละ 11.34 และ 9.72 พบในพื้นที่ช่วงเปลี่ยนระดับความชันของพื้นที่เชิงเขากับลาดเชิงเขา รองลงมาคือระดับสูง (15-20 ตัน/ไร่/ปี) ร้อยละ 3.86 ของพื้นที่ เมื่อเปรียบเทียบผลการวิจัยนี้กับข้อมูลของกรมพัฒนาที่ดินปี 2563 [14] พบว่าพื้นที่ที่มีการสูญเสียดินสูง (15-20 ตัน/ไร่/ปี) และสูงมาก (มากกว่า 20 ตัน/ไร่/ปี) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ขณะที่พื้นที่ที่มีการสูญเสียดินน้อย (0-2 ตัน/ไร่/ปี) กลับลดลงอย่างมาก แนวโน้มดังกล่าวอาจสะท้อนถึงปัญหาการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน การลดลงของนิเวศเกษตร หรือผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของการสูญเสียดินมีความชัดเจนอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิประเทศลาดชัน โดยเฉพาะในภาคเหนือและภาคใต้ของประเทศ ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการพังทลายดินใน

แต่ละพื้นที่ของประเทศไทยมีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดเซาะดินในพื้นที่นั้น โดยพบว่าในทางตอนเหนือและใต้ของประเทศไทยค่าการพังทลายของดินโดยเฉลี่ยสูงกว่าพื้นที่อื่นๆเนื่องจากสภาพภูมิประเทศที่เป็นภูเขาและลาดเชิงเขาที่มีความลาดชันสูงซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นที่ที่มีค่าปัจจัยทางภูมิประเทศสูงมีแนวโน้มที่จะมีการพังทลายของดินสูง ดังนั้นเมื่อกระแสน้ำพัดผ่านพื้นที่ในบริเวณนี้ลงสู่พื้นที่ต่ำตามแรงโน้มถ่วงของโลก จึงส่งผลทำให้การชะล้างพังทลายของดินเกิดขึ้นในบริเวณนี้มีอัตราที่สูงกว่าในพื้นที่อื่น

ผลการศึกษานี้แสดงถึงภาพรวมของการพังทลายดินในพื้นที่ประเทศไทย ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการวิจัยในอนาคตเกี่ยวกับการพังทลายดินในพื้นที่ประเทศไทย นอกจากนี้ผลจากการศึกษานี้มีประโยชน์อย่างมากสำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับทรัพยากรดินโดยชี้ให้เห็นว่าควรพิจารณาถึงนโยบายการอนุรักษ์ดินและการบริหารจัดการทรัพยากรดินที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพเพื่อรักษาระบบนิเวศและทรัพยากรธรรมชาติให้ยั่งยืนสืบต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณกรมชลประทาน สำหรับข้อมูลปริมาณฝนตรวจวัดรายเดือนที่ใช้ในการศึกษานี้ และขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมจากการศึกษาระดับปริญญาโท แผนการเรียนแบบ ก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ปีการศึกษา 2567)

