

ผลกระทบของการวิเคราะห์ค่าความลำเอียงแบบเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ต่อความถูกต้องของน้ำฝนเรดาร์ Influence of Spatially Varying Bias Adjustment on the accuracy of Radar Rainfall

ชิววิท มากมี¹ และ พรรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี่ยม^{1,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: punpim.m@ku.th

บทคัดย่อ

แฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงมีความสำคัญมากต่อความถูกต้องในการประเมินน้ำฝนด้วยเรดาร์ กล่าวคือเป็นที่ยอมรับว่าแฟกเตอร์ดังกล่าวสามารถลดความคลาดเคลื่อนในการประเมินน้ำฝนเรดาร์จากการใช้ความสัมพันธ์ Z-R (ระหว่างค่าการสะท้อนกลับจากเรดาร์ (Z) และน้ำฝนจากเรดาร์ (R)) ได้ อย่างไรก็ตามเทคนิคการวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงมีหลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับความซับซ้อนในการวิเคราะห์ เพื่อให้ได้ประโยชน์ต่อการเลือกใช้เทคนิคการวิเคราะห์แฟกเตอร์การปรับแก้ที่เหมาะสม บทความนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาผลกระทบของการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์แฟกเตอร์ความลำเอียงแบบเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่และเวลา ต่อความถูกต้องในการประเมินน้ำฝนเรดาร์เมื่อเทียบกับการใช้แฟกเตอร์ความลำเอียงแบบเฉลี่ยคงที่ทั้งพื้นที่ โดยได้เลือกใช้วิธีประมาณค่าระหว่างช่วงจำนวน 2 วิธีคือ Inverse Distance Weighted Interpolation (IDW) และ Ordinary Kriging Interpolation (OK) สำหรับใช้วิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ความลำเอียงแบบเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่แบบรายกริด ข้อมูลค่าการสะท้อนกลับจากเรดาร์ ณ สถานีเรดาร์สัตหีบ และข้อมูลน้ำฝนจากสถานีวัดน้ำฝนอัตโนมัติ จำนวน 297 สถานี ในปี พ.ศ. 2556 ได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อประยุกต์ใช้เทคนิคความลำเอียงเชิงพื้นที่ร่วมกับความสัมพันธ์ Z-R นำไปสู่ความถูกต้องในการประเมินน้ำฝนที่ดียิ่งขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการใช้ค่าเฉลี่ยเชิงพื้นที่แบบ MFB ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำเทคนิคการปรับแก้ความลำเอียงแบบเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ไปปรับใช้ให้สอดคล้องกับพฤติกรรมการเกิดฝนในพื้นที่ศึกษา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในงานพัฒนาด้านแหล่งน้ำของประเทศต่อไป

คำสำคัญ: การประมาณค่าระหว่างช่วงเชิงพื้นที่, ปริมาณน้ำฝนเรดาร์, การปรับแก้ความลำเอียงแบบกริด, สถานีเรดาร์สัตหีบ

Abstract

The bias correction factor is an essential value for improving the accuracy of radar rainfall assessment. This factor is acknowledged to be used for reducing the radar rainfall estimation errors contained in the process of the Z-R conversion (the relationship between radar reflectivity (Z) and rain rate (R)). However, various bias adjustment techniques are depending upon the complexity of the analysis. To be useful for selecting the suitable technique, this study aims to study the influence of applying the spatial and temporal varying bias correction techniques on the accuracy of radar rainfall estimates compared with using the mean field bias correction technique (MFB). Two methods of spatial interpolation comprising the Inverse Distance Weighted Interpolation (IDW) and Ordinary Kriging Interpolation (OK) were applied to estimate the gridded bias adjustment factor of radar rainfall. Radar reflectivity data at the Sattahip station and gauge rainfall data from 297 automatic rain gauges in 2013 were used in the study. The results appeared that coupling the spatially varying bias correction technique with the Z-R conversion significantly produce the enhancement of radar rainfall estimates compared with the use of the conventional mean field bias technique. Therefore, it is appropriate to apply the spatial bias correction techniques associated with the rainfall behavior of the study area to further increase the efficiency of water resources development of the country.

Keywords: spatial interpolation, radar rainfall, gridded bias correction, Sattahip radar station

บทนำ

เทคโนโลยีการตรวจวัดน้ำฝนด้วยเรดาร์ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการตรวจวัดระยะไกลได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องสำหรับนำมาใช้ประเมินน้ำฝน ความละเอียดสูงอย่างกว้างขวางทั่วโลกมาเป็นเวลาเกือบ 70 ปี [1] ปริมาณน้ำฝนด้วยเรดาร์ได้รับการพิสูจน์ว่าเป็นข้อมูลด้านเข้าสำหรับแบบจำลองด้านอุทกวิทยาที่มีประสิทธิภาพมากกว่าข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากสถานีวัดน้ำฝน [2, 3, 4] อย่างไรก็ตามเรดาร์ไม่ได้ตรวจวัดปริมาณน้ำฝนโดยตรงแต่วัดค่าพลังงานที่สะท้อนกลับจากเรดาร์ (radar reflectivity data, Z) วิธีการพื้นฐานทั่วไปคือการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างการสะท้อนกลับจากเรดาร์ (Z) และค่าน้ำฝน (R) (Z-R relationship, $Z=aR^b$) เพื่อแปลงค่า Z ที่ตรวจวัดได้ให้เป็นค่าน้ำฝนในทุก ๆ ความละเอียดของข้อมูลเชิงพื้นที่และเวลาที่พิจารณา เป็นที่น่าเสียดายพารามิเตอร์ในความสัมพันธ์ Z-R เปลี่ยนแปลงไปตามการกระจายตัวของขนาดเม็ดน้ำฝน (Rain Drop Size Distribution) ดังนั้นจึงไม่สามารถเป็นตัวแทนในทุก ๆ เหตุการณ์น้ำฝนได้ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว ปริมาณน้ำฝนที่วิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ Z-R จะต้องนำไปปรับแก้ความลำเอียงของน้ำฝนจากเรดาร์ด้วยแฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียง (Bias Adjustment Factor) ให้เป็นปริมาณน้ำฝนบนพื้นดินที่เหมาะสมกับเหตุการณ์นั้น ๆ ต่อไป [5, 6, 7]

แฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงโดยทั่วไปจะถูกประเมินบนพื้นฐานของการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างน้ำฝนจากสถานีและน้ำฝนจากเรดาร์ ณ ตำแหน่งของสถานีตรวจวัดเท่านั้น โดยวิธีง่ายที่สุดคือการปรับแก้ด้วยแฟกเตอร์ความลำเอียงเฉลี่ย (Mean Field Bias, MFB) แบบไม่เปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่และเวลา และสามารถประยุกต์ให้ค่าความลำเอียงมีความสม่ำเสมอเชิงพื้นที่แต่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาได้ด้วยเทคนิค อาทิเช่น วิธีความลำเอียงเฉลี่ยรายชั่วโมง (Hourly Mean Field Bias, HMFB) และวิธีความลำเอียงเฉลี่ยรายวัน (Daily Mean Field Bias, DMFB) เป็นต้น [8] ซึ่งข้อจำกัดของวิธี MFB ดังกล่าวคือไม่สามารถปรับแก้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ได้ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนที่สูงได้หากพื้นที่ลุ่มน้ำที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลงฝนเชิงพื้นที่อย่างมีนัยสำคัญ

