การประเมินลักษณะภัยแล้งของพื้นที่ลุ่มน้ำหลักของประเทศไทยโดยใช้ดัชนีมาตรฐานน้ำฝนร่วมกับฟังก์ชันโคพูลา

Drought Characteristics Assessment of Main River Basins in Thailand Using Standardized Precipitation Index and Copula Function

วินัย เขาวน์วิวัฒน์[1] ปิยธิดา เรืองรัศมี[2,*] และ ธีรวัฒน์ รามอินทรา[3]

[1] ฝ่ายนวัตกรรมสารสนเทศทรัพยากรน้ำ สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) จ.กรุงเทพมหานคร
[3] ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: Piyatida.H@chula.ac.th*

บทคัดย่อ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ภัยแล้งได้สร้างผลกระทบอย่างรุนแรงต่อพื้นที่ลุ่มน้ำหลัก 22 ลุ่มน้ำของประเทศไทย โดยเฉพาะความเสียหายต่อผลผลิตทางการเกษตรและการขาดแคลนน้ำอุปโภคบริโภค อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ทำให้รูปแบบการตกของฝนมีความแปรปรวนและไม่เป็นไปตามฤดูกาล ส่งผลให้การบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำต่างๆ ทำได้ยากและไม่มีประสิทธิภาพ การศึกษานี้ได้วิเคราะห์ลักษณะการแปรผันตามเวลาของดัชนีมาตรฐานน้ำฝน (SPI) ในช่วงเวลา 3 เดือน 6 เดือน 9 เดือน และ 12 เดือน ในสภาพปัจจุบันและอนาคต โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ได้รับการปรับแก้ความคลาดเคลื่อน และใช้ทฤษฎีรันและฟังก์ชันโคพูลาในการกำหนดลักษณะของภัยแล้ง ผลการศึกษาพบว่า ในสภาพปัจจุบัน ภัยแล้งระดับเล็กน้อยมีคาบการเกิดซ้ำประมาณ 13-15 ปีสำหรับ SPI-3 และเพิ่มขึ้นเป็น 25-32 ปีสำหรับ SPI-12 ส่วนภัยแล้งระดับรุนแรงพบมากในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือ ได้แก่ ลุ่มน้ำปิง ลุ่มน้ำวัง ลุ่มน้ำยม และลุ่มน้ำน่าน ขณะที่พบน้อยในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงใต้และภาคกลาง ผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนบริหารจัดการน้ำเชิงพื้นที่โดยกำหนดพื้นที่เสี่ยงและออกแบบโครงสร้างชลประทานที่เหมาะสม พัฒนาระบบเตือนภัยล่วงหน้าที่แยกตามระยะเวลา สนับสนุนการปรับตัวของภาคเกษตรกรรมในพื้นที่เสี่ยง กำหนดนโยบายรองรับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโดยเฉพาะในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือที่มีแนวโน้มเผชิญภัยแล้งรุนแรง รวมถึงการพัฒนาฐานข้อมูลและระบบแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปสู่การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

คำสำคัญ: ดัชนีมาตรฐานน้ำฝน, การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบฟังก์ชันโคพูลา, ระยะเวลาภัยแล้ง, ความรุนแรงภัยแล้ง, คาบการเกิดซ้ำ

Abstract

Over the past decade, drought has severely impacted Thailand's 22 major river basins, particularly affecting agricultural production and domestic water supply. These impacts result from climate change causing irregular and unseasonal rainfall patterns, making water management in river basins difficult and inefficient. This study analyzed temporal variations of the Standardized Precipitation Index (SPI) at 3-, 6-, 9-, and 12-month timescales for present and future conditions, using bias-corrected monthly rainfall data from climate models and employing run theory and copula functions to characterize drought. Results showed that under present conditions, mild droughts have return periods of approximately 13-15 years for SPI-3, increasing to 25-32 years for SPI-12. Severe droughts were found to be more frequent in northern river basins, including the Ping, Wang, Yom, and Nan River Basins, while less frequent in southeastern and central river basins. The findings can be applied to spatial water management planning by identifying risk areas and designing appropriate irrigation structures, developing time-specific early warning systems, supporting agricultural sector adaptation in high-risk areas, implementing climate change policies particularly in northern river basins prone to severe drought, and developing databases and information exchange systems among relevant agencies for efficient and sustainable water resource management.

Keywords: Standardized Precipitation Index, Copula function Joint probability distribution, Drought duration, Drought severity, Return period

1. บทนำ

ภัยแล้งเป็นหนึ่งในภัยพิบัติทางธรรมชาติที่ส่งผลกระทบรุนแรงต่อระบบเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย ซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรมที่พึ่งพาน้ำฝนเป็นหลัก [1] ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ประเทศไทยประสบกับภัยแล้งที่มีความถี่และความรุนแรงเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงปี พ.ศ. 2558-2559 และ พ.ศ. 2562-2563 ซึ่งสร้างความเสียหายต่อภาคเกษตรและการอุปโภคบริโภคอย่างมาก [2] การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลให้รูปแบบการตกของฝนมีความแปรปรวน ทั้งการเลื่อนเวลาเริ่มต้นของฤดูฝนที่ล่าช้าและการกระจายตัวของฝนที่ไม่สม่ำเสมอ [3; 4] แม้ปริมาณน้ำฝนรายปีโดยรวมจะไม่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีช่วงฝนตกหนักและช่วงแล้งยาวนานสลับกัน [5] โดยพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือมีแนวโน้มเผชิญภัยแล้งรุนแรงขึ้นในอนาคต [6]

ดัชนีมาตรฐานน้ำฝน (Standardized Precipitation Index: SPI) เป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการประเมินภัยแล้งทางอุตุนิยมวิทยา เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการประเมินภัยแล้งในหลายมาตราเวลา [7] SPI มีความสอดคล้องกับสภาพความแห้งแล้งที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ [8] และมีความเหมาะสมในการติดตามภัยแล้งในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา [9] อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ด้วย SPI เพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ เนื่องจากภัยแล้งมีลักษณะเป็นพหุตัวแปร [10] ฟังก์ชันโคพูลา (Copula Function) จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ และประเมินคาบการเกิดซ้ำได้แม่นยำยิ่งขึ้น [11; 12] โดยมีการประยุกต์ใช้ในลุ่มน้ำเจ้าพระยา [13] และลุ่มน้ำชี-มูล [14]

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการแปรผันตามเวลาของภัยแล้งในพื้นที่ลุ่มน้ำหลัก 22 ลุ่มน้ำของประเทศไทย โดยใช้ดัชนีมาตรฐานน้ำฝนร่วมกับฟังก์ชันโคพูลาในการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงและความยาวนานของภัยแล้ง นอกจากนี้ ยังวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของลักษณะภัยแล้งในอนาคตภายใต้สถานการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ได้รับการปรับแก้ความคลาดเคลื่อน ผลการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนบริหารจัดการน้ำและการปรับตัวของภาคการเกษตรต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต

2. พื้นที่ศึกษา

การศึกษานี้ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยทั้งหมด ซึ่งตั้งอยู่ระหว่างละติจูดที่ 5° 37' ถึง 20° 27' เหนือ และลองจิจูดที่ 97° 22' ถึง 105° 37' ตะวันออก มีพื้นที่รวมประมาณ 513,120 ตารางกิโลเมตร [15] ลักษณะภูมิประเทศมีความหลากหลาย ประกอบด้วยพื้นที่ราบลุ่มในภาคกลาง ที่ราบสูงในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พื้นที่ภูเขาในภาคเหนือ และพื้นที่ชายฝั่งในภาคตะวันออกและภาคใต้ ความแตกต่างของภูมิประเทศนี้ส่งผลให้แต่ละพื้นที่มีลักษณะภูมิอากาศที่แตกต่างกัน [16] แสดงรายละเอียดของกลุ่มลุ่มน้ำและลุ่มน้ำหลักของประเทศไทย ดังตารางที่ 1 และขอบเขตของลุ่มน้ำหลักของประเทศไทย ดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของกลุ่มลุ่มน้ำและลุ่มน้ำหลักของประเทศไทย

GB		
1	(KH)	(02) 17,435.28 . . (03) 47,161.97 . . (04) 49,273.86 . . (05) 70,943.01 . . (06) 4,148.12 . .
2	(MS)	(01) 19,105.59 . .
3	- (CT)	(06) 34,471.51 . . (07) 10,788.86 . . (08) 23,995.55 . . (09) 34,837.7 . . (10) 20,441.97 . . (11) 4,911.48 . . (12) 15,603.33 . . (13) 13,446.49 . .
4	(EC)	(17) 13,524.29 . .
5	(WC)	(18) - 13,370.96 .¾ (
6	(MK)	(14) 30,228.12 . .

7716.

