

**การประยุกต์ใช้ฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์และการตัดสินใจกลุ่มแบบหลายเกณฑ์
เพื่อประเมินความเสี่ยงไฟป่าในพื้นที่ป่าสงวนแห่งชาติของจังหวัดพะเยา**

**Application of Geographic Information Database and Multicriteria Group Decision Making
for Evaluating Forest Fire Risk in National Park Areas of Phayao Province**

วิภาพ แพงวังทอง^{1*} และ อิศระพงศ์ กาดสาริกานต์²

Wipol Paengwangthong^{1*} and Itsarapong Kadsarikan²

^{1*}อาจารย์ และ ²นิสิต หลักสูตรภูมิสารสนเทศศาสตร์ และหน่วยวิจัยเพื่อการพัฒนาพื้นที่

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยา

*Corresponding author: wipol_p@hotmail.com

Received: July 31, 2021

Revised: August 18, 2021

Accepted: August 24, 2021

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ 1) เพื่อสร้างแผนที่เกณฑ์และกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดไฟป่าโดยใช้ฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์และการตัดสินใจกลุ่มแบบหลายเกณฑ์ และ 2) เพื่อวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการจัดลำดับพื้นที่เสี่ยง ภายหลังการสร้างแผนที่เกณฑ์ ค่าน้ำหนักของเกณฑ์ถูกกำหนดด้วยบุคคล 2 กลุ่ม (ชาวบ้านที่อยู่โดยรอบป่าสงวนแห่งชาติและเจ้าหน้าที่ป่าไม้) แผนที่เกณฑ์ทั้ง 5 ถูกซ้อนทับกันเพื่อการรวมคะแนนความเสี่ยง ได้แก่ หมู่บ้าน ถนน ชนิดป่าไม้ อุณหภูมิอากาศ และความลาดชัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ามีความเสี่ยง 3 ระดับ นั่นคือ สูง ปานกลาง และต่ำ ซึ่งคิดเป็นเนื้อที่ร้อยละ 5.36 55.96 และ 38.68 ของพื้นที่ศึกษาทั้งหมด ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าค่าข้อมูลความลาดชันมีผลกระทบมากที่สุดต่อการจัดลำดับความเสี่ยงด้วย

คำสำคัญ: ฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ การตัดสินใจกลุ่มแบบหลายเกณฑ์ การประเมินความเสี่ยงไฟป่า การวิเคราะห์ความอ่อนไหว

Abstract

The objectives of this study were 1) to generate the criterion map and determinate forest fire risk area using geographic information database and multicriteria group decision making and, 2) to analyze sensitivity to ranking the risk areas. After criterion map generation, weights of criteria were determined by two groups (local people living around the national park boundaries and forest officer). 5 criterion maps were overlaid for overall risk scores aggregation e.g., village, road, forest type, air temperature and slope. The result showed that there were three risk levels i.e., high, moderate and low. Their areas further summed up to 5.36 55.96 and 38.68 percent of total, respectively. The result showed also that the slope data value has more effect on the risk ranking.

Keywords: Geographic Information Database, Multicriteria Group Decision Making, Forest Fire Risk Assessment, Sensitivity Analyses

บทนำ

ไฟป่าก่อให้เกิดผลกระทบมากมายหลายด้าน เช่น ความเสียหายต่อทรัพยากรธรรมชาติ ทั้งป่าไม้ ดิน น้ำ สัตว์ป่า เป็นต้น ความเสียหายทางด้านคุณภาพชีวิตของมนุษย์ทั้งทางด้านสุขภาพและการดำเนินชีวิตประจำวัน รวมถึงผลกระทบที่อาจตามมาในด้านความเสียหายทางเศรษฐกิจ ไฟป่าจึงเป็นปัญหาหนึ่งซึ่งปัจจุบันทวีความรุนแรงมากขึ้น

[1] ดังจะเห็นได้จากข้อมูลสถิติของกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช [2] พบว่าพื้นที่ที่ถูกไฟไหม้ในอดีตมีจำนวนลดลง แต่อย่างไรก็ดีในช่วงเวลา 10 ปีที่ผ่านมา มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จากข้อมูลดังกล่าว ปัญหาไฟป่านับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อ การสูญเสีย ระบบนิเวศน์ และปัญหามลพิษทางอากาศ ดังนั้นควรมีการวางแผนเฝ้าระวังรวมถึงป้องกันความรุนแรงของไฟป่า เพื่อลดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและต่อการดำรงชีวิตของสัตว์ป่าและพันธุ์พืช [3]

ปัจจุบัน ฐานข้อมูลในรูปแบบระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System) และการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multicriteria Decision Making) นับว่าเป็นสารสนเทศและเครื่องมือตัดสินใจที่นิยมใช้เพื่อสนับสนุนการวางแผนและการจัดการเชิงพื้นที่ ตัวอย่างเช่น การกำหนดพื้นที่ป่าที่เสี่ยงต่อการถูกบุกรุก [4] การกำหนดพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วม [5] และการกำหนดพื้นที่เสี่ยงภัยแล้ง [6] จากการทบทวนวรรณกรรมพบอีกว่าระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์นิยมใช้เพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดไฟป่าด้วย [1, 7-9] จึงนับว่าสิ่งเหล่านี้เป็นเทคโนโลยีหรือวิธีการที่มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่

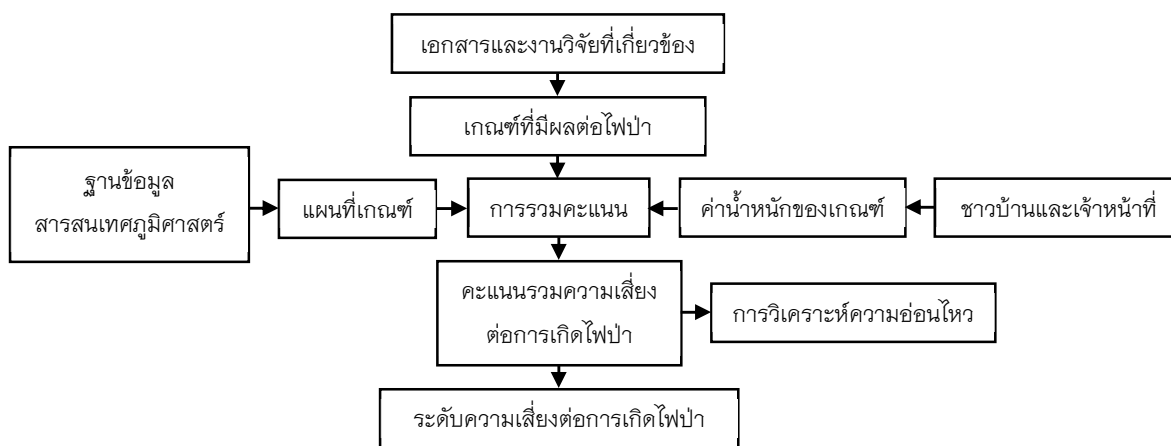
พะเยาเป็นจังหวัดหนึ่งของประเทศไทยที่มีเนื้อที่ป่าไม้จำนวนมากและอุดมสมบูรณ์ ซึ่งหากเกิดปัญหาไฟไหม้ป่าจะทำให้เกิดการสูญเสียพื้นที่ป่าไม้อย่างมาก และมีผลกระทบต่อ การดำรงชีวิตของสัตว์ป่าและพันธุ์พืชอย่างกว้างขวาง ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันการเกิดไฟป่า การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์และการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ร่วมกันในการกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดไฟป่า ซึ่งสามารถใช้เป็นแผนที่ที่ช่วยในการบริหารจัดการรวมถึงการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ป้องกันไฟป่าได้ อย่างไรก็ตามจากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า การกำหนดพื้นที่เสี่ยงส่วนใหญ่กำหนดโดยผู้เชี่ยวชาญ แต่จากการสำรวจภาคสนามและสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่ ปัญหาไฟป่าส่วนใหญ่ในพื้นที่ศึกษาจะมีสาเหตุจากคนจุดไฟเผา สอดคล้องกับผลการศึกษาของเจนณรงค์ชัยศิลป์ [10] ดังนั้นเพื่อให้ผลการศึกษานี้สามารถเข้าถึงสภาพปัญหาของพื้นที่ศึกษามากยิ่งขึ้น การศึกษานี้จึงนำเสนอวิธีการตัดสินใจแบบกลุ่มมาใช้โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ซึ่งที่ได้รับมาจากการสัมภาษณ์กับชาวบ้านที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ที่มีการเกิดไฟป่าและอยู่โดยรอบป่า รวมทั้งเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานป่าไม้ในพื้นที่ด้วย