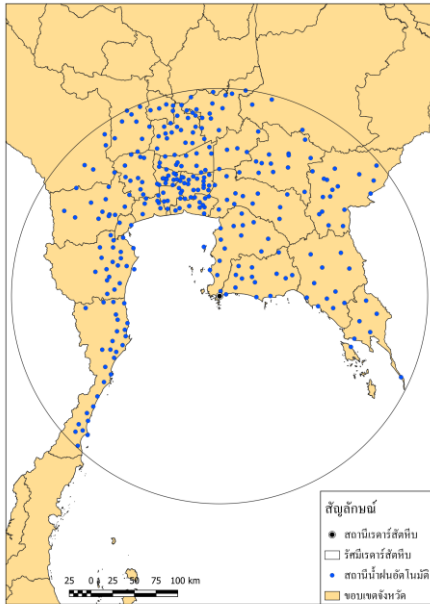
เทคนิคการปรับแก้ความลำเอียงแบบเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ (Spatially Varying Bias Corrections) เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการประเมินน้ำฝนด้วยเรดาร์ได้ อาทิเช่นวิธีการปรับแก้ความลำเอียงแบบเฉพาะแห่ง (Local Bias Correction Methods) ซึ่งวิธีนี้ค่าความลำเอียงจะมีความแตกต่างกันไปตามพื้นที่ที่กำหนด [9] หรือเทคนิคที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นคือการปรับแก้ความลำเอียงสำหรับแต่ละพิกเซลของเรดาร์ ซึ่งต้องอาศัยเทคนิคการประมาณค่าระหว่างช่วงของน้ำฝนสถานี (Rain Gauge Interpolation Techniques) เพื่อประเมินค่าปริมาณน้ำฝนจากสถานีรายพิกเซลและนำมาเปรียบเทียบกับน้ำฝนจากเรดาร์ในพิกเซลเดียวกันเพื่อคำนวณแฟกเตอร์ความลำเอียง [10] ดังนั้นการเลือกใช้เทคนิคการประมาณค่าระหว่างช่วงของน้ำฝนจากสถานีที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อความถูกต้องของค่าความลำเอียงในพื้นที่ศึกษานั้น

เทคนิคการประเมินค่าระหว่างช่วงของน้ำฝนสถานีมีหลายวิธี เช่น วิธี Inverse Distance Weighting (IDW) และ Thiessen polygon ซึ่งทั้งสองวิธีนี้เป็นการประมาณค่าที่ ไม่ได้พิจารณาตัวแปรลักษณะภูมิประเทศ ในขณะที่วิธี Kriging, Multiple Linear Regression (MLR), Principal Component Regression (PCR) [11] เป็นวิธีที่อาศัยข้อมูลทางภูมิศาสตร์ (Geographical Information) มาสร้างความสัมพันธ์ในการประมาณค่าระหว่างช่วงของน้ำฝน โดยตัวแปรลักษณะภูมิศาสตร์ที่มีอิทธิพลต่อประเภทของฝนและรูปแบบการกระจายตัวของน้ำฝน ได้แก่ ละติจูด, ลองจิจูด, ระดับความสูง, ความชัน, ทิศทางการวางตัวของภูเขา, ระยะทางจากภูเขา และระยะทางจากทะเล เป็นต้น [12] ผลการศึกษาวิจัยในอดีตพบว่าวิธีพิจารณาข้อมูลทางภูมิศาสตร์ให้ความถูกต้องในการประเมินน้ำฝนที่ดีในกรณีที่มีการสนใจทั้งระดับและปริมาณน้ำฝนสถานีรอบ ๆ ในขณะที่ Inverse Distance Weighting (IDW) และ Thiessen polygon ไม่พิจารณาทั้งระดับและปริมาณน้ำฝนสถานีโดยรอบทำให้เกิดความผิดพลาดในการประมาณค่า [13] จากความหลากหลายของวิธีการประเมินน้ำฝนจากสถานีเชิงพื้นที่ งานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาหาเทคนิคการประเมินค่าระหว่างช่วงของน้ำฝนสถานีที่เหมาะสมระหว่างวิธี Inverse Distance Weighted (IDW) และวิธี Ordinary Kriging (OK) สำหรับนำไปวิเคราะห์ค่าความลำเอียงเชิงพื้นที่ของน้ำฝนจากเรดาร์เพื่อนำไปสู่การเพิ่มความถูกต้องในการประเมินน้ำฝนความละเอียดสูงจากเรดาร์ในที่สุด

1. การรวบรวมข้อมูลเรดาร์และปริมาณน้ำฝนจากสถานี

1.1 ข้อมูลการสะท้อนกลับจากเรดาร์

ในการศึกษานี้ใช้ข้อมูลเรดาร์จากสถานีเรดาร์สัตหีบเพื่อเป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ปริมาณน้ำฝนจากเรดาร์ สถานีเรดาร์สัตหีบอยู่ในความรับผิดชอบของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร ซึ่งตั้งอยู่ที่อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี พิกัดเส้นรุ้ง 12.647°N เส้นแวง 100.966°E ที่ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง 174 เมตร รัศมีการตรวจวัด 240 กิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ 22 จังหวัด ในภาคตะวันออก ดังแสดงในรูปที่ 1 เรดาร์สัตหีบเป็นเรดาร์ตรวจอากาศชนิดดอปเปลอร์ (Doppler) ย่านความถี่ S-band ตรวจวัดด้วยมุมเยย 14 มุม จัดเก็บข้อมูลการสะท้อนกลับจากเรดาร์ (Radar Reflectivity Data) ในทุก ๆ 6 นาที โดยได้รวบรวมข้อมูลค่าการสะท้อนกลับจากเรดาร์ในปี พ.ศ. 2556 สำหรับใช้ในการศึกษาในการตรวจสอบคุณภาพข้อมูลการสะท้อนกลับจากเรดาร์ได้หลีกเลี่ยงผลกระทบจากสัญญาณรบกวน (Noise) และลูกเห็บ (Hail) จากการกำหนดให้ข้อมูลค่าการสะท้อนกลับที่น้อยกว่า 15 dBZ มีค่าเท่ากับ 0 และข้อมูลค่าการสะท้อนกลับที่มากกว่า 53 dBZ ให้มีค่าเท่ากับ 53 dBZ ตามลำดับ