(Gamma probability distribution) ซึ่งมีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (probability density function) ดังนี้

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (1)$$

โดยที่

x คือ ปริมาณน้ำฝน (x > 0) α คือ พารามิเตอร์รูปร่าง (shape parameter) (α > 0) β คือ พารามิเตอร์สเกล (scale parameter) (β > 0) $\Gamma(\alpha)$ คือ ฟังก์ชันแกมมา

จากนั้นประมาณค่าพารามิเตอร์ α และβ ด้วยวิธีความควรจะเป็นสูงสุด (maximum likelihood estimation):

$$\alpha = \frac{1}{4A}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}\right) \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (3)$$

โดยที่

$$A = ln(\bar{x}) - \frac{\sum ln(x)}{n} \quad (4)$$

เมื่อ $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนและ n คือจำนวนข้อมูลน้ำฝนที่ใช้ในการคำนวณฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (cumulative distribution function) ของการแจกแจงแกมมา:

$$G(x) = \int_0^x g(t)dt = \frac{1}{\Gamma(\alpha)}\gamma(\alpha, \frac{x}{\beta}) \quad (5)$$

โดยที่ $\gamma(\alpha, \frac{x}{\beta})$ คือฟังก์ชันแกมมาไม่สมบูรณ์ (incomplete gamma function)

เนื่องจากการแจกแจงแกมมาไม่นิยามที่ x=0 (กรณีไม่มีฝนตก) จึงต้องปรับฟังก์ชันการแจกแจงสะสมดังนี้:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (6)$$

โดยที่ q คือความน่าจะเป็นที่ปริมาณน้ำฝนเป็นศูนย์

จากนั้นแปลงค่า H(x) ให้เป็นการแจกแจงปกติมาตรฐาน (standard normal distribution) หรือค่า Z-score ซึ่งก็คือค่า SPI

สำหรับ 0<H(x)≤0.50

$$SPI = -(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}) \quad (7)$$

สำหรับ 0.5<H(x)<1.0

$$SPI = +(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}) \quad (8)$$

โดยที่เมื่อ 0<H(x)≤0.5 (ปริมาณฝนต่ำกว่าค่ามัธยฐาน) ใช้สมการ

$$t = \sqrt{ln\left(\frac{1}{H(x)^2}\right)} \quad (9)$$

เมื่อ 0.5<H(x)<1.0 (ปริมาณฝนสูงกว่าค่ามัธยฐาน) ใช้สมการ

$$t = \sqrt{ln\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \quad (10)$$

และค่าคงที่ c_0,c_1,c_2,d_1,d_2,d_3 โดยที่ c_0=2.515517, c_1=0.802853, c_2=0.010328, d_1=1.432788, d_2=0.189269, d_3=0.001308

ค่า SPI ที่คำนวณได้นี้จะสามารถนำมาแปลความหมายเพื่อบ่งชี้สภาวะความแห้งแล้งหรือความชุ่มชื้นได้ดังนี้: SPI > 2.0: ความชุ่มชื้นสูงมาก (Extremely wet) 1.5 ถึง 1.99: ความชุ่มชื้นสูง (Very wet) 1.0 ถึง 1.49: ความชุ่มชื้นปานกลาง (Moderately wet) -0.99 ถึง 0.99: ใกล้เคียงปกติ (Near normal) -1.0 ถึง -1.49: ภัยแล้งปานกลาง (Moderate drought) -1.5 ถึง -1.99: ภัยแล้งรุนแรง (Severe drought) SPI < -2.0: ภัยแล้งรุนแรงมาก (Extreme drought)

3.1.2 ฟังก์ชันโคพูลา

ฟังก์ชันโคพูลา (Copula Function) เป็นเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหลายตัว [17; 12] โดยเฉพาะในการศึกษาลักษณะของภัยแล้ง ฟังก์ชันโคพูลาสามารถใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของภัยแล้ง (Drought Severity) และระยะเวลาของภัยแล้ง (Drought Duration) โดยแบ่งระดับ ม 3

ปล่อยก๊าซเรือนกระจก SSP2.45 และ SSP5.85 ในช่วงอนาคตอันใกล้ (Near future, NF) ค.ศ.2015-2044 ช่วงอนาคตระยะกลาง (Middle future, MF) ค.ศ.2045-2074 ช่วงอนาคตอันไกล (Far future, FF) ค.ศ. 2071-2100 โดยที่สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก SSP2-4.5 เป็นเส้นทางการพัฒนาแบบกลาง โดยมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับปานกลาง ส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนรังสีประมาณ 4.5 W/m² ในปี 2100 และคาดการณ์ว่าอุณหภูมิโลกจะเพิ่มขึ้น 2.7°C ภายในปี 2100 เมื่อเทียบกับยุคก่อนอุตสาหกรรม และ SSP5-8.5 เป็นเส้นทางการพัฒนาที่เน้นการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลอย่างเข้มข้น มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสูง ส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อนรังสีประมาณ 8.5 W/m² ในปี 2100 และคาดการณ์ว่าอุณหภูมิโลกจะเพิ่มขึ้น 4.4°C ภายในปี 2100 เมื่อเทียบกับยุคก่อนอุตสาหกรรม [19] ทั้งนี้แบบจำลองสภาพภูมิอากาศโลกที่ปรับแก้แล้วนี้ได้ทำการปรับแก้โดยใช้เทคนิคการปรับการกระจายตัวของสเกลฝนเชิงพื้นที่ร่วมกับข้อมูลฝนเชิงพื้นที่จากโครงการ Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) ของประเทศไทย

4. ผลการศึกษา

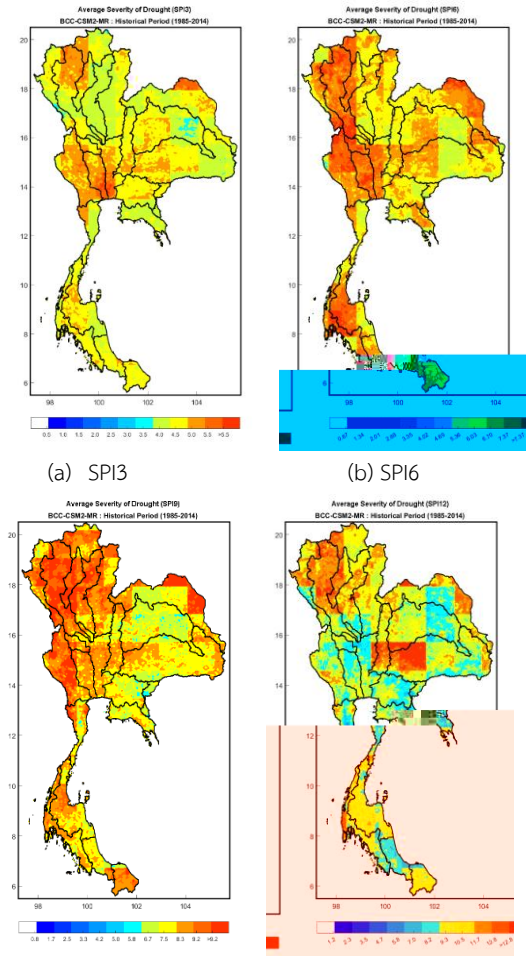
4.1 ลักษณะความรุนแรงของภัยแล้งในช่วงปัจจุบัน

การวิเคราะห์ความรุนแรงของภัยแล้งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ดัชนีมาตรฐานน้ำฝน (SPI) ซึ่งคำนวณจากความแตกต่างของปริมาณน้ำฝนที่ตรวจวัดได้เทียบกับค่าเฉลี่ยในอดีต โดยวิเคราะห์ในช่วงเวลา 3, 6, 9 และ 12 เดือน เพื่อครอบคลุมภัยแล้งทั้งระยะสั้น ระยะกลาง และระยะยาว ร่วมกับฟังก์ชันโคพูลาแบบ Archimedean ประกอบด้วย Clayton, Gumbel-Hougaard และ Frank Copula ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาและความรุนแรงของภัยแล้งได้แม่นยำยิ่งขึ้น โดยแบ่งระดับความรุนแรงเป็น ระดับอ่อน (D3S3), ระดับปานกลาง (D6S6) และระดับรุนแรง (D9S9)