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการกำหนดระดับความเสี่ยงต่อการเกิดไฟป่า เป็นสิ่งที่นิยมกระทำควบคู่กันไปด้วย โดยที่การวิเคราะห์ความอ่อนไว้นั้นจะกระทำภายใต้สถานการณ์การตัดสินใจบนพื้นฐานของข้อมูลจากแผนที่เกณฑ์และค่าน้ำหนักชุดเดียวกัน เพื่อพิจารณาความแปรปรวนของการตัดสินใจที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นเพื่อความเข้าใจในอิทธิพลของแผนที่เกณฑ์ที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจกำหนดระดับความเสี่ยงดังกล่าว และเพื่อให้การสร้างแผนที่เกณฑ์เหล่านั้นขึ้นมาอย่างระมัดระวังมากยิ่งขึ้นในอนาคต [11, 12] ดังนั้นการศึกษานี้จึงผนวกการวิเคราะห์ความอ่อนไหว ซึ่งจะมีประโยชน์และเป็นแบบอย่างสำหรับการศึกษารั้งถัดไป โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ค่าข้อมูลดิบจากแผนที่เกณฑ์ต่างๆที่ได้จากฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์จะมีผลกับการกำหนดระดับความเสี่ยงของพื้นที่

อุปกรณ์และวิธีการ

กรอบแนวคิดของการศึกษานี้มุ่งเน้นการใช้ฐานข้อมูลที่มีอยู่แล้วในสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการสร้างแผนที่เกณฑ์เป็นตัวแทนของปัจจัยเชิงพื้นที่ที่มีผลต่อการเกิดไฟป่า พื้นที่จังหวัดพะเยาทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส(พิกเซล)ขนาดเล็กเท่ากับ 30x30 เมตร เพื่อพิจารณากำหนดระดับความเสี่ยง ซึ่งสอดคล้องกับรายละเอียดเชิงพื้นที่ของข้อมูลนำเข้า (input data) โดยที่แต่ละพิกเซลจะมีค่าคะแนนความเสี่ยงประจำแต่ละพิกเซล ข้อมูลแต่ละปัจจัยจะอยู่ในรูปของ “แผนที่เกณฑ์” ซึ่งถูกนำมาซ้อนทับกันเพื่อคำนวณค่าคะแนนรวมความเสี่ยงประจำ

พิกเซลอย่างมีการถ่วงน้ำหนัก โดยที่ค่าน้ำหนักของเกณฑ์เหล่านั้นได้มาจากผู้ตัดสินใจแบบกลุ่ม อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะแบ่งช่วงคะแนนรวมความเสี่ยงในแต่ละพิกเซลออกเป็น 3 ระดับ (สูง ปานกลาง และต่ำ) การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าคะแนนรวมดังกล่าวด้วยโดยใช้วิธีการดิงพารามิเตอร์ หรือแผนที่เกณฑ์ออกครั้งละหนึ่งเกณฑ์ต่อการรวมค่าคะแนนหนึ่งครั้ง ซึ่งพิจารณาอยู่บนหลักการที่ว่า “แผนที่เกณฑ์ใดมีอิทธิพลต่อคะแนนความเสี่ยงมาก แผนที่เกณฑ์นั้นจะทำให้เกิดความแปรปรวนของค่าคะแนนรวมความเสี่ยงได้มากเช่นกัน” รายละเอียดของกรอบแนวคิดดังรูปที่ 1 และขั้นตอนวิธีการศึกษามีดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

1. การคัดเลือกและกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ที่มีผลต่อการเกิดไฟฟ้า

การวิจัยครั้งนี้ได้รวบรวมข้อมูลจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อคัดเลือกและจัดเตรียมชั้นข้อมูลแผนที่เกณฑ์ที่ผู้ศึกษาเห็นว่ามีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงต่อการเกิดไฟฟ้า โดยรวบรวมเกณฑ์ที่เคยถูกใช้ในการศึกษาก่อนหน้า [1, 7-9] ซึ่งเกณฑ์ที่ถูกคัดเลือกมานั้นพิจารณาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและการสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่ป่าไม้ในพื้นที่ศึกษาด้วย

ค่าน้ำหนักของแต่ละเกณฑ์ถูกรวบรวมและคำนวณจากข้อมูลที่ได้รับจากการสัมภาษณ์ชาวบ้านที่อยู่โดยรอบป่า 43 คน และเจ้าหน้าที่ป่าไม้ 7 คน ในเรื่อง “ค่าน้ำหนักของเกณฑ์ประเมิน” โดยอาศัยการสุ่มแบบบังเอิญ (Accidental Sampling) ให้ได้กลุ่มตัวอย่างมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ในช่วงเวลาที่ทำการศึกษาภาคสนามระยะเวลา 9 วัน (จังหวัดพะเยามีทั้งหมด 9 อำเภอ สัปดาห์ภาคสนามวันละ 1 อำเภอ) และการสอบถามเชิงเปรียบเทียบทีละคู่ (Pairwise comparison) ตัวอย่างของแบบสอบถามที่ใช้เป็นเครื่องมือสำรวจความคิดเห็นมีรายละเอียดดังตารางที่ 1 โดยผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้คือ ค่าตัวเลขที่แสดงถึงน้ำหนักของเกณฑ์ที่มีผลต่อความเสี่ยง อย่างไรก็ตามค่าเหล่านี้จะถูกปรับค่าให้อยู่ในช่วงเดียวกัน (Normalization) มีพิสัยอยู่ระหว่าง 0.00 – 1.00 ขั้นตอนมีดังนี้