รูปที่ 1 รัศมีกวาดของเรดาร์สัตหีบและตำแหน่งสถานีวัดน้ำฝนที่เกี่ยวข้อง

1.2 ข้อมูลน้ำฝนจากสถานีตรวจวัด

ได้รวบรวมข้อมูลน้ำฝนราย 15 นาที ในปี 2556 (ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลเรดาร์ที่รวบรวมแล้วข้างต้น) จากโครงข่ายสถานีวัดน้ำฝนอัตโนมัติที่อยู่ภายใต้รัศมีเรดาร์สัตหีบจำนวนทั้งสิ้น 297 สถานี ซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของกรมอุตุนิยมวิทยา ดังแสดงตำแหน่งเครือข่ายสถานีวัดน้ำฝนต่าง ๆ ในรูปที่ 1 สำหรับการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลน้ำฝนจากสถานีได้ใช้วิธีเส้นโค้งทับทวี (Double Mass Curve) ในการวิเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่าสถานีที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพมีจำนวน 134 สถานี และเมื่อพิจารณาร่วมกับข้อมูลเรดาร์ที่รวบรวมมาข้างต้นที่มีความถูกต้องสมบูรณ์สามารถคัดเลือกเหตุการณ์น้ำฝนสำหรับการใช้การศึกษาได้ทั้งสิ้น 5 เหตุการณ์ดังแสดงในตารางที่ 1

2. ทฤษฎีและวิธีการศึกษา

ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ Z-R สามารถลดทอนลงได้ด้วยการปรับแก้ด้วยค่าแฟกเตอร์ความลำเอียง ซึ่งโดยทั่วไปคืออัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำฝนจากสถานีวัดน้ำฝนต่อปริมาณน้ำฝนที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ Z-R หรือ เรียกกันอย่างง่ายว่า “อัตราส่วน G/R” วิธีการคำนวณค่าแฟกเตอร์ความลำเอียงอย่างง่ายที่นิยมใช้กัน คือ ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงเฉลี่ย (Mean Field Bias, MFB) วิธีนี้จะใช้ค่าปรับแก้เฉลี่ยค่าเดียวทั้งพื้นที่ศึกษาซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนสูงถ้าพฤติกรรมของปริมาณน้ำฝนจากเรดาร์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงสูงเชิงพื้นที่ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวการวิเคราะห์แฟกเตอร์ความลำเอียงแบบเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ได้ถูกพัฒนาขึ้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความถูกต้องในการประเมินน้ำฝนจากเรดาร์ภายใต้การวิเคราะห์แฟกเตอร์ความลำเอียงที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ วิธี MFB และ วิธี

ตารางที่ 1 เหตุการณ์ฝนสำหรับการวิเคราะห์ค่าความลำเอียง

ลำดับเหตุการณ์	เวลาเริ่มต้นถึง เวลาสิ้นสุด (ว/ค/ป)	ช่วงเวลา (ชั่วโมง)	จำนวนสถานีที่มีข้อมูล	ฝนสะสมเฉลี่ย (มม.)
1	4/6/2013 - 7/6/2013	72	120	32.13
2	22/6/2013 - 24/6/2013	48	112	29.42
3	22/7/2013 - 25/7/2013	72	109	16.76
4	27/7/2013 - 31/7/2013	96	128	18.25
5	21/8/2013 - 24/8/2013	72	128	14.67

วิเคราะห์แบบเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ด้วย 2 เทคนิคการประมาณค่าระหว่างช่วง คือ Inverse Distance Weighted (IDW) และ Ordinary Kriging (OK) โดยวิธี OK จะแบ่งเป็น 3 แบบจำลอง Semi-variogram ซึ่งประกอบด้วย Circular, Spherical และ Exponential ที่จะนำมาใช้ในการประมาณค่าผลการศึกษาจากเทคนิคทั้งสาม จะนำมาเปรียบเทียบกัน สำหรับรายละเอียดวิธีการคำนวณในแต่ละวิธีมีดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงเฉลี่ย

เป็นการวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงที่ง่ายที่สุด ซึ่งค่าแฟกเตอร์จะเป็นค่าคงที่ทั้งเชิงพื้นที่และเวลา เหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีเครือข่ายสถานีวัดปริมาณน้ำฝนหนาแน่น สามารถคำนวณดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\left(\frac{G}{R}\right)_{MFB} = \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{\sum_{i=1}^N R_i} \quad (1)$$

เมื่อ G_i คือ ปริมาณฝนสะสม (มม.) ตลอดช่วงระยะเวลาที่วิเคราะห์ ณ สถานีวัดน้ำฝนที่ i , R_i คือ ปริมาณน้ำฝนเรดาร์สะสม (มม.) ตลอดช่วงระยะเวลาที่วิเคราะห์ ณ ตำแหน่งเดียวกันกับสถานีวัดน้ำฝน i ซึ่งคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ Z-R และ N คือ จำนวนสถานีตรวจวัดข้อมูลที่มีอยู่

2.2 การวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงแบบเชิงพื้นที่

การวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงเชิงพื้นที่นี้ จะได้ค่าแฟกเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความละเอียดรายพิกเซลของเรดาร์และเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาที่ยังพิจารณา โดยความถูกต้องของการวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับเทคนิคการประมาณค่าระหว่างช่วงที่นำมาใช้ในการประมาณค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียง ณ พิกเซลต่าง ๆ ที่ไม่มีข้อมูลจากการตรวจวัด ซึ่งในการศึกษานี้ได้ใช้ 2 เทคนิคการประมาณค่าระหว่างช่วงโดยมีรายละเอียด ดังนี้

2.2.1 วิธี Inverse Distance Weighted Interpolation (IDW)

เป็นการประมาณค่าข้อมูลเชิงพื้นที่แบบ Deterministic Interpolation โดยมีหลักการว่าตำแหน่งที่อยู่ใกล้เคียงกันย่อมมีความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ที่ตึกว่าตำแหน่งที่อยู่ไกลออกไป การประมาณค่าให้กับตำแหน่งที่ไม่ทราบค่าจากผลรวมเชิงเส้นของค่าที่ทราบแล้วถ่วงน้ำหนักจุดให้ถูกจำกัดด้วยระยะทางจากจุดที่ไม่ทราบค่าไปยังจุดที่ทราบค่า

ที่สุดในการประมาณค่า จุดไม่ทราบค่าจะได้รับอิทธิพลจากจุดควบคุมที่อยู่ใกล้มากกว่า ระดับของอิทธิพลต่อค่าข้อมูลจะแปรผกผันกับระยะทางโดยมีรูปแบบของสมการ ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i Z_i \quad \text{จาก } \omega_i = d_{i0}^{-k} / \sum_{i=1}^n d_{i0}^{-k} \quad (2)$$

เมื่อ $Z(s_0)$ คือค่าปริมาณน้ำฝนที่ได้จากการประมาณค่า ณ ตำแหน่งที่ต้องการ S_0 , $Z(s_i)$ คือค่า Z ที่ตำแหน่ง s_i , ω_i คือน้ำหนักที่ถูกกำหนดจากจุดที่ทราบค่า, d_{i0} คือระยะห่างระหว่างจุด s_i และ s_0 , n คือจำนวนจุดที่ทราบค่าที่จะนำมาหาค่าที่ s_0 , k คือเลขยกกำลังซึ่งในการศึกษานี้ใช้ค่าเท่ากับ 2 [14]