จากการวิเคราะห์ความรุนแรงของภัยแล้งในช่วงปัจจุบัน ดังตารางที่ 2 พบว่า ในช่วง SPI3 มีค่าเฉลี่ยความรุนแรงอยู่ที่ 4.01 โดยกลุ่มลุ่มน้ำภาคใต้ตะวันออกมีค่าสูงสุด (4.75) และชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตะวันออกมีค่าต่ำสุด (3.64) ในช่วง SPI6 มีค่าเฉลี่ย 6.02 ช่วง SPI9 มีค่าเฉลี่ย 8.07 และ SPI12 มีค่าเฉลี่ย 10.64 แบบจำลอง BCC-CSM2-MR ให้ผลใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดจริงมากที่สุดในช่วง SPI3 และ SPI6 ขณะที่โดยรวมแบบจำลองทั้ง 3 มีแนวโน้มประเมินความรุนแรงต่ำกว่าข้อมูลตรวจวัดจริงในช่วง SPI9 และ SPI12 การใช้ดัชนี SPI ร่วมกับฟังก์ชันโคพูลาทำให้เห็นลักษณะเฉพาะของภัยแล้งในแต่ละกลุ่มลุ่มน้ำได้ชัดเจน แสดงความรุนแรงของภัยแล้ง ดังรูปที่ 2 ในช่วง SPI6 (ภัยแล้งระยะกลาง 6 เดือน) มีค่าเฉลี่ยของทุกกลุ่มลุ่มน้ำจากการตรวจวัดจริงอยู่ที่ 6.02 กลุ่มลุ่มน้ำที่มีค่าสูงที่สุดคือ กลุ่มลุ่มน้ำภาคใต้ตะวันออก (ฝั่งอ่าวไทย) ที่ 7.13 ค่าต่ำที่สุด คือ กลุ่มลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำโขงและกลุ่มลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำสาละวิน ที่ 5.11 และ 5.12 ตามลำดับ ในช่วง SPI9 (ภัยแล้งระยะกลาง-ยาว 9 เดือน) มีค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดจริงอยู่ที่ 8.07 และช่วง SPI12 (ภัยแล้งระยะยาว 12 เดือน) ในช่วง SPI12 (ภัยแล้งระยะยาว 12 เดือน) มีค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดจริงอยู่ที่ 10.64

ตารางที่ 2 ความรุนแรงของภัยแล้งในช่วงปัจจุบัน

SPI	GB	Observed	BCC-CSM2-MR	CanESM5	CESM2	
	1	3.60	4.00	4.04	3.88	3.97
SPI3	2	4.03	4.10	4.54	3.66	



(a) SPI3 (b) SPI6

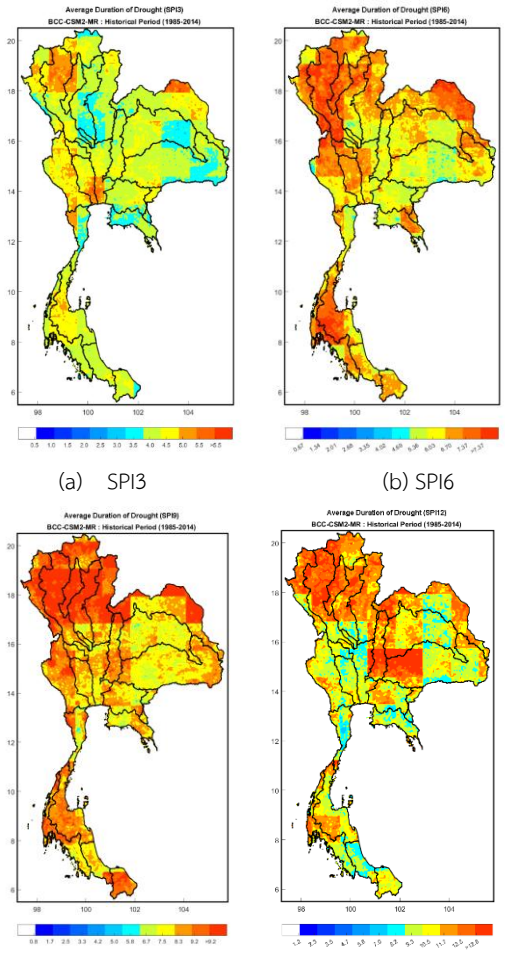
(c) SPI9 (d) SPI12

รูปที่ 2 ความรุนแรงของภัยแล้งช่วง SPI3 จากแบบจำลอง BCC-CSM2-MR ในช่วงเวลาปัจจุบัน

จากการวิเคราะห์ความยาวนานของภัยแล้งในช่วงปัจจุบัน ดังตารางที่ 3 พบว่า ในช่วง SPI3 (ภัยแล้งระยะสั้น 3 เดือน) มีค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดจริง (Observed) อยู่ที่ 4.60 กลุ่มลุ่มน้ำที่มีความยาวนานของภัยแล้งสูงที่สุดคือ กลุ่มลุ่มน้ำภาคใต้ตะวันออก (ฝั่งอ่าวไทย) ที่ 5.37 ต่ำที่สุดคือ กลุ่มลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตะวันออก ที่ 3.71 ผลวิเคราะห์จาก BCC-CSM2-MR สามารถแสดงความรุนแรงของภัยแล้งได้ ดังรูปที่ 3 ในช่วง SPI6 (ภัยแล้งระยะกลาง 6 เดือน) มีค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดจริงอยู่ที่ 7.09 กลุ่มลุ่มน้ำที่มีความยาวนานของภัยแล้งสูงที่สุด คือ กลุ่มลุ่มน้ำภาคใต้ตะวันออก (ฝั่งอ่าวไทย) ที่ 8.72 ต่ำที่สุดคือ กลุ่มลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำโขง ที่ 6.32 ในช่วง SPI9 (ภัยแล้งระยะกลาง-ยาว 9 เดือน) มีค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดจริงอยู่ที่ 9.73 และในช่วง SPI12 (ภัยแล้งระยะยาว 12 เดือน) มีค่าเฉลี่ยจากการตรวจวัดจริงอยู่ที่ 12.98

ตารางที่ 3 ความยาวนานของภัยแล้งในช่วงปัจจุบัน

SPI	GB	Observed	BCC-CSM2-MR	CanESM5	CESM2	เฉลี่ย
SPI3	1	4.12	3.84	4.05	3.65	3.85
	2	5.10	4.41	4.43	3.65	4.16
	3	4.37	4.06	4.80	3.65	4.17
	4	3.71	3.42	3.94	3.09	3.48
	5	4.86	3.63	4.39	3.62	3.88
	6	4.47	4.19	4.70	3.66	4.18
	7	4.50	3.97	4.06	3.47	3.83
	8	5.37	3.92	4.56	4.96	4.48
	9	4.93	4.16	4.64	5.04	4.61
เฉลี่ย		4.60	3.96	4.40	3.86	4.07
SPI6	1	6.32	6.00	6.49	6.01	6.17
	2	6.46	7.79	6.05	6.60	6.81
	3	7.00	6.25	6.75	5.72	6.24
	4	6.95	5.15	5.48	5.12	5.25
	5	6.40	5.48	7.15	6.80	6.48
	6	7.70	6.19	7.14	6.09	6.47
	7	7.35	5.50	7.47	5.16	6.04
	8	8.72	6.71	7.32	7.99	7.34
	9	6.91	7.42	6.23	8.41	7.35
เฉลี่ย		7.09	6.28	6.68	6.43	6.46
SPI9	1	8.15	7.81	7.98	8.03	7.94
	2	10.25	10.14	6.45	8.05	8.22
	3	9.03	9.50	7.22	9.72	8.81
	4	11.85	6.50	8.16	7.72	7.46
	5	9.13	6.05	9.29	8.94	8.09
	6	11.69	8.93	8.16	8.76	8.62
	7	9.87	7.68	10.53	8.35	8.86
	8	10.02	7.83	9.99	10.81	9.54
	9	7.58	6.27	7.39	9.07	7.58
เฉลี่ย		9.73	7.86	8.35	8.83	8.35
SPI12	1	11.04	10.60	10.18	10.03	10.27
	2	16.09	10.43	12.21	9.00	10.55
	3	12.76	11.11	9.65	13.73	11.50
	4	16.10	9.76	10.19	7.94	9.30
	5	8.06	9.81	11.00	10.85	10.55
	6	14.60	8.50	12.46	10.27	10.41
	7	12.42	11.20	11.64	9.40	10.75
	8	14.21	9.35	11.23	10.87	10.48
	9	11.58	8.44	8.06	10.77	9.09
เฉลี่ย		12.98	9.91	10.74	10.32	10.32



(a) SPI3 (b) SPI6

(c) SPI9 (d) SPI12

รูปที่ 3 ความยาวนานของภัยแล้งช่วง SPI3 จากแบบจำลอง BCC-CSM2-MR ในช่วงเวลาปัจจุบัน

4.2 แนวโน้มของความรุนแรงของภัยแล้งในอนาคต

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความรุนแรงของภัยแล้งในลุ่มน้ำหลักของประเทศไทย ได้ใช้แบบจำลองภูมิอากาศ 3 แบบ ได้แก่ BCC-CSM2-MR, CanESM5 และ CESM2 ภายใต้สถานการณ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก SSP2.45 และ SSP5.85 โดยวิเคราะห์ดัชนีภัยแล้งมาตรฐาน (SPI) ที่ช่วงเวลา 3, 6, 9 และ 12 เดือน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 4 เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของความรุนแรงภัยแล้งในอนาคต พบว่าแบบจำลอง BCC-CSM2-MR แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของ SPI3 ในสถานการณ์ SSP2.45 มีความรุนแรงของภัยแล้งลดลงเฉลี่ยร้อยละ 3.82 ในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 1.19 ในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) และลดลงเฉลี่ยร้อยละ 0.34 ในช่วงอนาคตอันไกล (FF) ส่วนในสถานการณ์ SSP5.85 ความรุนแรงของภัยแล้งลดลงเฉลี่ยร้อยละ 7.57 ในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 5.93 ในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) และลดลงเฉลี่ยร้อยละ 8.32 ในช่วงอนาคตอันไกล (FF) ในขณะที่แบบจำลอง CanESM5 ในสถานการณ์ SSP2.45 แสดงความรุนแรงของภัยแล้งเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 3.42 ในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 10.09 ในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) และลดลงเฉลี่ยร้อยละ 5.55 ในช่วงอนาคตอันไกล (FF) ส่วนในสถานการณ์ SSP5.85 ความรุนแรงของภัยแล้งลดลงในทุกช่วงเวลา โดยลดลงมากที่สุดถึงร้อยละ 15.40 ในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) สำหรับแบบจำลอง CESM2 ในสถานการณ์ SSP2.45 แสดงการเพิ่มขึ้นของความรุนแรงภัยแล้งในทุกช่วงเวลา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) ที่เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 19.81 และช่วงอนาคตอันไกล (FF) ที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 13.14 ส่วนในสถานการณ์ SSP5.85 ความรุนแรงของภัยแล้งลดลงเฉลี่ยร้อยละ 2.02 ในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) แต่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 20.96 ในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) และเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 9.89 ในช่วงอนาคตอันไกล (FF)

จากการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มลุ่มน้ำพบว่า กลุ่มลุ่มน้ำภาคใต้ตะวันออก (ฝั่งอ่าวไทย) และกลุ่มลุ่มน้ำภาคใต้ตะวันตก (ฝั่งอันดามัน) มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความรุนแรงภัยแล้งในหลายช่วงเวลาและหลายแบบจำลอง ในขณะที่กลุ่มลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตะวันออกและตะวันตกมีความผันผวนสูง โดยมีทั้งการเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างมากในช่วงเวลาต่างๆ ส่วนกลุ่มลุ่มน้ำที่มีแนวโน้มความรุนแรงของภัยแล้งลดลงมากที่สุดคือ กลุ่มลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำสาละวินและกลุ่มลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน ซึ่งมีแนวโน้มการลดลงในหลายช่วงเวลาและหลายแบบจำลอง

เมื่อการเปรียบเทียบระหว่างสถานการณ์ SSP2.45 และ SSP5.85 พบว่า สำหรับ SPI3 สถานการณ์ SSP2.45 โดยเฉลี่ยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ยกเว้นในแบบจำลอง CESM2 ที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่ SSP5.85 มีความผันผวนมากกว่า โดยเฉพาะในช่วง MF ของแบบจำลอง CESM2 ที่เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20.96 สำหรับ SPI6 สถานการณ์ SSP2.45 มีความหลากหลายระหว่างแบบจำลอง ส่วน SSP5.85 มีความผันผวนสูงมาก โดยเฉพาะในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) สำหรับ SPI9 ทั้งสองสถานการณ์มีความผันผวนสูง แต่ SSP5.85 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนกว่า สำหรับ SPI12 สถานการณ์ SSP2.45 มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความรุนแรงภัยแล้งในช่วง NF ของทุกแบบจำลอง ในขณะที่ SSP5.85 มีความผันผวนสูงมาก

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของความรุนแรงภัยแล้งในอนาคต

(1) SPI3

GCM	GB	SSP2.45			SSP5.85		
		NF	MF	FF	NF	MF	FF
BCC-CSM2-MR	1	-4.03	-9.82	-2.47	-4.93	2.43	-12.57
	2	-14.9	-10.0	-9.99	-6.18	-5.27	-6.99
	3	-6.20	1.94	-3.42	-4.08	13.92	-9.98
	4	-10.5	8.84	4.34	-12.79	13.35	-13.39
	5	4.45	9.25	-0.92	6.61	9.98	-11.44
	6	-5.21	-3.22	-8.43	-17.96	9.51	-17.80
	7	5.11	-4.13	-5.97	-18.97	2.81	-17.35
	8	0.43	5.10	13.71	-4.50	4.86	15.51
	9	-3.35	12.76	10.08	-5.35	1.73	-0.84
Average		-3.82	1.19	-0.34	-7.57	5.93	-8.32
CanESM5	1	-0.7	-11.6	-9.73	-5.32	-4.18	-3.89
	2	3.44	-22.3	-14.0	-28.49	-8.29	-18.84
	3	-12.0	-23.2	-17.4	-25.59	-22.0	-21.98

GCM	GB	SSP2.45			SSP5.85		
		NF	MF	FF	NF	MF	FF
	4	3.48	5.34	0.26	-10.10	5.12	-1.59
	5	-9.82	1.54	-0.88	-26.40	-20.0	-9.59
	6	4.75	-13.7	-9.10	-14.71	-18.3	-13.10
	7	-3.44	-4.56	8.55	-12.97	7.65	5.51
	8	16.83	-7.30	-5.54	-7.66	-3.19	-6.79
	9	28.30	-14.8	-1.98	-7.39	-7.38	-11.82
Average		3.42	-10.0	-5.55	-15.40	-7.86	-9.12
CESM2	1	7.39	-2.04	7.62	-5.53	22.61	19.27
	2	15.08	-2.38	8.08	-2.37	54.90	18.82
	3	20.42	-1.93	11.55	-6.47	24.61	6.29
	4	31.73	10.57	17.40	13.21	31.13	34.37
	5	31.43	15.03	16.01	5.50	20.87	2.38
	6	26.45	-6.87	23.76	0.40	21.96	-3.34
	7	14.09	3.96	16.68	-0.54	14.77	5.84
	8	16.13	9.24	6.93	-8.19	1.83	8.03
	9	15.56	10.55	10.22	-14.18	-4.02	-2.64
Average		19.81	4.01	13.14	-2.02	20.96	9.89

(2) SPI6

GCM	GB	SSP2.45			SSP5.85		
		NF	MF	FF	NF	MF	FF
BCC-CSM2-MR	1	-13.77	-15.20	-11.70	-10.13	-8.02	-14.00
	2	-37.55	-9.39	-30.91	-15.07	-20.6	-28.35
	3	-4.89	3.81	-11.59	-13.06	-8.11	-10.80
	4	8.42	8.89	3.70	-3.64	27.70	-12.78
	5	-3.11	6.02	-5.78	4.79	45.66	-5.27
	6	-20.15	-3.30	-17.66	-21.12	4.99	-7.51
	7	-1.08	-8.21	-12.12	-17.33	12.27	-14.87
	8	-12.92	-4.92	-3.27	-19.07	-4.11	9.17
	9	-31.19	-9.42	-15.78	-25.70	11.96	13.30
Average		-12.92	-3.52	-11.68	-13.37	6.85	-7.90
CanESM5	1	2.03	-11.78	-7.26	17.12	-13.28	-19.09
	2	33.76	-16.24	-12.73	-18.42	-6.74	-20.30
	3	6.90	-19.84	-9.28	-11.25	-23.14	-25.03
	4	3.12	15.38	16.55	-8.72	-0.59	6.38
	5	-9.04	-4.98	-22.72	-28.18	-5.49	-17.98
	6	10.15	-9.61	-14.26	-10.84	-16.9	-10.48
	7	20.00	-16.40	-11.87	-11.82	-23.7	-24.02
	8	10.48	8.49	-10.27	-0.71	4.89	-9.36
	9	9.44	-11.53	8.21	25.59	-9.54	-16.51
Average		9.65	-7.39	-7.07	-5.25	-10.5	-15.16
CESM2	1	15.69	-8.12	12.92	-3.33	19.78	14.03
	2	0.35	-23.34	-9.10	-15.55	28.59	-4.00
	3	25.41	-6.66	19.85	-1.89	55.64	11.35
	4	24.44	21.12	27.97	22.88	69.05	37.51
	5	47.66	0.11	12.17	5.38	4.36	-16.10
	6	15.81	-2.98	31.48	-4.61	32.90	2.42
	7	22.67	1.30	25.16	24.09	45.57	7.55
	8	0.95	6.30	2.69	-14.80	6.66	-8.79
	9	-12.85	-4.12	-9.37	-8.80	-2.13	-26.79
Average		15.57	-1.82	12.64	0.37	28.93	1.91