เอกสารอ้างอิง

- [1] FAO and ITPS (2015) *Status of the World's Soil Resources (SWSR) Main Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
- [2] Adhikari, K. and Hartemink, A.E. (2016) Linking Soils to Ecosystem Service A Global Review. *Geoderma*, 262, pp. 101-111.
- [3] BORSELLI ET al. (2006). "SOIL EROSION BY LAND LEVELLING". In "SOIL EROSION IN EUROPE" (J. Boardman and J. Poesen- editors). John Willey & Sons Ltd, West Sussex, England pp. 643-658
- [4] Ghosal, K., Das Bhattacharya, S. (2020). A Review of RUSLE Model. *J Indian Soc Remote Sens* 48, pp. 689-707.
- [5] Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses, *Agriculture Handbook* No. 537, 537, pp. 285-291.
- [6] Renard, K.G. and Freimund, J.R. (1994) Using Monthly Precipitation Data to Estimate the R Factor in the Revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157, pp. 287-306.
- [7] USDA, (1951). Soil survey manual. In Soil Conservation Service, Soil Survey Staff, U.S. *Dept. of Agricultural handbook* 18. Washington D.C., USA: U.S. Govt. Print Office. pp. 503.
- [8] Alsafadi, K., Bi, S., Abdo, H.G. et al. (2024) Spatial-temporal dynamic impact of changes in rainfall erosivity and vegetation coverage on soil erosion in the Eastern Mediterranean. *Environ Sci Pollut Res* 31, 40511-40529.
- [9] Farhan, Y., Zregat, D., & Farhan, I. (2013). Spatial estimation of soil erosion risk using RUSLE approach, RS, and GIS techniques: A case study of Kufranja watershed, Northern Jordan. *Journal of Water Resource and Protection*, 5, pp.1247-1261.
- [10] Renard, K., Foster, G., Weesies, G., McCool, D. and Yoder, D. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *US Department of Agriculture, Agriculture Handbook No.703*, USDA, Washington DC. pp.704.
- [11] Bridhikitti, A., et al. (2022). Magnitude and factors influencing soil loss and sedimentation in the Mun River Basin, Thailand. *Catena*, 210: pp. 105872.
- [12] Rangsiwanichpong, P. and A.M. Meless. (2022). Analyzing the Benefit-Cost Ratio of Sediment Resources by Remote Sensing Data in the Ping River Basin, Thailand. *Water*, 14(13): pp. 2071.
- [13] Thapa, P. (2020). Spatial estimation of soil erosion using RUSLE modeling: a case study of Dolakha district, Nepal. *Environmental Systems Research*, 9(1): p. 15.
- [14] Land Development Department (2020). Soil erosion in Thailand. *Ministry of Agriculture and Cooperatives*, Bangkok, pp. 31-94
- [15] Sharpley, A.N. and Williams, J.R. (1990). *EPIC Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation*. USA Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1768, USA Government Printing Office, Washington DC.
- [16] McCool, D., Brown, L., Foster, G., & Mutchler, L. (1987). Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)*, 30, pp. 1387-1396.
- [17] Pakoksung, K. (2022). Assessment of Soil Loss from Land Cover Changes in the Nan River Basin, Thailand. *GeoHazards*, 5, pp. 1-21.

- [18] Wischmeier, W., & Smith, D. (1957). Factors affecting sheet and rill erosion. Transactions. *American Geophysical Union*, 38(6), pp. 889–896.
- [19] USDA, (1951). Soil survey manual. In Soil Conservation Service, Soil Survey Staff, *U.S. Dept. of Agricultural handbook* 18. Washington D.C., USA: U.S. Govt. Print Office. pp. 503.
- [20] Rangsiwanichpong, P., Kazama, S., & Gunawardhana, L. (2018). Assessment of sediment yield in Thailand using revised universal soil loss equation and geographic information system techniques. *River Research and Applications*, 34(9), pp.1113–1122.
- [21] Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R. (2011) *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406*. Agricultural Research Service (USDA) & Texas Agricultural Experiment Station, Texas A&M University, Temple.
- [22] Rouse, J.W., Haas, R.W., Schell, J.A., Deering, D.W. and Harlan, J.C. (1974) Monitoring the Vernal Advancements (Greenwave Effect) and Retrogradation of Natural Vegetation. *NASA/GSFCT Type III Final Report*, Texas A & M University, Remote Sensing Center, College Station, pp. 1-137.
- [23] V.Prasannakumar, H. Vijith, S. Abinod, N. Geetha, (2012). Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology, *Geoscience Frontiers*, Volume 3, Issue 2, pp. 209-215.
- [24] Zhang, T.; Lei, Q.; Du, X.; Luo, J.; An, M.; Fan, B.; Zhao, Y.; Wu, S.; Ma, Y.; Liu, H. (2023). Adaptability analysis and model development of various LS-factor formulas in RUSLE model: A case study of Fengyu River Watershed, China. *Geoderma*, 439, pp. 116664.
- [25] Ziwei Liu, Mingchang Wang, Xingnan Liu, Xiaoyue Lyu, Minshui Wang, Fengyan Wang, Xue Ji, Xiaoyan Li, (2024). Spatiotemporal simulation and projection of soil erosion as affected by climate change in Northeast China, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 135, pp. 104305.
- [26] Bhuyan, P. K., Meher, J., & Mohanty, L. (2024). Soil erosion estimation using RUSLE: a case study of Bamnidhi sub basin. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 30(2), pp. 273–280.
- [27] Chen, L., Qian, X., and Shi, Y. (2011). Critical Area Identification of Potential Soil Loss in a Typical Watershed of the Three Gorges Reservoir Region, *Water. Resour. Manage.*, 25, pp. 3445–3463.
- [28] Das, S., Bora, P.K. & Das, R. (2022). Estimation of slope length gradient (LS) factor for the sub-watershed areas of Juri River in Tripura. Model. *Earth Syst. Environ.* 8, pp. 1171–1177.