2.2.2 วิธี Ordinary Kriging (OK)

วิธีนี้จัดอยู่ในประเภท Geostatistical ซึ่งมีผู้นำมาใช้ในการวิเคราะห์แพกเตอร์ความลำเอียงกันอย่างต่อเนื่อง อาทิ [9] สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี OK มีลำดับขั้นตอน ดังนี้

(1) การสร้างแบบจำลอง Semi-variogram

แบบจำลอง Semi-variogram แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ (Spatial Correlation) ระหว่างค่า Semi- variance กับระยะห่างระหว่างข้อมูล 2 ตำแหน่ง [15] แบบจำลอง Semi-variogram ถูกคำนวณเป็นครึ่งหนึ่งของค่าผลต่างกำลังสองของข้อมูลระหว่าง 2 ตำแหน่งที่ตั้ง ที่มีระยะห่างกันเท่ากับ d ดังแสดงในสมการที่ (3) [16]

$$\gamma(d) = \frac{1}{2N(d)} \sum_{i=1}^{N(d)} [Z(s_i + d) - Z(s_i)]^2 \quad (3)$$

เมื่อ $\gamma(d)$ คือค่า Semi- variance ระหว่างจุดที่มีระยะห่าง d , $Z(s_i)$ และ $Z(s_i+d)$ เป็นค่าตัวแปรที่ทราบค่า ณ ตำแหน่ง s_i และ (s_i+d) ที่ระยะห่างกันเท่ากับ d และ $N(d)$ คือจำนวนคู่ของข้อมูลที่มีระยะห่าง d

แบบจำลอง Semi-variogram ที่เหมาะสมคือแบบจำลองที่มีความสอดคล้องกับข้อมูลตรวจวัดมากที่สุด ในการศึกษานี้ได้เปรียบเทียบแบบจำลอง Semi-variogram จำนวน 3 แบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลอง Circular, Spherical และ Exponential สำหรับใช้ทดสอบความสอดคล้องกันของข้อมูลโดยแต่ละแบบจำลองมีสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

- แบบจำลอง Circular

$$\gamma(d) = \begin{cases} 0 & ; d = 0 \\ c_0 + c_1 \left(1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1}\left(\frac{d}{\alpha}\right) + \sqrt{1 - \frac{d^2}{\alpha^2}}\right); & 0 < d \leq \alpha \\ c_0 + c_1 & ; d \geq \alpha \end{cases}$$

$$c_0 \geq 0, c_1 \geq 0, \alpha \geq 0 \quad (4)$$

- แบบจำลอง Spherical

$$\gamma(d) = \begin{cases} 0 & ; d = 0 \\ c_0 + c_1 \left(\frac{3}{2} \left(\frac{d}{\alpha}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{d}{\alpha}\right)^3\right); & 0 < d \leq \alpha \\ c_0 + c_1 & ; d \geq \alpha \end{cases}$$

$$c_0 \geq 0, c_1 \geq 0, \alpha \geq 0 \quad (5)$$

- แบบจำลอง Exponential

$$\gamma(d) = \begin{cases} 0 & ; d = 0 \\ c_0 + c_1 (1 - \exp(-\frac{d}{\alpha})); & d \neq 0 \end{cases}$$

$$c_0 \geq 0, c_1 \geq 0, \alpha \geq 0 \quad (6)$$

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับแบบจำลอง Semi-variogram ประกอบด้วย Nugget (c_1), Sill (c_0) และ Range (α) โดยที่ ค่า Nugget จะอธิบายถึงความผิดพลาดจากการเก็บตัวอย่างที่มีระยะห่างเกินไป หรือความผิดพลาดที่เกิดจากการวิเคราะห์ ค่าความแปรปรวนสำหรับ Sill อธิบายถึงความแปรปรวนของระยะทางที่ตัวแปรไม่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลข้างเคียงอีกต่อไป และ Range อธิบายถึงระยะทางที่ข้อมูลเริ่มมีความเป็นอิสระต่อกัน [17] ดังแสดงรูปแบบทั่วไปของแบบจำลอง Semi-variogram ในรูปที่ 2 ซึ่งระยะห่างที่เหมาะสมในการเก็บตัวอย่าง ควรมีระยะ ¼ ถึง ½ ของระยะ Range เนื่องจากเป็นจุดที่ไม่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลข้างเคียงอีกต่อไป [17]

(2) การทดสอบการเข้ากันได้ดีของข้อมูล (Goodness of fit)

ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลอง Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) ในการตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูลจากชุดตัวอย่างกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง Semi-variogram ได้ถูกใช้เป็นดัชนีชี้วัดสำหรับการตัดสินใจในการคัดเลือกแบบจำลอง Semi-variogram ที่เหมาะสม โดยดัชนี NSE จะมีค่า 0 - 1 หากผลการจำลองมีความใกล้เคียงค่าที่ได้จากการตรวจวัด ดัชนี NSE จะมีค่าเข้าใกล้ 1 [18] ดังแสดงการคำนวณ NSE ในสมการที่ (7)

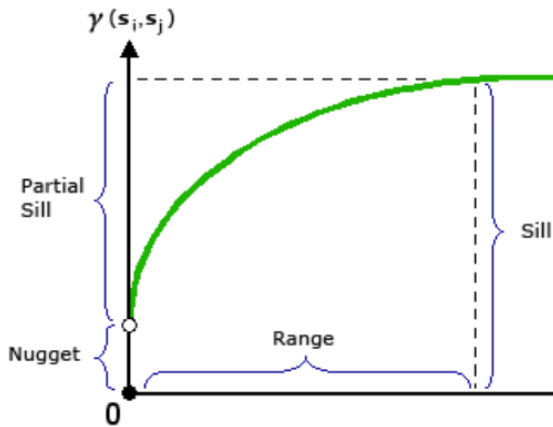
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{n=1}^n [\hat{\gamma}(d_n) - \gamma(d_n)]^2}{\sum_{n=1}^n [\hat{\gamma}(d_n) - \bar{\gamma}(d_n)]^2} \quad (7)$$

เมื่อ $\hat{\gamma}(d_n)$ คือ ค่าความแปรปรวนที่ตรวจวัดได้

$\gamma(d_n)$ คือ ค่าความแปรปรวนที่ได้จากแบบจำลอง Variogram

$\bar{\gamma}(d_n)$ คือ ค่าเฉลี่ยความแปรปรวนที่ตรวจวัด

สำหรับแบบจำลอง Semi-variogram ที่ดีที่สุดจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าความลำเอียงเชิงพื้นที่ด้วยวิธีการประมาณค่า Ordinary Kriging (OK) ต่อไป



รูปที่ 2 รูปแบบทั่วไปของแบบจำลอง Semi-variogram [19]

(3) การวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ความลำเอียงเชิงพื้นที่ด้วยวิธี OK