(3) SPI9

GCM	GB	SSP2.45			SSP5.85		
		NF	MF	FF	NF	MF	FF
BCC-CSM2-MR	1	-13.25	-7.95	-9.05	-2.02	-11.9	-13.93
	2	-49.87	-16.86	-33.38	-21.17	-28.1	-34.80
	3	-4.64	6.20	-15.24	-22.68	-7.13	-8.49
	4	48.69	26.43	23.65	-3.08	48.76	2.92
	5	-8.54	12.39	13.66	0.34	74.01	11.71
	6	-20.27	-16.81	-28.53	-38.14	14.86	-13.06
	7	-5.45	4.90	-15.47	-27.37	32.07	0.65
	8	-9.46	3.73	6.49	-13.45	3.58	15.72
	9	18.78	7.86	45.10	10.06	18.14	42.68
Average		-4.89	2.21	-1.42	-13.06	16.02	0.38
CanESM5	1	0.12	-11.67	-1.75	26.77	1.98	-2.53
	2	28.57	-8.38	8.05	8.76	20.02	9.09
	3	25.13	-7.18	5.88	11.37	5.25	-5.97
	4	18.34	37.90	50.23	12.22	2.55	-0.46
	5	-10.21	7.59	1.17	-2.78	-12.46	-15.24
	6	43.24	-5.44	11.31	-7.03	10.67	-5.02
	7	-13.43	27.67	-24.20	-2.24	-21.5	-29.38
	8	20.73	-1.62	-8.05	-3.30	-10.5	-25.80
	9	47.53	-2.51	28.90	21.50	-11.5	-33.76
Average		17.78	4.04	7.95	7.25	-1.74	-12.12
CESM2	1	-0.66	-10.42	12.26	-14.53	30.24	35.45
	2	20.14	-13.74	15.64	-1.24	12.94	39.00
	3	-1.50	-28.14	0.70	-27.40	16.93	15.97
	4	-3.04	19.83	40.35	-9.65	47.21	21.49
	5	17.95	15.11	22.18	-16.67	26.36	-21.61
	6	14.78	6.38	42.25	-15.52	20.56	-4.19
	7	0.67	-2.78	40.16	-18.28	24.35	-4.28
	8	2.50	-0.64	1.60	-28.38	7.00	-11.96
	9	5.46	8.45	-1.95	-18.59	25.42	-10.64
Average		6.26	-0.66	19.24	-16.70	23.44	6.58

(4) SPI12

GCM	GB	SSP2.45			SSP5.85		
		NF	MF	FF	NF	MF	FF
BCC-CSM2-MR	1	-5.84	-15.03	-15.97	-7.91	0.15	-7.51
	2	-30.02	12.53	-8.32	-21.07	-14.07	-29.97
	3	-8.49	1.14	-0.34	-26.73	2.70	6.35
	4	26.42	3.04	-17.91	-13.73	116.10	9.94
	5	-5.36	-15.82	13.77	-5.26	154.85	27.30
	6	29.53	-1.83	12.72	3.02	91.34	41.49
	7	-14.98	-9.40	-8.78	-12.65	31.43	6.26
	8	6.56	8.79	17.71	11.27	5.51	21.39
	9	23.69	-2.55	-4.80	19.48	32.26	62.69
Average		2.39	-2.13	-1.33	-5.95	46.70	15.33
CanESM5	1	11.00	-7.50	-1.79	44.07	10.70	10.07
	2	3.39	-35.88	-21.70	-13.11	22.71	-11.67
	3	35.37	-13.66	-1.64	19.87	32.97	6.73

GCM	GB	SSP2.45			SSP5.85		
		NF	MF	FF	NF	MF	FF
	4	15.53	16.51	23.18	16.00	2.84	-9.51
	5	-4.24	15.76	-6.71	36.38	3.53	-6.67
	6	15.19	-18.78	-25.29	-6.74	2.82	-22.90
	7	12.21	19.16	-9.88	-3.45	-9.49	-33.00
	8	23.71	-10.31	-15.52	-2.13	3.61	-21.53
	9	89.30	26.74	44.88	53.19	22.45	5.13
Average		22.39	-0.88	-1.61	16.01	10.24	-9.26
CESM2	1	27.03	8.43	24.80	-2.95	18.49	32.50
	2	-0.70	-28.43	-30.67	-30.96	-43.47	12.95
	3	-5.94	-15.01	14.78	-26.43	6.91	-3.37
	4	26.06	12.29	27.03	-11.71	22.68	-15.16
	5	7.61	13.97	9.67	10.81	25.46	1.50
	6	28.03	31.67	68.83	10.54	38.96	12.16
	7	58.58	45.33	58.78	28.74	57.96	29.58
	8	16.15	10.93	19.09	-7.35	43.36	28.92
	9	98.46	45.33	88.60	53.08	91.50	59.85
Average		28.37	13.84	31.21	2.64	29.09	17.66

4.3 แนวโน้มของความยาวนานของภัยแล้งในอนาคต

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความยาวนานของภัยแล้ง ดังตารางที่ 5 พบว่า ในอนาคตสำหรับ SPI3 (ภัยแล้งระยะสั้น) แบบจำลอง BCC-CSM2-MR ในสถานการณ์ SSP2.45 แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจนนัก โดยมีค่าเฉลี่ยของความยาวนานลดลงเล็กน้อยในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) (-0.86%) และช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) (-1.03%) แต่เพิ่มขึ้นในช่วงอนาคตอันไกล (FF) (4.20%) ส่วนในสถานการณ์ SSP5.85 พบว่าความยาวนานลดลงอย่างชัดเจนในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) (-10.56%) แต่เพิ่มขึ้นมากในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) (15.42%) และลดลงเล็กน้อยในช่วงอนาคตอันไกล (FF) (-3.46%) ในขณะที่แบบจำลอง CanESM5 ในสถานการณ์ SSP2.45 แสดงการลดลงของความยาวนานเล็กน้อยในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) (-0.48%) แต่ลดลงชัดเจนในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) (-8.33%) และช่วงอนาคตอันไกล (FF) (-8.74%) สำหรับสถานการณ์ SSP5.85 พบว่าความยาวนานลดลงในทุกช่วงเวลา โดยเฉพาะในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) (-13.12%) และช่วงอนาคตอันไกล (FF) (-12.49%) ส่วนแบบจำลอง CESM2 แสดงการเพิ่มขึ้นของความยาวนานในทุกช่วงเวลาของทั้งสองสถานการณ์ โดยเฉพาะในสถานการณ์ SSP2.45 ที่เพิ่มขึ้นสูงในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) (33.75%) และช่วงอนาคตอันไกล (FF) (22.68%)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มลุ่มน้ำ พบว่า กลุ่มลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลอ่าวไทยตะวันออกและตะวันตกมักมีการเปลี่ยนแปลงของความยาวนานที่มากกว่ากลุ่มอื่นๆ โดยเฉพาะในแบบจำลอง CESM2 กลุ่มลุ่มน้ำภาคใต้ (ทั้งฝั่งอ่าวไทยและอันดามัน) มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความยาวนานในหลายช่วงเวลาและหลายสถานการณ์ โดยเฉพาะในช่วงอนาคตอันไกล (FF) กลุ่มลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำสาละวินมักมีการลดลงของความยาวนานในแบบจำลอง BCC-CSM2-MR และ CanESM5 แต่เพิ่มขึ้นในแบบจำลอง CESM2

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสถานการณ์ SSP2.45 และ SSP5.85 พบว่าสถานการณ์ SSP5.85 มักแสดงความผันผวนที่สูงกว่า โดยเฉพาะในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) ที่หลายกลุ่มลุ่มน้ำมีการเพิ่มขึ้นของความยาวนานอย่างมาก ในขณะที่ SSP2.45 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่สม่ำเสมอกว่า โดยเฉพาะในแบบจำลอง CESM2 ที่แสดงการเพิ่มขึ้นในทุกช่วงเวลา

ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของความยาวนานของภัยแล้งในอนาคต

(1) SPI3

GCM	GB	SSP2.45			SSP5.85		
		NF	MF	FF	NF	MF	FF
BCC-CSM2-MR	1	3.73	-9.38	4.23	-0.55	16.47	-7.05
	2	-25.78	-12.54	-10.38	-11.89	-9.87	-6.77
	3	-4.00	3.93	4.77	-7.98	20.22	-7.72
	4	-4.70	-1.77	13.57	-9.32	41.45	-5.44
	5	8.57	11.91	7.26	-1.46	28.61	-2.89
	6	-0.14	8.71	7.31	-22.02	28.28	-10.58
	7	13.85	-13.27	-2.59	-20.98	19.72	-7.79
	8	1.61	0.88	12.03	-10.22	1.17	20.84
	9	-0.84	2.26	1.59	-10.63	-7.30	-3.76
Average		-0.86	-1.03	4.20	-10.56	15.42	-3.46
CanESM5	1	0.68	-9.91	-8.84	-3.63	-4.17	-6.75
	2	2.26	-26.96	-23.08	-25.56	-10.40	-18.80
	3	-14.40	-26.27	-24.04	-24.81	-20.77	-24.50
	4	2.33	9.75	-2.69	-7.16	2.33	-11.15
	5	-9.65	10.03	1.73	-19.06	-19.73	-6.99
	6	3.55	-20.64	-19.37	-20.53	-26.06	-19.37
	7	-6.61	1.20	2.19	-9.06	8.31	1.45
	8	7.86	-2.00	-3.77	-5.16	0.32	-8.28
	9	9.65	-10.15	-0.79	-3.08	-6.67	-18.03
Average		-0.48	-8.33	-8.74	-13.12	-8.54	-12.49
CESM2	1	20.28	6.35	14.75	1.82	34.04	31.02
	2	18.52	-1.29	7.62	6.63	63.46	12.81
	3	29.84	3.95	13.44	-1.42	31.89	11.28
	4	60.92	35.60	35.60	23.74	55.56	56.81
	5	52.03	35.14	23.66	2.44	24.39	6.20
	6	45.87	14.74	38.36	14.87	33.22	7.30
	7	35.50	20.77	33.73	11.20	33.66	18.52
	8	18.51	11.24	14.55	-14.08	11.21	13.69
	9	22.29	12.50	22.43	-15.78	8.89	-0.74
Average		33.75	15.44	22.68	3.27	32.92	17.43