1.1 คำนวณค่าอันดับ (Rank) ของเกณฑ์ประเมินจากคนทั้ง 2 กลุ่ม (ชาวบ้านและเจ้าหน้าที่ป่าไม้) โดยมีกระบวนการขั้นตอนแรก แจกแจงข้อมูลที่ได้รับจากการสำรวจความคิดเห็นลงในตารางที่ 2 จากตัวอย่างจะเห็นได้ว่าค่าตัวเลขที่มีเครื่องหมายดอกจันนั้น หมายถึง เจ้าหน้าที่ 4 คน คิดเห็นว่า ถนน (RD) มีความสำคัญมากกว่า ชุมชน (VL)

1.2 คำนวณค่าน้ำหนัก (Weight) ของเกณฑ์ประเมินจากจำนวนคน โดยมีขั้นตอน คือ นำค่าอันดับที่ได้จากหัวข้อ 1.1 มาหารด้วยค่าพิสัย (Range) ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$\text{Range} = nk - k \quad (1)$$

โดยที่ n คือ จำนวนเกณฑ์ และ k คือ จำนวนคน [13] จากนั้นนำผลลัพธ์ดังกล่าวมาแปลงเป็นค่าน้ำหนัก ดังตัวอย่าง (ตารางที่ 3) ดังนั้นจากขั้นตอนทั้ง 2 ตารางดังกล่าว ค่าน้ำหนักของเกณฑ์ประเมินจะมี 2 ชุด จาก 2 กลุ่มคน ได้แก่ ชาวบ้านและเจ้าหน้าที่ จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อใช้เป็นค่าน้ำหนักของแผนที่เกณฑ์

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการตอบแบบสอบถามในเรื่องค่าน้ำหนักของแต่ละเกณฑ์กำหนดความเสี่ยง

คู่ที่	ปัจจัยแรก	ปัจจัยหลัง	ปัจจัยแรกสำคัญกว่า ปัจจัยหลัง	เท่ากัน	ปัจจัยหลังสำคัญกว่า ปัจจัยแรก
1	ชุมชน	ถนน	(ใช้)	ใช้	ใช้

หมายเหตุ ข้อมูลของตัวอย่างนี้ แสดงว่าผู้ถูกสัมภาษณ์คนนั้นคิดว่า “ปัจจัยด้าน ชุมชน มีความสำคัญต่อการกำหนดพื้นที่เสี่ยง มากกว่าปัจจัยด้าน ถนน”

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการแจกแจงข้อมูลที่ได้จากการสำรวจความคิดเห็นของเจ้าหน้าที่ รวม 7 คน

เกณฑ์	VL	RD	SL	TM	FR
VL	-	4*	2	3	2
RD	3	-	2	2	3
SL	5	5	-	3	4
TM	4	5	4	-	1
FR	5	4	3	6	-
RANK	17	18	11	14	10

หมายเหตุ: Road (RD) คือ ถนน, Village (VL) คือ ชุมชน, Slope (SL) คือ ความชัน, Temperature (TM) คือ อุณหภูมิ และ Forest type (FR) คือ ชนิดป่า

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการคำนวณค่าน้ำหนักของเกณฑ์ประเมิน จากเจ้าหน้าที่ รวม 7 คน

เกณฑ์	RANK	RANK/RANGE	ค่าน้ำหนัก (W)
VL	17	0.61	0.24
RD	18	0.64	0.26
SL	11	0.39	0.16
TM	14	0.50	0.20
FR	10	0.36	0.14
		2.50	1.00

หมายเหตุ $range = nk - k$ [n = จำนวนเกณฑ์, k = จำนวนคน]

2. การสร้างแผนที่เกณฑ์และรวมคะแนนความเสี่ยงต่อไฟฟ้า

การรวบรวมและสร้างแผนที่เกณฑ์ด้วยฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์จากสำนักปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม [14] เพื่อเป็นตัวแทนของทั้ง 5 ปัจจัยที่มีผลต่อความเสี่ยงต่อไฟฟ้า มีขั้นตอนดังรูปที่ 2 โดยแผนที่เกณฑ์จะอยู่ในรูปแบบชั้นข้อมูลกิริติของระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ การสร้างแผนที่เกณฑ์มีรายละเอียดดังนี้

2.1 แผนที่เกณฑ์ที่ 1 และ 2 ถูกสร้างขึ้นด้วยการนำข้อมูลตำแหน่งหมู่บ้าน และเส้นถนน เป็นข้อมูลตั้งต้นในการคำนวณระยะห่างระหว่างวัตถุเหล่านั้นกับทุกพิกเซลที่อยู่ในพื้นที่ศึกษา โดยใช้คำสั่ง Euclidean Distance ในโปรแกรม ArcGIS หลังจากนั้นทำการจัดชั้นข้อมูลใหม่ (Reclassify) ตามเงื่อนไขตารางที่ 4

2.2 แผนที่เกณฑ์ที่ 3 ถูกสร้างขึ้นด้วยการนำข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลขมาคำนวณความลาดชันของแต่ละพิกเซล โดยใช้คำสั่ง Slope ในชุดคำสั่ง Spatial Analyst Tools ของโปรแกรม ArcGIS จากนั้นทำการจัดชั้นข้อมูลใหม่ ตามเงื่อนไขในตารางที่ 4

2.3 แผนที่เกณฑ์ที่ 4 ถูกสร้างขึ้นด้วยการนำข้อมูลอุณหภูมิอากาศเฉลี่ย (ย้อนหลัง 30 ปี) ณ สถานีตรวจวัด (หน่วยเป็นองศาเซลเซียส) ภายในและโดยรอบพื้นที่ศึกษามาทำการประมาณค่าช่วง (Interpolation) โดยใช้คำสั่ง IDW ในชุดคำสั่ง Spatial Analyst Tools ของโปรแกรม ArcGIS จากนั้นทำการจัดชั้นข้อมูลใหม่ ตามเงื่อนไขในตารางที่ 4

2.4 แผนที่เกณฑ์ที่ 5 ถูกสร้างขึ้นด้วยการนำชั้นข้อมูลชนิดป่าไม้ที่อยู่ในรูปแบบชั้นข้อมูลเวกเตอร์ทำการแปลงให้อยู่ในรูปแบบชั้นข้อมูลกริด ตามเงื่อนไขในตารางที่ 4

การรวมค่าคะแนนความเสี่ยงต่อไฟฟ้า อาศัยวิธีการซ้อนทับกันของแผนที่เกณฑ์ทั้งหมดซึ่งอยู่ในรูปแบบชั้นข้อมูลกริด และสมการสำหรับการรวมคะแนนความเสี่ยงในแต่ละพิกเซลมีสูตรดังนี้ [13]

$$\text{Sum} = W_1X_1 + W_2X_2 + W_3X_3 + \dots + W_nX_n \quad (2)$$

โดยที่ Sum คือ ค่าคะแนนรวมความเสี่ยงต่อไฟฟ้า ของแต่ละพิกเซล W_n คือ ค่าน้ำหนักของแต่ละแผนที่เกณฑ์ (จากการสัมภาษณ์ในข้อ 1) และ X_n คือ ค่าคะแนนของแต่ละแผนที่เกณฑ์ (จากการรวบรวมในข้อ 2)