แบบจำลอง Semi-variogram ที่เหมาะสมกับข้อมูลตรวจวัดจะถูกนำไปประมาณค่าระหว่างช่วงเพื่อวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงเชิงพื้นที่ ข้อมูลตรวจวัดแฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงบริเวณรอบ ๆ ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าของตำแหน่งที่พิจารณา โดยการปรับแก้ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก ดังแสดงการคำนวณในสมการที่ (8) - (10)

$$Z_{OK}(s_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i^{OK} Z(s_i) \quad \text{โดย} \quad \sum_{i=1}^n \omega_i^{OK} = 1 \quad (8)$$

เมื่อ $Z_{OK}(s_0)$ คือค่าที่ประมาณได้ที่จุดที่ไม่ทราบค่า, ω_i^{OK} คือค่าถ่วงน้ำหนักระหว่างค่า s_i กับ s_0 และ n คือจำนวนข้อมูลรอบ ๆ ที่ใช้ในการประมาณค่าซึ่ง ω_i^{OK} สามารถหาได้จากการแก้ระบบสมการเชิงเส้น $(n+1)$ ดังแสดงในสมการที่ (9) โดยค่าถ่วงน้ำหนักจะมีผลรวมกันเท่ากับ 1 ดังสมการที่ (10)

$$\sum_{i=1}^n \gamma(s_i - s_j) \omega_i^{OK} + \mu_1^{OK} = \gamma(s_j - s_0) \quad \text{ซึ่ง} \quad j=1, \dots, n \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n \omega_i^{OK} = 1 \quad (10)$$

เมื่อ $\gamma(s_i - s_j)$ คือแบบจำลอง Semi-variogram ระหว่างตำแหน่งที่ s_i กับ s_j สำหรับ $\gamma(s_j - s_0)$ คือแบบจำลอง Semi-variogram ระหว่างตำแหน่งที่ s_j กับ จุดที่ต้องการทราบค่า (s_0) และ μ_1^{OK} คือพารามิเตอร์ตัว

2.3 การตรวจพิสูจน์ความถูกต้องในการวิเคราะห์ค่าแฟกเตอร์ความลำเอียงเชิงพื้นที่

เพื่อตรวจพิสูจน์ความถูกต้องและประสิทธิภาพของวิธีการประเมินค่าความลำเอียงเชิงพื้นที่ต่อความถูกต้องในการประเมินน้ำฝนด้วยเรดาร์งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธี Leave One Out Cross Validation ดึงข้อมูลออก 1 สถานี เพื่อเป็นสถานีตรวจพิสูจน์ แล้วทำการประมาณค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงเชิงพื้นที่ด้วยสถานีที่เหลือ ทำวนซ้ำในลักษณะเดียวกันจนครบทุกสถานี เพื่อให้ทุกสถานีถูกนำมาใช้เป็นสถานีสำหรับตรวจพิสูจน์ ในแต่ละรอบของการวนซ้ำค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียง ณ ตำแหน่งที่ตั้งข้อมูลออกจะถูกนำไปคูณกับปริมาณน้ำฝนเรดาร์ (ใช้สมการ Z-R) ที่ตำแหน่งกริดเดียวกัน จากนั้นจะนำปริมาณน้ำฝนจากเรดาร์หลังการปรับแก้เทียบกับปริมาณน้ำฝนจากสถานีวัดน้ำฝนเพื่อศึกษาความคลาดเคลื่อนของแต่ละรอบของการดึงข้อมูลออก จากนั้นทำการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในทุกการวนซ้ำด้วยวิธีการที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) ดังแสดงในสมการที่ (11)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - G_i)^2} \quad (11)$$

เมื่อ R_i คือค่าปริมาณน้ำฝนจากเรดาร์หลังปรับแก้ของการดึงข้อมูลออกรอบที่ i และ G_i คือค่าปริมาณน้ำฝนจากสถานีตรวจวัดที่ตั้งข้อมูลออกรอบที่ i

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผลการศึกษา

3.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง Semi-variogram ที่เหมาะสม

ผลการวิเคราะห์การเข้ากันได้ดีของข้อมูล (Goodness of fit) เพื่อหาแบบจำลอง Semi-variogram ของค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงที่สอดคล้องมากที่สุดกับข้อมูลที่คำนวณจากการตรวจวัดน้ำฝนจากสถานีวัดน้ำฝน ระหว่าง 3 แบบจำลอง Semi-variogram ดังแสดงผลของค่า NSE ในตารางที่ 2 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า semi-variance กับระยะทางของแต่ละแบบจำลองสำหรับแต่ละเหตุการณ์น้ำฝนดังรูปที่ 3 ซึ่งพบว่าค่าเฉลี่ยของค่า NSE ของทั้ง 5 เหตุการณ์ ที่เกิดจากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง Circular, Spherical และ Exponential มีค่าประมาณ 0.715, 0.709 และ 0.658 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าแบบจำลอง Circular ให้ค่าที่ดีที่สุด แต่มีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลอง Spherical ค่อนข้างมาก ซึ่งสอดคล้องกับการเข้ากันได้ดีของแบบจำลองทั้ง 2 กับค่าตรวจวัดที่เป็นไปในรูปแบบเดียวกันดังรูปที่ 3 ดังนั้นในการศึกษานี้จึงพิจารณาที่จะนำแบบจำลอง Circular และ Spherical ไปใช้ประมาณค่าแฟกเตอร์ความลำเอียงเชิงพื้นที่ด้วยวิธี OK เพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมในการจำลองน้ำฝนด้วยเรดาร์ในลำดับต่อไป

ตารางที่ 2 ค่าสถิติ NSE ที่แสดงความเข้ากันได้ดีของข้อมูลจากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง Semi-variogram ต่างๆ

ลำดับเหตุการณ์	ค่าสถิติ Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)		
	OK-CIR	OK-SP	OK-EXP
1	0.679	0.661	0.541
2	0.499	0.500	0.483
3	0.809	0.800	0.729
4	0.777	0.774	0.689
5	0.813	0.811	0.849
เฉลี่ย	0.715	0.709	0.658

3.2 ประสิทธิภาพของเทคนิคการวิเคราะห์ค่าแพกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงต่อความถูกต้องในการประเมินน้ำฝนเรดาร์