(2) SPI6

GCM	GB	SSP2.45			SSP5.85		
		NF	MF	FF	NF	MF	FF
BCC-CSM2-MR	1	-5.41	-6.35	-2.45	1.13	3.46	-3.68
	2	-31.83	-5.86	-31.67	-14.80	-15.48	-27.25
	3	2.43	7.30	-4.31	-11.58	-4.28	-5.45
	4	1.60	-4.37	8.92	-7.19	38.50	-4.64
	5	5.84	10.25	-2.24	6.32	60.18	3.41
	6	-7.43	13.08	-4.87	-10.83	30.00	7.02
	7	1.09	-9.09	-6.58	-14.94	28.85	-6.06

GCM	GB	SSP2.45			SSP5.85		
		NF	MF	FF	NF	MF	FF
	8	-4.29	-6.92	-11.85	-13.47	-1.84	16.46
	9	-22.64	-7.51	-19.65	-16.99	16.04	18.44
Average		-6.74	-1.05	-8.30	-9.15	17.27	-0.20
CanESM5	1	-5.30	-10.62	-4.58	19.29	-13.10	-21.11
	2	43.03	-4.43	-5.65	-11.57	-4.72	-15.09
	3	4.15	-17.49	-9.03	-6.19	-21.57	-26.34
	4	-4.96	27.74	31.54	6.68	3.41	8.73
	5	-13.54	4.90	-19.08	-24.15	7.44	-15.55
	6	2.90	-10.17	-22.22	-9.91	-19.77	-15.44
	7	0.35	-13.03	-10.80	-1.24	-19.72	-21.26
	8	4.06	12.67	-9.92	3.73	17.88	-7.07
	9	4.00	2.53	8.92	32.04	5.99	-20.86
Average		3.86	-0.88	-4.54	0.96	-4.91	-14.89
CESM2	1	32.38	-3.35	11.05	6.75	29.25	17.62
	2	5.34	-14.14	-8.05	-2.42	30.47	-6.18
	3	40.34	-2.95	15.59	5.21	67.64	15.42
	4	40.57	41.09	38.41	31.51	93.05	47.08
	5	70.17	13.64	27.88	15.44	16.98	2.94
	6	38.26	9.45	34.33	1.24	51.41	22.45
	7	55.04	16.28	34.11	45.81	74.42	26.71
	8	-1.07	8.43	9.27	-13.17	14.10	-5.12
	9	-12.82	1.64	2.34	-9.90	9.82	-23.34
Average		29.80	7.79	18.32	8.94	43.02	10.84

(3) SPI9

GCM	GB	SSP2.45			SSP5.85		
		NF	MF	FF	NF	MF	FF
BCC-CSM2-MR	1	-9.28	0.67	-1.24	11.69	-4.41	-8.80
	2	-39.33	-6.60	-29.27	-8.95	-9.71	-30.99
	3	0.34	3.61	-13.27	-18.52	-0.78	-12.81
	4	25.79	9.23	17.95	-9.54	41.88	-0.31
	5	1.32	15.00	18.15	8.27	90.23	26.03
	6	-7.50	-7.09	-16.29	-30.04	36.73	-6.72
	7	-8.28	0.68	-18.27	-23.92	31.76	-2.40
	8	1.74	3.82	-1.77	-3.49	5.65	25.91
	9	35.51	16.91	42.54	37.90	29.93	52.33
Average		0.03	4.03	-0.16	-4.07	24.59	4.70
CanESM5	1	-8.50	-8.71	-1.13	20.09	4.01	-2.49
	2	23.08	-1.65	7.75	13.87	34.79	14.08
	3	20.61	-0.34	6.54	14.74	18.25	-4.01
	4	-1.94	41.38	58.48	37.72	3.51	0.65
	5	-19.30	12.66	4.01	1.90	-11.23	-13.92
	6	34.84	-5.44	7.10	-8.36	15.09	-7.19
	7	-32.99	29.99	-29.66	2.06	-19.05	-21.34
	8	10.87	5.30	-7.35	-3.81	-4.41	-27.53
	9	42.63	21.80	48.87	35.34	12.78	-27.01
Average		7.70	10.55	10.51	12.62	5.97	-9.86
CESM2	1	14.16	-8.15	9.36	-5.01	44.78	39.86
	2	24.18	-14.56	7.03	-1.27	3.73	27.10
	3	8.66	-29.80	-7.92	-27.42	20.05	10.55
	4	13.31	30.26	41.68	-6.41	54.47	25.18
	5	27.55	22.33	34.27	-17.42	35.01	4.77
	6	36.91	8.05	39.05	-25.02	27.79	-3.02
	7	27.46	-4.23	41.42	-17.83	32.49	0.91
	8	4.36	4.59	11.79	-22.00	9.51	-8.65
	9	20.59	26.47	14.36	-4.80	52.94	2.94
Average		19.69	3.89	21.23	-14.13	31.20	11.07

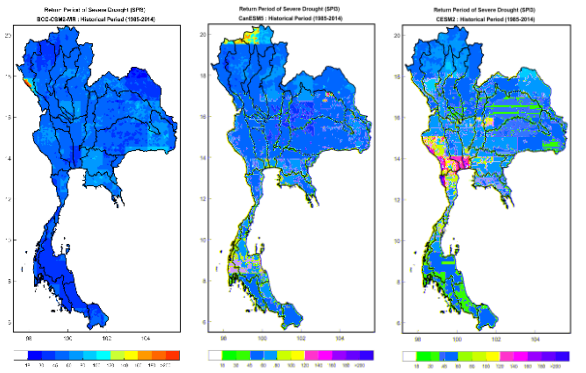
(4) SPI12

GCM	GB	SSP2.45			SSP5.85		
		NF	MF	FF	NF	MF	FF
BCC-CSM2-MR	1	-5.20	-11.23	-10.30	1.50	3.91	-6.47
	2	-15.72	15.75	0.40	-7.49	4.28	-26.32
	3	-3.01	-1.71	2.73	-17.65	8.29	2.31
	4	3.14	-12.05	-24.90	-21.14	96.85	-3.01
	5	-1.69	-23.06	10.74	-2.88	137.31	30.13
	6	38.66	-5.26	14.19	7.96	91.76	31.22
	7	-25.60	-13.34	-18.07	-10.19	13.32	-12.50
	8	17.20	8.97	8.30	21.58	8.49	31.26
	9	25.19	-2.15	-6.95	45.26	27.89	54.86
Average		3.66	-4.90	-2.65	1.88	43.57	11.28
CanESM5	1	-3.19	-3.70	-6.25	23.84	7.65	6.19
	2	-14.62	-36.84	-30.19	-24.27	19.03	-16.68
	3	23.27	-6.93	-4.19	10.15	39.99	6.45
	4	-12.41	23.68	35.32	27.61	-1.19	-5.30
	5	-16.97	19.48	0.00	39.67	4.85	3.98
	6	-8.38	-14.56	-29.89	-10.01	4.89	-23.32
	7	-16.26	22.23	-8.55	-6.67	-8.74	-23.56
	8	14.17	0.00	-7.09	3.47	12.94	-17.22
	9	81.91	66.96	89.86	72.52	54.56	30.65
Average		5.28	7.81	4.34	15.15	14.89	-4.31
CESM2	1	52.82	11.59	23.52	2.14	19.27	26.47
	2	-6.75	-29.84	-37.01	-17.64	-44.05	0.80
	3	9.42	-12.06	5.42	-25.53	9.31	-7.84
	4	36.76	15.60	32.77	-6.65	22.93	17.15
	5	5.84	21.00	23.25	8.44	32.47	2.35
	6	67.55	42.39	65.78	24.62	40.07	18.35
	7	120.62	66.78	61.02	43.43	62.20	29.35
	8	14.76	17.25	28.18	-0.77	34.65	32.42
	9	134.13	66.78	83.00	60.73	62.20	62.50
Average		48.35	22.16	31.77	9.86	26.56	20.17

4.4 คาบการเกิดภัยแล้งในอนาคต

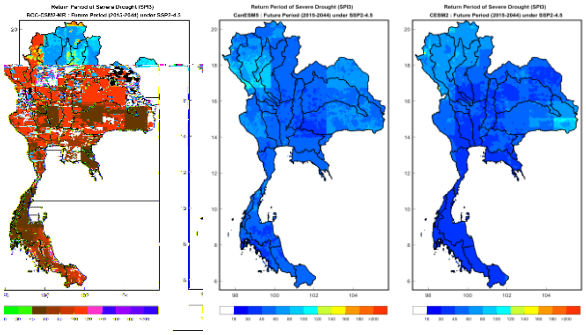
จากการวิเคราะห์คาบการเกิดภัยแล้งในปัจจุบัน และอนาคตจากแบบจำลอง BCC-CSM2-MR แสดงคาบการเกิดภัยแล้งระดับรุนแรง (D9S9) ในปัจจุบัน และอนาคต ดังรูปที่ 4 ถึง 6 และตารางที่ 6 พบว่า ในสถานการณ์ SSP2.45 ภัยแล้งระดับรุนแรง (D9S9) ในช่วง SPI3 มีคาบการเกิดเพิ่มขึ้นจาก 53 เดือนในช่วงปัจจุบันเป็น 87 เดือนในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) แต่