แผนที่ระดับความเสี่ยงต่อไฟฟ้า ถูกสร้างโดยนำค่าคะแนนรวม (Sum) ในแต่ละพิกเซล มาแบ่งช่วงข้อมูลแบบคะแนนเท่ากันทุกช่วงชั้น (Equal Interval) ออกเป็น 3 ระดับ คือ ความเสี่ยงสูง ปานกลาง และต่ำ ตามลำดับคะแนนมากไปหาน้อย

ตารางที่ 4 ค่าคะแนนของแผนที่เกณฑ์ประเมินความเสี่ยงต่อไฟฟ้า

แผนที่เกณฑ์	คุณลักษณะข้อมูล	ค่าคะแนน	แผนที่เกณฑ์	คุณลักษณะข้อมูล	ค่าคะแนน
1. ระยะห่างจากชุมชน (VL)	< 200 เมตร	3	4. อุณหภูมิ (TM)	< 28	3
	1000-2500 เมตร	2		> 28	2
	> 2500 เมตร	1	5. ชนิดป่า (FR)	ป่าผลัดใบ	3
2. ระยะห่างจากถนน (RD)	< 500 เมตร	3		ป่าดงดิบและสวนสัก	2
	501-1000 เมตร	2		ไม่ใช่ป่า	1
	> 1000 เมตร	1	ที่มา: การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องก่อนหน้า		
3. ความลาดชัน (SL)	< 10 %	1			
	10-30 %	2			
	> 30 %	3			

3. การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการกำหนดความเสี่ยงต่อไฟฟ้า

การดึงพารามิเตอร์หรือถอนแผนที่เกณฑ์ออก (Parameter/Map Removal) คือ การถอนหรือดึงแผนที่เกณฑ์ออกไปหนึ่งเกณฑ์ ออกจากการซ้อนทับแล้วรวมค่าคะแนนความเสี่ยงประจำแต่ละพิกเซล โดยจะทำสลับกันจนครบทุกเกณฑ์ คล้ายคลึงกับวิธีการ One-At-a-Time (OAT) method [15]

การเปลี่ยนแปลงของค่าคะแนนรวมความเสี่ยงประจำพิกเซลในพื้นที่ศึกษาทั้งหมดเมื่อมีการถอนแผนที่เกณฑ์ใดๆออกไปนั้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าคะแนนรวมความเสี่ยงเดิม(ที่ไม่มีการดึงออก) ซึ่งสมการสำหรับคำนวณดัชนีความแปรปรวนมีสูตรดังนี้ [16]

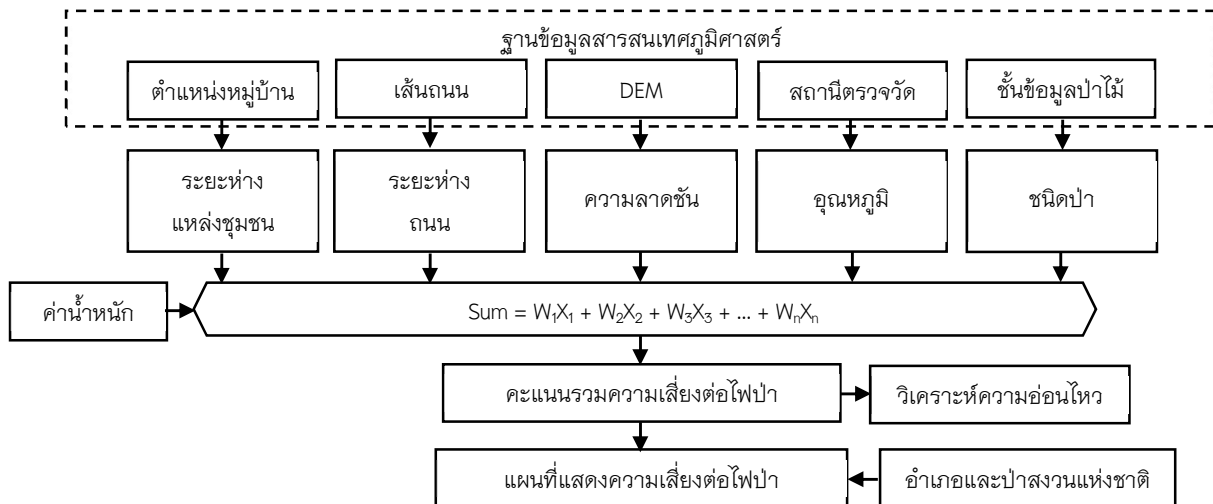
$$\square = \left[\frac{\left[\begin{array}{cc} \square & \square \\ \square & \square \end{array} \right]}{\square} \right] \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ □ คือ ค่าดัชนีความแปรปรวน, □ คือ ค่าคะแนนรวมที่ไม่ถูกรบกวนหรือไม่มีการตีงแผนทีเกณท์ออก, □ คือ ค่าคะแนนรวมทีถูกรบกวนหรือมีการตีงแผนทีเกณท์อันหนึ่งอันใดออก, □ คือ จำนวนของแผนที่เกณท์ทีใช้ค่านวนค่า □ , และ □ คือ จำนวนของแผนที่เกณท์ทีใช้ค่านวนค่า □

ค่าดัชนีความแปรปรวนโดยรวมจากทุกพิกเซลจะถูกแสดงออกมาในรูปของค่าเฉลี่ย ค่ามากที่สุด ค่าน้อยสุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งจะทำให้เห็นว่า ความแปรปรวนทีเกิดขึ้นนันเกิดจากแผนที่เกณท์ใดมากกว่ากัน

4. การวิเคราะห์ซ้อนทับแผนที่ความเสี่ยงต่อไฟฟ้ากับขอบเขตอำเภอและป่าสงวนแห่งชาติ

การซ้อนทับชั้นข้อมูลดำเนินการทีละคู่ ได้แก่ การซ้อนทับระหว่างแผนที่ความเสี่ยงและขอบเขตอำเภอ และการซ้อนทับระหว่างแผนที่ความเสี่ยงและขอบเขตป่าสงวนแห่งชาติ ทั้งนี้เพื่อการแจกแจงข้อมูลเนื้อทีในแต่ละระดับความเสี่ยงของแต่ละอำเภอและป่าสงวนแห่งชาติ การซ้อนทับดังกล่าวอาศัยคำสั่ง Union ในชุดคำสั่ง Analysis Tools ของโปรแกรม ArcGIS พร้อมทั้งทำการคำนวณเนื้อทีในแต่ละรูปลักษณะ (Polygon) หลังจากนั้นทำการเปิดข้อมูลตารางคุณลักษณะ (Attribute table) ด้วยโปรแกรม Excel และใช้คำสั่ง Pivot table เพื่อทำการแจกแจงข้อมูลเนื้อทีในแต่ละอำเภอและป่าสงวนแห่งชาติให้ออกมาอยู่ในรูปของข้อมูลตาราง