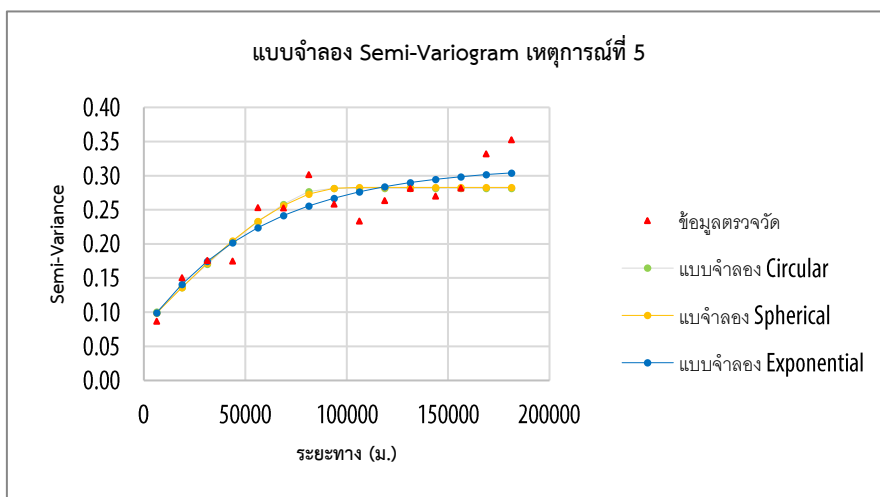
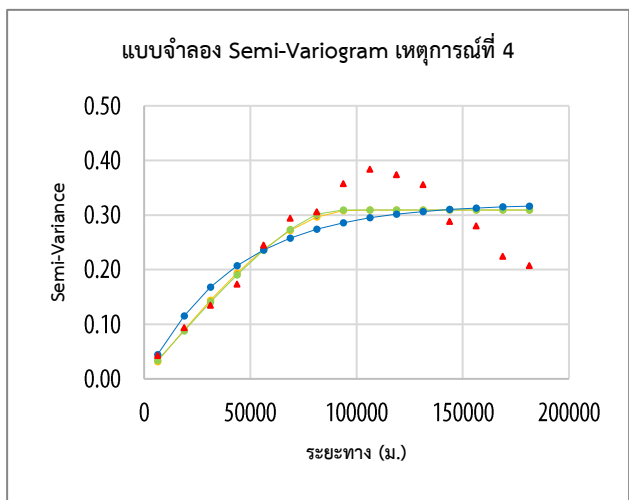
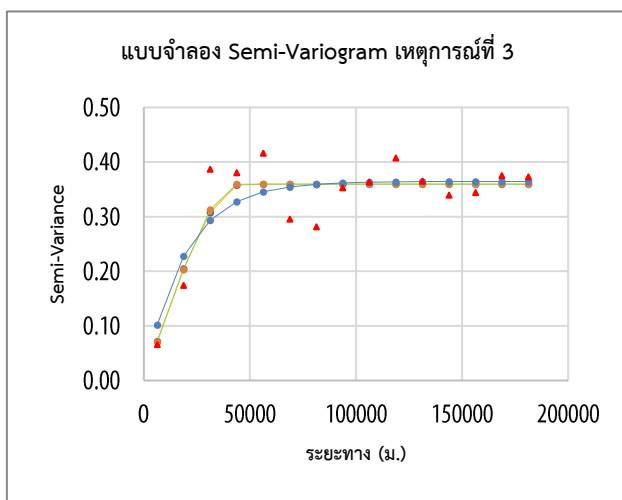
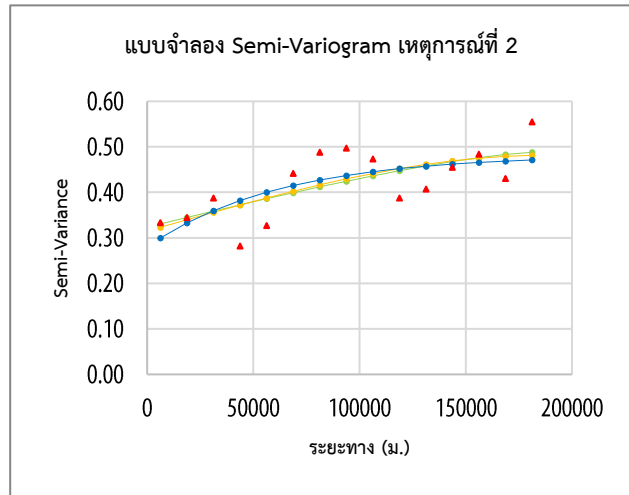
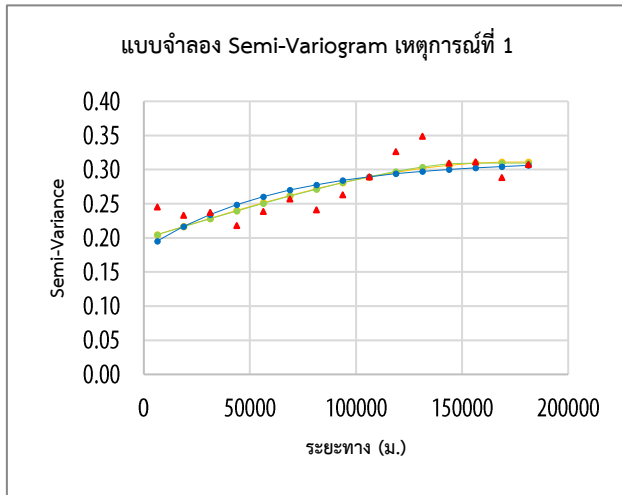
ผลการประเมินน้ำฝนด้วยเรดาร์ด้วยการประยุกต์ใช้ค่าแพกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงทั้ง 3 วิธี แสดงในตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาค่า RMSE เฉลี่ยของทุกวิธี พบว่า วิธีที่ให้ความถูกต้องในการจำลองน้ำฝนเชิงพื้นที่ที่เรียกว่าลำดับจากมากสุดไปน้อยที่สุดคือ วิธี OK-SP, OK-CIR, IDW และ MFB ตามลำดับ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มประสิทธิภาพในการจำลองน้ำฝนเรดาร์เทียบกับกรณีก่อนการปรับแก้เท่ากับ 24.6, 24.2, 20.5 และ 0.97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาค่า RMSE รายเหตุการณ์เป็นที่ยึดเหนี่ยวทุกเทคนิคการประมาณค่าความลำเอียงแบบเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ อันประกอบด้วย IDW, OK-CIR และ OK-SP ให้ความถูกต้องในการประเมินฝนเรดาร์ที่สูงกว่าน้ำฝนเรดาร์ก่อนการปรับแก้ทั้งสิ้น โดยมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มประสิทธิภาพอยู่

ในช่วง 10.450 – 39.235 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม สำหรับวิธี MFB แม้ว่าจะมีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์การเพิ่มประสิทธิภาพที่สูงกว่า No-Bias แต่ในเหตุการณ์ที่ 2, 3, และ 5 ให้ความถูกต้องที่ต่ำกว่า No-Bias ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าแพกเตอร์ปรับแก้รายตำแหน่งสถานีที่ทำการตรวจพิสูจน์ในแต่ละเหตุการณ์น้ำฝน ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า เทคนิค MFB ให้ผลของการวิเคราะห์แพกเตอร์ปรับแก้แบบสม่ำเสมอไม่เปลี่ยนแปลงตามสถานีวัดน้ำฝนที่ใช้ตรวจพิสูจน์เมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ ในขณะที่ค่าแพกเตอร์ปรับแก้จากข้อมูลตรวจวัดจริงรายสถานีมีการเปลี่ยนแปลงอย่างสูง ดังนั้นจึงเกิดความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น ณ ตำแหน่งดังกล่าวและส่งผลกระทบต่อค่า RMSE ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของทุกตำแหน่งสถานีมีค่าสูงตามไปด้วย