ลดลงเหลือ 60 เดือนในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) และ 52 เดือนในช่วงอนาคตอันไกล (FF) ส่วนในสถานการณ์ SSP5.85 คาบการเกิดเพิ่มขึ้นเป็น 69 เดือนในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) แต่ลดลงเหลือ 51 เดือนในช่วงอนาคตอันไกล (FF) สำหรับภัยแล้งระยะกลางและยาว (SPI6, SPI9, SPI12) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในทุกระดับความรุนแรงและทุกช่วงเวลา โดยเฉพาะในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) ของสถานการณ์ SSP5.85



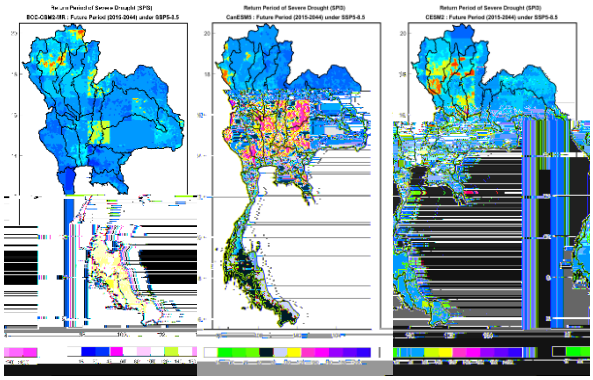
(a) BCC-CSM2-MR (b) CanESM5 (c) CESM2

รูปที่ 4 คาบการเกิดภัยแล้งระดับรุนแรง (D9S9) ช่วง SPI3 จากแบบจำลอง BCC-CSM2-MR CanESM5 และ CESM2 ในช่วงเวลาปัจจุบัน



(a) BCC-CSM2-MR (b) CanESM5 (c) CESM2

รูปที่ 5 คาบการเกิดภัยแล้งระดับรุนแรง (D9S9) ช่วง SPI3 จากแบบจำลอง BCC-CSM2-MR ในสถานการณ์ SSP2.45



(a) BCC-CSM2-MR (b) CanESM5 (c) CESM2

รูปที่ 6 คาบการเกิดภัยแล้งระดับรุนแรง (D9S9) ช่วง SPI3 จากแบบจำลอง BCC-CSM2-MR ในสถานการณ์ SSP5.85

แบบจำลอง CanESM5 แสดงแนวโน้มที่น่าสนใจสำหรับภัยแล้งระดับรุนแรง (D9S9) ในช่วง SPI3 ของสถานการณ์ SSP2.45 ที่เพิ่มขึ้นจาก 54 เดือนในช่วงปัจจุบันเป็น 74 เดือนในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) และเพิ่มขึ้นเป็น 71 เดือนในช่วงอนาคตอันไกล (FF) ในสถานการณ์ SSP5.85 คาบการเกิดเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 77 เดือนในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) แล้วลดลงเหลือ 57 เดือนในช่วงอนาคตอันไกล (FF) ภัยแล้งระยะกลางและยาว (SPI6, SPI9, SPI12) มีคาบการเกิดเพิ่มขึ้นในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) และช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) แต่ลดลงในช่วงอนาคตอันไกล (FF) โดยเฉพาะในสถานการณ์ SSP5.85

แบบจำลอง CESM2 แสดงรูปแบบที่แตกต่างสำหรับภัยแล้งระดับรุนแรง (D9S9) ในช่วง SPI3 โดยในสถานการณ์ SSP2.45 คาบการเกิดลดลงจาก 63 เดือนในช่วงประวัติศาสตร์เหลือ 45 เดือนในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) แล้วเพิ่มขึ้นเป็น 57 เดือนในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) และ 61 เดือนในช่วงอนาคตอันไกล (FF) ในสถานการณ์ SSP5.85 คาบการเกิดเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 79 เดือนในช่วง NF แล้วลดลงเหลือ 59 และ 55 เดือนในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) และช่วงอนาคตอันไกล (FF) ตามลำดับ สำหรับภัยแล้งระยะยาว (SPI12) ในทุกระดับความรุนแรงมีแนวโน้มคาบการเกิดลดลงในทั้งสองสถานการณ์

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง BCC-CSM2-MR และ CanESM5 มีแนวโน้มคาบการเกิดที่คล้ายคลึงกันสำหรับภัยแล้งระดับอ่อน (D3S3) และปานกลาง (D6S6) โดยมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเทียบกับช่วงประวัติศาสตร์ แต่สำหรับภัยแล้งระดับรุนแรง (D9S9) แบบจำลอง BCC-CSM2-MR แสดงการเพิ่มขึ้นในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) ของทั้งสองสถานการณ์ ในขณะที่แบบจำลอง CanESM5 แสดงการเพิ่มขึ้นในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) และช่วงอนาคตอันไกล (FF) แบบจำลอง CESM2 มีคาบการเกิดที่สูงกว่าอีกสองแบบจำลองในภัยแล้งระยะยาว (SPI9, SPI12) ในช่วงประวัติศาสตร์ แต่มีแนวโน้มลดลงในอนาคต

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยจากทั้ง 3 แบบจำลอง พบว่าคาบการเกิดภัยแล้งระดับรุนแรง (D9S9) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงอนาคตอันใกล้ (NF) และ MF แล้วลดลงในช่วงอนาคตอันไกล (FF) ของทั้งสองสถานการณ์ โดยเฉพาะในสถานการณ์ SSP5.85 ที่มีความผันผวนสูงกว่า สำหรับภัยแล้งระดับอ่อน (D3S3) และปานกลาง (D6S6) มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก โดยเฉลี่ยแล้วคาบการเกิดภัยแล้งระยะสั้น (SPI3) มีความผันผวนมากกว่าภัยแล้งระยะยาว (SPI12)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสถานการณ์ SSP2.45 และ SSP5.85 พบว่าสถานการณ์ SSP5.85 มักแสดงคาบการเกิดที่สูงกว่าในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) โดยเฉพาะสำหรับภัยแล้งระดับรุนแรง (D9S9) แต่ในช่วงอนาคตอันไกล (FF) สถานการณ์ SSP2.45 กลับมีคาบการเกิดที่สูงกว่าในหลายกรณี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสถานการณ์ SSP5.85 อาจนำไปสู่ภัยแล้งที่มีความถี่สูงในระยะกลาง แต่อาจลดลงในระยะยาว

ตารางที่ 6 คาบการเกิดภัยแล้งในอนาคต

GCM	SPI MONTH	Type	Category of drought	Hist	ssp245			ssp585		
					NF	MF	FF	NF	MF	FF
BCC-CSM2-MR	SPI3	D3S3	Weak	14	13	14	14	14	15	14
		D6S6	Strong	29	29	31	26	29	29	31
		D9S9	Severe	53	87	60	52	69	51	56
	SPI6	D3S3	Weak	19	17	18	17	17	21	18
		D6S6	Strong	28	26	28	25	26	32	29
		D9S9	Severe	38	45	41	39	42	43	43
	SPI9	D3S3	Weak	22	21	23	19	20	27	23
		D6S6	Strong	30	29	31	25	28	35	32
		D9S9	Severe	38	40	40	34	39	42	40
	SPI12	D3S3	Weak	26	24	26	24	25	32	29
		D6S6	Strong	35	33	34	31	33	40	37
		D9S9	Severe	43	44	41	38	43	47	46
CanESM5	SPI3	D3S3	Weak	15	15	14	15	14	14	14
		D6S6	Strong	28	29	28	30	33	28	27
		D9S9	Severe	54	51	74	71	77	66	57
	SPI6	D3S3	Weak	19	20	18	19	19	18	17
		D6S6	Strong	27	31	30	28	30	27	25
		D9S9	Severe	38	45	45	41	45	42	39
	SPI9	D3S3	Weak	22	24	23	22	24	23	19
		D6S6	Strong	29	34	32	30	31	31	26
		D9S9	Severe	38	44	41	38	40	40	35
	SPI12	D3S3	Weak	26	31	27	26	29	27	23
		D6S6	Strong	33	43	37	34	37	34	29
		D9S9	Severe	42	51	45	42	45	42	36
CESM2	SPI3	D3S3	Weak	15	16	15	15	14	16	14
		D6S6	Strong	30	28	29	28	30	31	25
		D9S9	Severe	63	45	57	61	79	59	55
	SPI6	D3S3	Weak	20	21	19	20	17	21	18
		D6S6	Strong	30	29	28	28	26	30	26
		D9S9	Severe	45	40	42	41	42	43	37
	SPI9	D3S3	Weak	26	24	22	24	20	25	22
		D6S6	Strong	38	31	30	31	28	33	30
		D9S9	Severe	46	40	41	41	40	43	39
	SPI12	D3S3	Weak	32	32	28	30	25	28	25
		D6S6	Strong	41	38	35	38	33	36	31
		D9S9	Severe	48	45	44	48	44	46	39

5. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การประเมินลักษณะภัยแล้งในพื้นที่ลุ่มน้ำหลักของประเทศไทยโดยใช้ดัชนีมาตรฐานน้ำฝนร่วมกับฟังก์ชันโคพูลาแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของลักษณะภัยแล้งในแต่ละพื้นที่และแต่ละช่วงเวลาอย่างชัดเจน ค่าดัชนีความรุนแรงของภัยแล้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ยาวขึ้น (จาก SPI3 ถึง SPI12) สะท้อนว่าภัยแล้งระยะยาวมีผลกระทบรุนแรงกว่าภัยแล้งระยะสั้น แบบจำลองภูมิอากาศทั้งสามแบบให้ผลการประเมินที่สอดคล้องกับค่าตรวจวัดจริงสำหรับภัยแล้งระยะสั้นถึงกลาง แต่มีแนวโน้มประเมินความรุนแรงต่ำกว่าความเป็นจริงสำหรับภัยแล้งระยะยาว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ [19] ที่พบว่าแบบจำลองภูมิอากาศมักมีข้อจำกัดในการจำลองภัยแล้งระยะยาว

ผลการศึกษาพบว่าพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือ (ปิง วัง ยม น่าน) มีความเสี่ยงต่อภัยแล้งระดับรุนแรงมากกว่าพื้นที่อื่น ขณะที่พื้นที่ลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงใต้และภาคกลางมีความเสี่ยงน้อยกว่า สอดคล้องกับผลการศึกษาของ [6] ที่ระบุว่าพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือมีแนวโน้มประสบภัยแล้งรุนแรงในอนาคต การวิเคราะห์คาบการเกิดซ้ำโดยใช้ฟังก์ชันโคพูลาแสดงให้เห็นว่าภัยแล้งระดับเล็กน้อยมีคาบการเกิดซ้ำประมาณ 13-15 ปีสำหรับ SPI3 และเพิ่มขึ้นเป็น 25-32 ปีสำหรับ SPI12 ส่วนภัยแล้งระดับรุนแรงมีคาบการเกิดซ้ำยาวนานกว่า

การวิเคราะห์แนวโน้มในอนาคตพบความผันผวนสูงระหว่างแบบจำลองและสถานการณ์ต่างๆ โดยเฉพาะในช่วงอนาคตระยะกลาง (MF) ในสถานการณ์ SSP5.85 แบบจำลอง CESM2 แสดงการเพิ่มขึ้นของความรุนแรงและความยาวนานของภัยแล้งในเกือบทุกช่วงเวลา ขณะที่ BCC-CSM2-MR และ CanESM5 แสดงผลที่ผันผวนมากกว่า ความไม่แน่นอนนี้สะท้อนถึงความซับซ้อนของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อรูปแบบภัยแล้งในประเทศไทย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ [1] ที่พบความไม่แน่นอนสูงในการคาดการณ์ปริมาณน้ำฝนในอนาคต

การใช้ฟังก์ชันโคพูลาในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงและความยาวนานของภัยแล้งช่วยให้เข้าใจลักษณะภัยแล้งได้ครอบคลุมมากขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้ดัชนี SPI เพียงอย่างเดียว สอดคล้องกับการศึกษาของ [11] ที่พบว่าการวิเคราะห์แบบพหุตัวแปรมีประสิทธิภาพมากกว่าในการอธิบายความซับซ้อนของภัยแล้ง

6. ข้อเสนอแนะ

การนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ควรให้ความสำคัญกับพื้นที่ลุ่มน้ำภาคเหนือ โดยเฉพาะลุ่มน้ำปิง วัง ยม และน่าน ซึ่งมีความเสี่ยงต่อภัยแล้งรุนแรงสูงกว่าพื้นที่อื่น โดยพัฒนาโครงสร้างกักเก็บน้ำขนาดเล็กและขนาดกลางที่กระจายทั่วพื้นที่ ควบคู่กับการพัฒนาระบบเตือนภัยแล้งล่วงหน้าที่มีความจำเพาะกับแต่ละลุ่มน้ำ แบ่งการแจ้งเตือนตามระยะเวลาของภัยแล้ง (SPI3, SPI6, SPI9, SPI12) นอกจากนี้ ควรนำข้อมูลคาบการเกิดซ้ำของภัย

แล้งระดับต่างๆ มาปรับปรุงแนวทางการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน และลุ่มน้ำแม่กลอง พร้อมทั้งสนับสนุนการปรับตัวของภาคเกษตรผ่านการปรับปฏิทินการเพาะปลูกและส่งเสริมพืชทนแล้ง การบูรณาการข้อมูลระหว่างหน่วยงานเพื่อจัดทำแผนที่ความเปราะบางต่อภัยแล้งที่ครอบคลุมทั้ง 22 ลุ่มน้ำหลักจะเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับการวางแผนพัฒนาพื้นที่ในระยะยาว การนำผลการวิจัยไปใช้จะมีประสิทธิภาพสูงสุดหากมีการบูรณาการระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและมีการติดตามประเมินผลอย่างต่อเนื่อง

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมที่สนับสนุนทุนสำหรับการวิจัยการศึกษาภายใต้โครงการประเมินผลกระทบด้านอุทกวิทยาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อการจัดการน้ำในลุ่มน้ำแม่กลอง รหัสโครงการ 467037-ODU-06 และกรมอุตุนิยมวิทยาที่ให้การอนุเคราะห์ข้อมูลฝนประกอบการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Limsakul, A., Singhruck, P., & Wang, L. (2016). Climatology and spatio-temporal variability of wintertime total and extreme rainfall in Thailand during 1970-2012. EnvironmentAsia, 9(2), 128-141.

[2] รายงานสถานการณ์ภัยแล้งในประเทศไทย, 2563. กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย.

[3] Singhrattna, N., Rajagopalan, B., Kumar, K.K., & Clark, M. (2013). A dynamical model for understanding rainfall variability in Thailand. Climate Dynamics, 40(5-6), 1419-1440.

[4] Marks, D. (2011). Climate change and Thailand: Impact and response. Contemporary Southeast Asia, 33(2), 229-258.

[5] Limjirakan, S., & Limsakul, A. (2012). Trends in Thailand pan evaporation and its relation to climatic variables over the period 1970-2007. Atmospheric Research, 104-105, 113-122.

[6] Supharatid, S., & Masaki, Y. (2016). Trends in hydrological extremes and future projections in northern Thailand. Journal of Hydrologic Engineering, 21(12), 04016050.

[7] McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17(22), 179-183.

[8] Thavorntam, W., & Thanisawanyangkura, S. (2006). Drought assessment and monitoring through remote sensing and GIS in Western Thailand. International Journal of Remote Sensing, 27(1), 119-137.

[9] Prabnakorn, S., Maskey, S., Suryadi, F.X., & de Fraiture, C. (2018). Rice yield in response to climate trends and drought index in the Mun River Basin, Thailand. Science of the Total Environment, 621, 108-119.

[10] Mishra, A.K., & Singh, V.P. (2010). A review of drought concepts. Journal of Hydrology, 391(1-2), 202-216.

[11] Kao, S.C., & Govindaraju, R.S. (2010). A copula-based joint deficit index for droughts. Journal of Hydrology, 380(1-2), 121-134.

[12] Shiau, J.T. (2006). Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. Water Resources Management, 20(5), 795-815.

[13] Tingsanchali, T., & Karim, F. (2010). Flood-hazard assessment and risk-based zoning of a tropical flood plain: case study of the Yom River, Thailand. Hydrological Sciences Journal, 55(2), 145-161.

[14] Sathapongpakdee, P., Thavorntam, W., & Thanisawanyangkura, S. (2020). Drought hazard assessment in the Chi-Mun River Basin, Thailand using copula-based multivariate approach. Journal of Water and Climate Change, 11(3), 987-1001.

[15] กรมอุตุนิยมวิทยา. (2023). ข้อมูลสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย. กรุงเทพฯ: กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม.

[16] Limjirakan, S., Limsakul, A., Sriburi, T., & Suttamanuswong, B. (2017). Trends in daily temperature extremes in Thailand under climate change. Earth Systems and Environment, 1(2), 12.

[17] Nelsen, R.B. (2006). An Introduction to Copulas (2nd ed.). Springer Series in Statistics. New York: Springer. https://doi.org/10.1007/0-387-28678-0

[18] Mirabbasi, R., Fakheri-Fard, A., & Dinpashoh, Y. (2012). Bivariate drought frequency analysis using the copula method. Theoretical and Applied Climatology, 108(1-2), 191-206. https://doi.org/10.1007/s00704-011-0524-7

[19] IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

[20] Singhratina, N., Rajagopalan, B., Kumar, K.K., & Clark, M. (2015). Seasonal forecasting of Thailand summer monsoon rainfall. International Journal of Climatology, 35(9), 2642-2654.