รูปที่ 2 ขั้นตอนการศึกษา

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการคัดเลือกและกำหนดค่าน้ำหนักของเกณท์ทีมีผลต่อไฟฟ้า

ผลการคัดเลือกเกณท์ทีมีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงต่อไฟฟ้าซึ่งพิจารณาจากเกณท์ทีเคยถูกใช้ในการศึกษาก่อนหน้าและพิจารณาจากความถี่ทีเกณท์เหล่านั้นถูกใช้รายละเอียดดังตารางที 5 นั้นประกอบกับการสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่ป่าไม้ในพื้นที่ศึกษา ผู้ศึกษาพบว่า เกณท์ทีนิยมใช้และควรนำมาใช้กับพื้นที่ศึกษาแห่งนี้มีทั้งหมด 5 เกณท์ ได้แก่ ระยะห่างจากชุมชน ถนน ความลาดชันของพื้นที่ อุณหภูมิ และชนิดป่า อย่างไรก็ตาม หากมีการเพิ่มจำนวนเกณท์ให้มากขึ้นย่อมส่งผลดีต่อการศึกษา แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดเรื่องฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์ทีมีอยู่ในปัจจุบันและงบประมาณ ผู้ศึกษาจึงเลือกใช้เฉพาะเกณท์ทีเท่าทีจำเป็นเหล่านั้น

ผลการกำหนดค่าน้ำหนักของแผนที่เกณท์ซึ่งถูกคำนวณและรวบรวมข้อมูลโดยการสัมภาษณ์ชาวบ้านทีอยู่โดยรอบพื้นที่ป่า 43 คน และเจ้าหน้าที่ป่าไม้ 7 คน แล้วนำมาหาค่าน้ำหนักสำหรับขั้นตอนถัดไป จากผลการแจกแจงข้อมูลรายละเอียดดังตารางที 2, 3 และ 6 พบว่า การให้ค่าน้ำหนักของบุคคลทั้ง 2 กลุ่ม มีความคิดเห็นสอดคล้องกัน

คือ เกณฑ์ระยะห่างจากถนนและชุมชน มีค่าน้ำหนักมากที่สุด แสดงให้เห็นว่า การเกิดไฟฟ้าในพื้นที่ศึกษาแห่งนี้ เกณฑ์ดังกล่าวเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดไฟฟ้า นอกจากนี้ เกณฑ์ที่มีค่าน้ำหนัก รองลงมาคือ อุณหภูมิ ความลาดชัน และชนิดป่า ตามลำดับ รายละเอียดดังตารางที่ 6

2. ผลการสร้างแผนที่เกณฑ์และรวมคะแนนความเสี่ยงต่อไฟฟ้า

ผลการสร้างแผนที่เกณฑ์ประเมินด้วยฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อเป็นตัวแทนของทั้ง 5 ปัจจัยที่มีผลต่อความเสี่ยงไฟฟ้างบที่ 3 ซึ่งสร้างตามเงื่อนไขการกำหนดคะแนนในตารางที่ 4 แล้ว ภายหลังจากการรวมคะแนนความเสี่ยงประจำพิกเซลโดยอาศัยการซ้อนทับกันของแผนที่เกณฑ์ทั้งหมด พร้อมทั้งรวมคะแนนตามสูตรในสมการที่ 2 ผลการศึกษาขั้นตอนนี้ พบว่า ในจังหวัดพะเยามีพื้นที่เสี่ยงต่อไฟฟ้าสูง เป็นเนื้อที่ 211.34 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 5.36 ของทั้งจังหวัด รายละเอียดอื่นๆดังตารางที่ 7

นอกจากนี้ หากนำเอาชั้นข้อมูลขอบเขตป่าสงวนแห่งชาติมาวิเคราะห์ซ้อนทับร่วมกับแผนที่ระดับความเสี่ยงต่อไฟฟ้าแล้ว พบว่าป่าสงวนแห่งชาติที่มีพื้นที่เสี่ยงสูงคิดเป็นเนื้อที่มากที่สุด คือ ป่าแม่ยม รองลงมาคือ ป่าน้ำเบือย ป่าน้ำหย่วน และป่าน้ำลาว และป่าแม่ต้า ตามลำดับ รายละเอียดอื่นๆดังตารางที่ 8

ตารางที่ 5 การรวบรวมเกณฑ์ประเมินจากเอกสารงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ลำดับ	เกณฑ์ประเมิน	ที่มาของเกณฑ์การประเมิน
1	ระยะห่างจากชุมชน	[1, 8, 10, 17]
2	ระยะห่างจากถนน	[1, 8, 17]
3	ความลาดชัน	[1, 8, 9, 17, 18]
4	อุณหภูมิอากาศ	[1, 7, 18]
5	ชนิดของป่า	[1, 9, 17]
6	พื้นที่ที่เคยเกิดไฟฟ้า	[8]
7	ระยะห่างจากแหล่งน้ำ	[1, 8]
8	ระยะห่างจากขอบเขตป่า	[1]
9	ค่าดัชนีความเปราะบาง	[1]
10	ปริมาณน้ำฝน	[1]

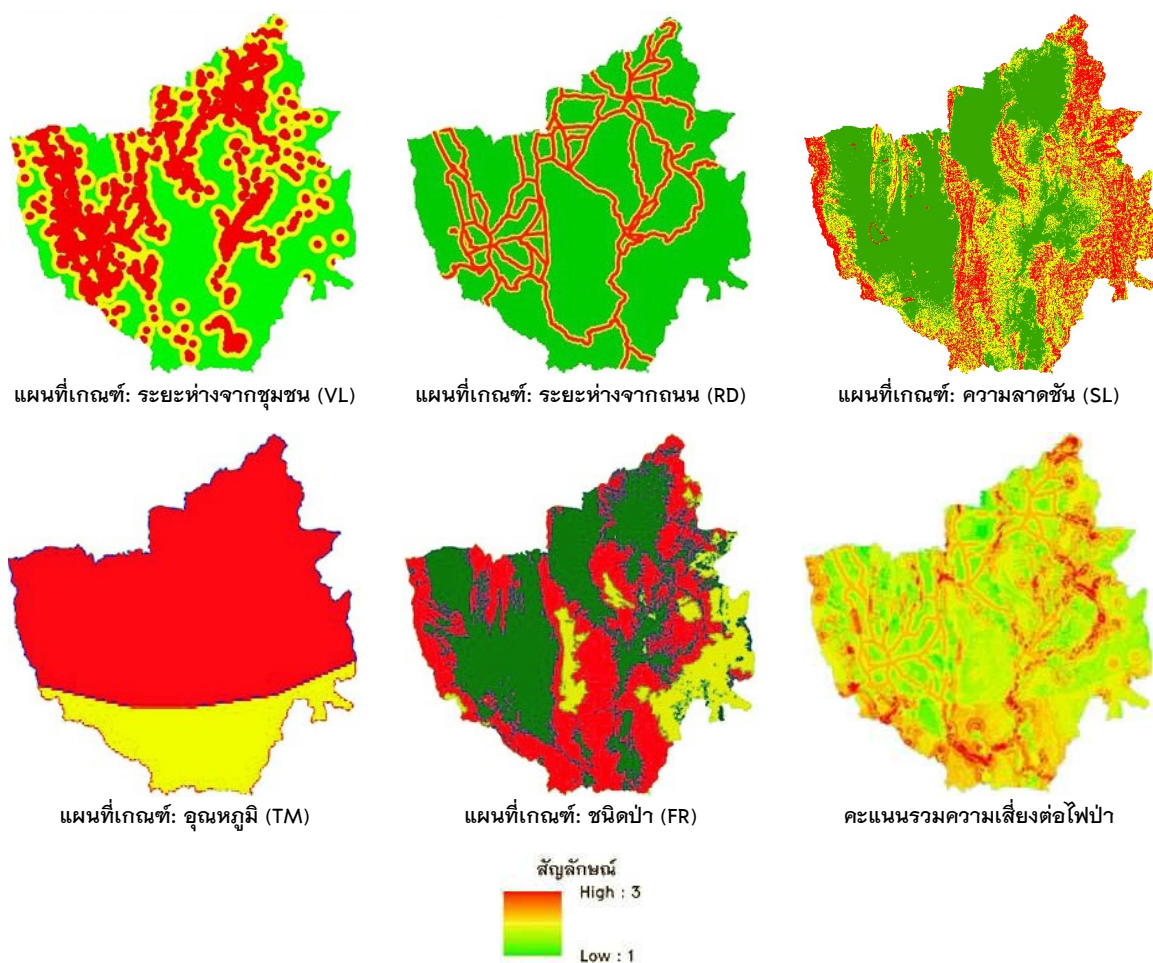
ตารางที่ 6 การแจกแจงข้อมูลที่ได้จากการสำรวจความคิดเห็นของชาวบ้าน 43 คน และค่าน้ำหนักของเกณฑ์