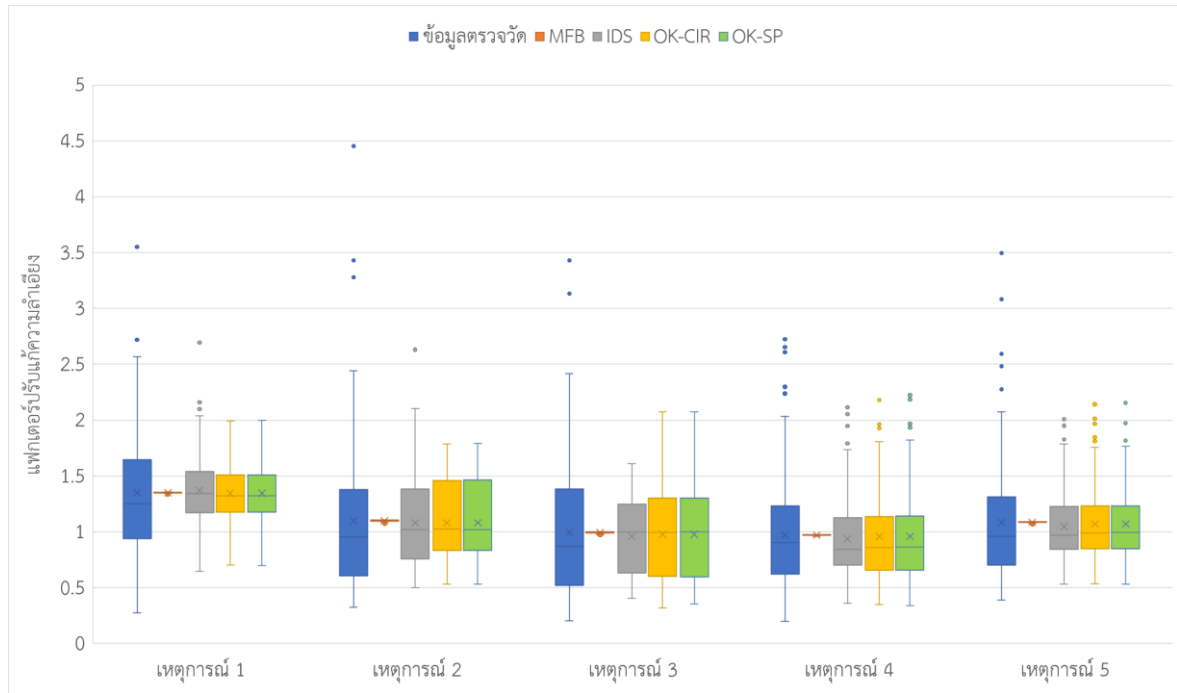
ในขณะที่วิธี IDW OK-CIR และ OK-SP สามารถจำลองค่าแพกเตอร์ปรับแก้ได้ครอบคลุมข้อมูลตรวจวัดเชิงพื้นที่ได้มากกว่า MFB อย่างชัดเจน (ดูรูปที่ 4 ประกอบ) เมื่อพิจารณาถึงการจำลองแพกเตอร์ปรับแก้เชิงพื้นที่ที่แสดงตัวอย่างในรูปที่ 5 และ 6 สำหรับเหตุการณ์ที่ 4 และ 5 ตามลำดับชี้ให้เห็นว่า เทคนิค OK สามารถจำลองน้ำฝนเรดาร์เชิงพื้นที่ในกรณีที่ตั้งค่าพื้นที่พิจารณาที่แปรปรวนไปจากสถานีข้างเคียงที่อยู่ติดกันได้ดีกว่า IDW (ดูรูปที่ 5) ทั้งนี้เนื่องจากวิธี OK ได้พิจารณาความแปรปรวนของสถานีโดยรอบที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทางและทำการถ่วงน้ำหนักสถานีโดยรอบตามรูปแบบของแบบจำลอง Semi-Variogram ที่กำหนด เพื่อนำมาประเมินค่าแพกเตอร์ความลำเอียง ณ ตำแหน่งที่พิจารณา ซึ่งแตกต่างจากวิธี IDW ที่คำนวณแพกเตอร์ความลำเอียงจากการพิจารณาเฉพาะระยะทางจากสถานีที่อยู่ข้างเคียงเพียงปัจจัยเดียว แต่ในกรณีที่สถานีที่อยู่ติดกันมีความสม่ำเสมอของปริมาณน้ำฝนดังตัวอย่างเช่นรูปที่ 6 วิธี IDW จะจำลองแพกเตอร์ปรับแก้ได้ดีกว่าวิธี OK ที่นำความแปรปรวนของสถานีโดยรอบมาพิจารณาด้วย สำหรับความถูกต้องของเทคนิค OK ขึ้นอยู่กับแบบจำลอง Semi-Variogram ที่เลือกใช้เป็นสำคัญ ในการศึกษาครั้งนี้ความถูกต้องของวิธี OK-CIR และ OK-SP มีความถูกต้องที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3 ค่า RMSE และ เปอร์เซ็นต์การเพิ่มประสิทธิภาพที่ได้จากเทคนิคการปรับแก้ต่างๆ

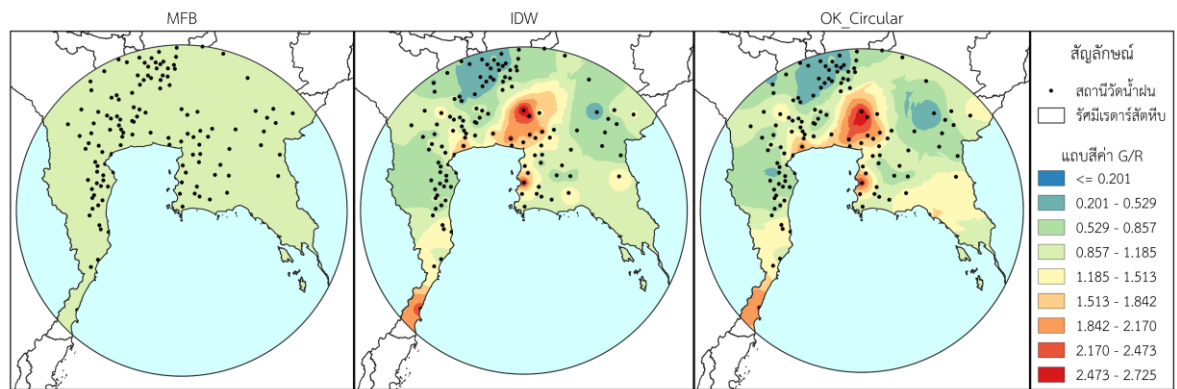
ลำดับเหตุการณ์	RMSE (มม.)					เปอร์เซ็นต์การเพิ่มประสิทธิภาพ			
	ระหว่างปริมาณน้ำฝนที่ผ่านการปรับแก้ด้วยวิธีต่างๆ และน้ำฝนตรวจวัด					MFB	IDW	OK-CIR	OK-SP
	NO BIAS	MFB	IDW	OK-CIR	OK-SP				
1	13.081	10.654	11.714	10.806	10.805	18.554	10.450	17.392	17.396
2	6.275	6.752	5.169	5.23	5.221	-7.602	17.625	16.653	16.791
3	9.643	9.813	6.859	6.43	6.381	-1.763	28.871	33.320	33.823
4	9.633	9.605	6.854	5.882	5.854	0.291	28.849	38.939	39.235
5	5.252	5.496	4.384	4.472	4.434	-4.646	16.527	14.851	15.575
เฉลี่ย	8.777	8.464	6.996	6.564	6.539	0.967	20.464	24.231	24.564