เกณฑ์	VL	RD	WT	EV	SL	เกณฑ์	ชาวบ้าน	เจ้าหน้าที่	ค่าเฉลี่ย
VL	-	24	18	17	14	VL	0.23	0.24	0.24
RD	19	-	15	19	14	RD	0.24	0.26	0.25
SL	25	28	-	21	23	SL	0.17	0.16	0.17
TM	26	24	22	-	11	TM	0.21	0.20	0.20
FR	29	29	20	32	-	FR	0.15	0.14	0.14
RANK	99	105	75	89	62	รวม	1.00	1.00	1.00

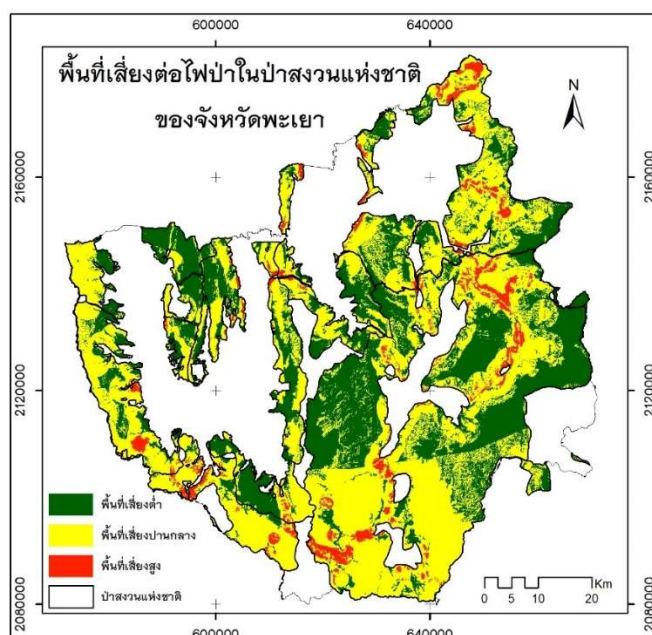
3. ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการกำหนดความเสี่ยงต่อไฟฟ้า

ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการกำหนดความเสี่ยงต่อไฟฟ้าโดยพิจารณาจากดัชนีความแปรปรวนของค่าคะแนนรวมความเสี่ยงประจำพิกเซล พบว่าแผนที่เกณฑ์ที่ทำให้การกำหนดความเสี่ยงดังกล่าวมีค่าความอ่อนไหวมากที่สุด คือ ความลาดชันของพื้นที่ ซึ่งมีค่าดัชนีความอ่อนไหวหรือแปรปรวน (Variation Index) มากที่สุด

เท่ากับ 1.60 รองลงมา คือ ระยะห่างจากถนน ชนิดป่า อุณหภูมิ และระยะห่างจากชุมชน ตามลำดับ โดยที่ค่าเฉลี่ยของดัชนีความแปรปรวน มีค่าเท่ากับ 1.58 1.48 1.43 และ 1.42 ตามลำดับ (ตารางที่ 9)



รูปที่ 3 แผนที่เกณฑ์สำหรับการประเมินความเสี่ยงและคะแนนรวมความเสี่ยงต่อไฟป่า



รูปที่ 4 แผนที่แสดงระดับความเสี่ยงต่อไฟป่าในเขตป่าสงวนแห่งชาติ จังหวัดพะเยา

ตารางที่ 7 ตารางแสดงพื้นที่เสี่ยงต่อไฟป่า 3 ระดับแต่ละอำเภอในจังหวัดพะเยา

อำเภอ	เสี่ยงต่ำ		เสี่ยงปานกลาง		เสี่ยงสูง	
	เนื้อที่	ร้อยละ	เนื้อที่	ร้อยละ	เนื้อที่	ร้อยละ
	(ตร.กม.)		(ตร.กม.)		(ตร.กม.)	
เชียงคำ	169.93	11.15	282.47	12.81	24.75	11.71
เชียงม่วน	89.44	5.87	488.64	22.17	43.08	20.38
เมืองพะเยา	173.75	11.40	330.90	15.01	28.80	13.63
แม่ใจ	70.06	4.60	69.11	3.13	-	-
จุน	91.10	5.98	131.09	5.95	9.64	4.56
ดอกคำใต้	99.11	6.50	178.04	8.08	14.25	6.74
ปง	722.71	47.43	572.44	25.97	65.94	31.20
ภูกามยาว	58.49	3.84	56.92	2.58	3.74	1.77
ภูซาง	49.26	3.23	94.91	4.31	21.15	10.01
รวม	1,523.8	100.00	2,204.5	100.00	211.34	100.00

สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้เป็นการประยุกต์ใช้ฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์และการตัดสินใจกลุ่มแบบหลายเกณฑ์เพื่อกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อไฟป่าภายในเขตป่าสงวนแห่งชาติของจังหวัดพะเยา การศึกษาเริ่มต้นจากการค้นคว้าหาปัจจัย/เกณฑ์ที่มีผลต่อไฟป่าโดยการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและการสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่ป่าไม้ ผลการศึกษาพบว่าทั้งหมด 5 เกณฑ์ที่เหมาะสมกับพื้นที่ศึกษาจังหวัดพะเยา ได้แก่ ระยะห่างจากถนน ชุมชน และแหล่งน้ำ ความสูงและความชันของพื้นที่ หลังจากนั้นทำการกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์ พบว่า เกณฑ์ที่มีค่าน้ำหนักมากที่สุด คือ ระยะห่างจากถนน รองลงมาคือ ระยะจากชุมชน อุณหภูมิ ความลาดชัน และชนิดป่า ตามลำดับ ขั้นตอนต่อมาใช้ฐานข้อมูลสารสนเทศภูมิศาสตร์สร้างแผนที่เกณฑ์เหล่านั้นขึ้น และทำการรวมคะแนนโดยซ้อนทับกันเพื่อรวมคะแนน

ประจำแต่ละฟิสิกเซลล์แล้วทำการแบ่งค่าคะแนนรวมความเสี่ยงจากต่ำไปหาสูง ออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ ความเสี่ยงต่ำ ปานกลาง และสูง อย่างไรก็ตาม ผู้ศึกษาได้ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของการกำหนดพื้นที่เสี่ยงโดยการประยุกต์ใช้ดัชนีความแปรปรวน ผลการวิเคราะห์พบว่า ความลาดชันของพื้นที่ เป็นเกณฑ์ที่มีความอ่อนไหวมากที่สุด หรืออีกนัยหนึ่ง กล่าวได้ว่าค่าคะแนนจากเกณฑ์ความลาดชันมีอิทธิพลต่อการกำหนดพื้นที่เสี่ยงดังกล่าวมากที่สุด และควรระมัดระวังเรื่องความถูกต้องของค่าความลาดชันที่จะนำมาใช้เพื่อการตัดสินใจกำหนดพื้นที่เสี่ยงมากที่สุดด้วย

การศึกษาค้างนี้แตกต่างจากเทคนิควิธีของการศึกษาอื่นซึ่งอาศัยการกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์จากผู้เชี่ยวชาญ แต่การศึกษาค้างนี้มีวิธีการที่สอดคล้องกับสภาพปัญหาของพื้นที่ศึกษา โดยค่าน้ำหนักของเกณฑ์ได้รับมาจากการคิดเห็นของชาวบ้านที่อาศัยอยู่โดยรอบป่าและเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่เสี่ยงต่อไฟป่านั้นควรกระทำด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเจ้าหน้าที่ป่าไม้ได้นำแผนที่ดังกล่าวนี้ไปใช้งานควรมีการตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) ไปพร้อมกันด้วย หรือสำหรับการศึกษาค้างต่อไป เพื่อจะได้นำไปปรับปรุงให้ดีขึ้น

ตารางที่ 8 การแจกแจงระดับความเสี่ยงในเขตป่าสงวนแห่งชาติในจังหวัดพะเยา

สถานที่	เสี่ยงต่ำ	เสี่ยงปานกลาง	เสี่ยงสูง
	เนื้อที่ (ไร่)	เนื้อที่ (ไร่)	เนื้อที่ (ไร่)
ป่าแม่โป่ง	0.44	26.47	2.28
ป่าแม่จาวฝั่งซ้าย	25.94	1,017.16	214.61
ป่าแม่จวน	52,780.07	57,652.90	2,201.56
ป่าแม่ต้า	12,689.54	96,841.91	14,274.80
ป่าแม่ต้าและป่าแม่หาเรือ	42,644.30	109,015.76	7,353.99
ป่าแม่ปืมและป่าแม่ทุ่ง	38,727.17	8,636.40	
ป่าแม่ยม	494,865.32	655,316.02	68,150.35
ป่าแม่ร่องซุย	39,035.70	32,267.46	2,243.29
ป่าแม่ลอยไร่ ป่าสักทอง และป่าน้ำพุ	3,183.68	13,399.63	2,237.54
ป่าแม่ลาวฝั่งขวา ป่าแม่ส้าน และป่าแม่ใจ	14,874.24	35,090.35	
ป่าแม่สอง		0.19	
ป่าแม่ฮ่องบ่อ ป่าห้วยแก้ว และป่าแม่อิงฝั่งซ้าย	37,359.73	37,685.30	2,539.19
ป่าขุนวัง แปลงที่สอง	157.75	344.77	
ป่าขุนวัง แปลงที่หนึ่ง		42.73	
ป่าดอยทาและป่าดอยบ่อส้ม	454.15	226.31	
ป่าดอยบ่อส้มและป่าดอยโป่งนก	10,982.43	14,606.20	2,203.23
ป่าน้ำเปือย ป่าน้ำหยวน และป่าน้ำลาว	89,276.20	178,744.77	24,781.34
ป่าแม่ปืมและป่าดงประตู	13,925.75	10,061.20	155.76
ป่าน้ำแวนและป่าห้วยไคร้	36,410.35	48,603.10	2,625.45
ป่าน้ำยาวและป่าน้ำสวด	12,585.68	7,642.04	
ป่าน้ำหวางฝั่งซ้าย	6.34	43.68	0.76
ป่าห้วยดอกเข็มและป่าแม่อิงฝั่งขวา	39,851.78	56,819.70	2,221.12
ป่าห้วยบงและป่าห้วยเคียน	12,571.63	13,741.86	882.74

ตารางที่ 9 ความอ่อนไหวของค่าคะแนนรวมความเสี่ยงประจำฟิสิกเซลล์

Variation	Parameter removed				
	VL	RD	SL	TM	FR
Mean	1.42	1.58	1.60	1.43	1.48
Maximum	2.30	2.36	2.51	2.40	2.40
Minimum	0.97	0.99	1.03	0.80	1.00
S.D.	0.27	0.24	0.26	0.27	0.26

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาถัดไป ควรมีการศึกษาถึงสาเหตุการเกิดไฟฟ้าเพื่อให้มีการพัฒนาต่อไป เนื่องจากในปัจจุบันปัญหาไฟป่านั้นยังคงมีอยู่อย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการป้องกันและเฝ้าระวังที่ดียิ่งขึ้น การศึกษาครั้งนี้ได้วิเคราะห์ข้อมูลเฉพาะปัจจัยด้านกายภาพเท่านั้น ถ้าต้องการผลลัพธ์ให้ครบถ้วนทุกด้าน ควรประเมินปัจจัยด้านเศรษฐกิจและสังคมร่วมด้วย อย่างไรก็ตาม สามารถนำวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่อื่นๆที่มีปัญหาไฟป่า หรือมีแนวโน้มว่าจะเกิดปัญหารุนแรงในอนาคตได้ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความอ่อนไหวโดยวิธีการตั้งพารามิเตอร์หรือถอนแผนที่เกณฑ์ออก ยังไม่มีการนำมาใช้สำหรับการพิจารณาความแปรปรวนของการตัดสินใจ ความเสี่ยงไฟป่ามากนัก อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ความอ่อนไหวยังคงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งต่อการคัดเลือกเกณฑ์ต่างๆให้เหมาะสมกับงานที่จะทำ รวมถึงทำให้เกิดความระมัดระวังในการคัดเลือกเกณฑ์ไปใช้ในงานต่อไปได้อย่างเหมาะสมด้วย ยิ่งไปกว่านั้น การวิเคราะห์ความอ่อนไหวที่ละพารามิเตอร์ (Single-parameter Sensitivity Analysis) [19] ควรถูกพิจารณานำมาใช้เพิ่มเติมด้วย เพื่อตรวจสอบค่านำหนักและความสอดคล้องระหว่างค่านำหนักทางทฤษฎี และที่ใช้จริงได้ผล (theoretical and effective weight values) [20] ซึ่งจะช่วยให้เราสามารถเพิ่มหรือลดแผนที่เกณฑ์ได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ศึกษาขอขอบคุณ คุณอนุสรณ์ จิตจำเพียร คุณภัทรพล ปงคำเชย และคุณกมล รุ่งมณี เจ้าหน้าที่/ผู้บริหารของสำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดพะเยา และเจ้าหน้าที่ป่าไม้ในเขตป่าสงวนแห่งชาติของจังหวัดพะเยา ตลอดจนชาวบ้านที่อยู่อาศัยในบริเวณพื้นที่ที่มีไฟป่าที่ให้ข้อมูลความคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่อการศึกษานี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุชาติ โภชนวงศ์. (2553). การประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยไฟป่าในประเทศไทย. ส่วนภูมิสารสนเทศ สำนักฟื้นฟูและพัฒนาพื้นที่อนุรักษ์ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2564, จาก <https://www.dnp.go.th/forestfire/2553/forest%20fire%20assessment.pdf>
- [2] กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. (2558). ยุทธศาสตร์/มาตรการแก้ไขปัญหาไฟป่า และหมอกควัน ปี 2561. สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2564, จาก <https://www.dnp.go.th/forestfire/web/frame/2561/Forestfire2561.pdf>
- [3] ศิริภัทร เอี่ยมละออ. (2558). การวิเคราะห์ไฟป่าที่ส่งผลกระทบต่อการท่องเที่ยวในเขตอุทยานแห่งชาติน้ำหนาว. ปริญญาานิพนธ์ (สาขาวิชาภูมิศาสตร์): มหาวิทยาลัยนเรศวร. สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2564, จาก http://www.agi.nu.ac.th/nred/Document/is-PDF/2558/geo_2558_08_FullPaper.pdf
- [4] วิภาพ แสงวังทอง และจันทิมา ธรรมารายณ์, (2564). การกำหนดพื้นที่เสี่ยงต่อการบุกรุกป่าและการวิเคราะห์ความอ่อนไหว: กรณีศึกษาป่าสงวนแห่งชาติในจังหวัดพะเยา. วารสารวิชาการเพื่อการพัฒนาวัตกรรมการแข่งขันพื้นที่, 2(1): 16-27.
- [5] พงศ์พล ปลอดภัย, พรทิพย์ วิมลทรง, ธนา จารุพันธุ์เศรษฐ์, กานต์ธิดา บุญมา, และบุษยมาศ เหมณี. (2563). เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศเพื่อการจัดการพื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมในจังหวัดสุราษฎร์ธานี. วารสารวิชาการเพื่อการพัฒนาวัตกรรมการแข่งขันพื้นที่, 1(2): 59-69.
- [6] วิษณุ เรืองทอง, พงศ์พล ปลอดภัย, และพรทิพย์ วิมลทรง, 2563. การประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการประเมินพื้นที่เสี่ยงภัยแล้งในจังหวัดศรีสะเกษ. วารสารวิชาการเพื่อการพัฒนาวัตกรรมการแข่งขันพื้นที่, 1(2): 24-34.

- [7] มัลลิกา บุญลา และสิริจิตร์ พานิช. (2558). การพิจารณาพื้นที่เสี่ยงไฟฟ้าในเขตกำแพงเพชรและตาก ด้วยเทคนิคดัชนีพืชพรรณและอุณหภูมิพื้นผิว. ปรินูญานิพนธ์ (สาขาวิชาภูมิศาสตร์): มหาวิทยาลัยนเรศวร. สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2564, จาก http://www.agi.nu.ac.th/nred/Document/is-PDF/2557/geo_2557_O10_FullPaper.pdf
- [8] พัฒนะพงษ์ จันทร์คำ. (2550). การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์และการสำรวจระยะไกลประเมินพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดไฟฟ้าในหน่วยจัดการแม่หวดของป่าสาธิตแม่หวด อำเภอวัง จังหวัดลำปาง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต (สาขาการจัดการป่าไม้): มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [9] พงศ์เทพ สุวรรณวาริ. (2554). ผลกระทบของไฟฟ้าต่อความสมบูรณ์ของป่าไม้และคุณภาพอากาศในจังหวัดเชียงใหม่. รายงานวิจัย: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2564, จาก <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/5780/2/fulltext.pdf>
- [10] เจนณรงค์ ชัยศิลป์. (2550). การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ศึกษาพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดไฟฟ้ากรณีศึกษาเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าดอยผาเมือง จังหวัดลำพูนและจังหวัดลำปาง. การค้นคว้าแบบอิสระมหาบัณฑิต (การจัดการมนุษย์กับสิ่งแวดล้อม): มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [11] Majandang, J. (2011). Spatial Assessment of Groundwater Contamination Risk and Protection Zoning in Amphoe Nong Rua, Changwat Khon Kaen. Ph.D. Dissertation, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- [12] Paengwangthong, W. (2012). Geospatial Model for Locating Potential Micro Hydropower Sites in Ungauged Catchments. Ph.D. Dissertation, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.
- [13] Malczewski, J. (1999). GIS and Multicriteria Decision Analysis. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [14] สำนักปลัดกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2558). โครงการจ้างที่ปรึกษาพัฒนาระบบฐานข้อมูลด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมระดับจังหวัดและมีฐานข้อมูลในการติดตามและประเมินผลภายใต้โครงการสร้างความร่วมมือด้านทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมในระดับพื้นที่เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2558. กรุงเทพฯ.
- [15] Pianosi F, Beven K, Freer J, Hall JW, Rougier J, Stephenson DB and Wagener T. Sensitivity analysis of environmental models: a systematic review with practical workflow. Environmental Modelling & Software 2016;79:214–32.
- [16] Babiker IS, Mohamed MAA, Hiyama T and Kato K. A GIS-based DRASTIC Model for assessing aquifer vulnerability in kakamigahara heights, gifu prefecture, central Japan. Science of the Total Environment 2005;345:127–40.
- [17] ชินปัญญา ปลั่งศิริ. (2543). การประเมินพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดไฟฟ้า อุทยานแห่งชาตินาแห้ว จังหวัดเลย. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต (การจัดการทรัพยากรชีวภาพ): มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [18] กรกนก วชิโรภาสันนท์. (2542). การกำหนดพื้นที่เสี่ยงภัยต่อการเกิดไฟฟ้า บริเวณเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม): มหาวิทยาลัยมหิดล,
- [19] Mohammadi K, Niknam R and Majd VJ. Aquifer vulnerability assessment using GIS and fuzzy system: a case study in tehran–karaj aquifer, Iran. Environ Geol 2009;58:437–46.
- [20] Napolitano P and Fabbri AG. Single–parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. Proceedings of IAHS Conference: HydroGIS96. 1996;559–66.