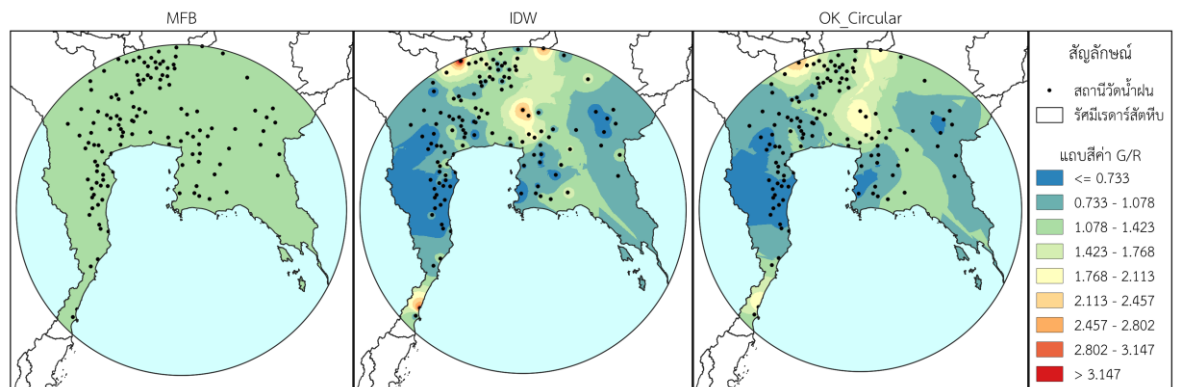
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า semi-variance กับระยะทางของแต่ละแบบจำลองเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัด



รูปที่ 4 การผันแปรของค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงที่ได้จากแต่ละวิธีสำหรับ 5 เหตุการณ์



รูปที่ 5 ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้เชิงพื้นที่ที่ได้จากวิธี MFB, IDW และ OK_CIR (เหตุการณ์ที่ 4)



รูปที่ 6 ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้เชิงพื้นที่ที่ได้จากวิธี MFB, IDW และ OK_CIR (เหตุการณ์ที่ 5)

4. สรุปผลการศึกษา

- 1) แบบจำลอง Semi-variogram ที่เหมาะสมกับข้อมูลน้ำฝนเรดาร์ ณ สถานีวัดห้วยสำหรับเหตุการณ์ที่พิจารณา ซึ่งเรียงลำดับความเข้ากันได้ของข้อมูลตรวจวัดจากมากไปน้อยสุด คือ แบบจำลอง Circular, Spherical และ Exponential ตามลำดับ
- 2) การประยุกต์ใช้เทคนิคแพกเตอร์ปรับแก้ความลำเอียงเชิงพื้นที่ทั้งวิธี IDW และ OK ให้ความถูกต้องในการประเมินน้ำฝนเรดาร์ได้ดีกว่าวิธี MFB อย่างมีนัยสำคัญ
- 3) เทคนิค OK สามารถจำลองน้ำฝนเรดาร์เชิงพื้นที่ในกรณีตำแหน่งที่พิจารณาที่มีค่าแปรปรวนไปจากสถานีข้างเคียงที่อยู่ติดกันได้ดีกว่า IDW เนื่องจากพิจารณาการถ่วงน้ำหนักน้ำฝนโดยรอบตามความแปรปรวนของข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทาง แทนการพิจารณาระยะทางเพียงอย่างเดียว
- 4) ความถูกต้องของวิธี OK ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแบบจำลอง Semi-Variogram ที่เลือกใช้ ซึ่งขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการตกของฝนเป็นสำคัญที่เปลี่ยนแปลงไปตามพื้นที่และเวลาเป็นสำคัญ สำหรับการศึกษานี้ แบบจำลอง Circular และ Spherical สามารถนำมาประเมินน้ำฝนได้ความถูกต้องใกล้เคียงกัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณกรมฝนหลวงและการบินเขตร สำหรับความอนุเคราะห์ข้อมูลเรดาร์สัปดาห์ และกรมอุตุนิยมวิทยาสำหรับความอนุเคราะห์ข้อมูลสถานีวัดน้ำฝนแบบอัตโนมัติสำหรับการดำเนินการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kock, W. E. (1973). *Chapter I - WAVE PROPERTIES*. Radar, Sonar, and Holography. W. E. Kock, Academic Press, pp 1-20.
- [2] สุทธิเชษฐ์ ช้วยสุข และ พรรณทิพย์ พุทธิรักษา มะเปี่ยม (2558). การประยุกต์ใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากเรดาร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจำลองปริมาณน้ำท่า. *การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 12*, นครปฐม, 8-9 ธันวาคม 2558.
- [3] Mapiam, P. P., and Chautsuk, S., (2018). Improving runoff estimates by increasing catchment subdivision complexity and resolution of rainfall data in the Upper Ping River Basin, Thailand. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences*. 17(2), 127-143.
- [4] Mapiam, P. P., Sharma, A., and Sriwongsitanon, N., (2014). Defining the Z-R relationship using gauge rainfall with coarse temporal resolution: Implications for flood forecasting. *ASCE's Journal of Hydrologic Engineering*, 19(8), 04014003.
- [5] มณฑล เมธาประยูร, ไพโรจน์ สมุทรักษ์ และ พรรณทิพย์ พุทธิรักษา มะเปี่ยม (2562). ฟังก์ชันย่อยส่วนเชิงเวลาสำหรับการประเมินน้ำฝนระยะสั้นกว่าหนึ่งชั่วโมงด้วยเรดาร์. *การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 16*, นครปฐม, 3-4 ธันวาคม 2562.
- [6] Mapiam, P. P., N. Sriwongsitanon, S. Chumchean and A. Sharma (2009). Effects of Rain Gauge Temporal Resolution on the Specification of a Z-R Relationship. *Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(7), pp.1302-1314.
- [7] Mapiam, P. P. and Sriwongsitanon, N., 2008. Climatological Z-R Relationship for Radar Rainfall Estimation in the Upper Ping River Basin. *ScienceAsia*, 34, 215-222.
- [8] Hanchoo Wong, R., U. Weesakul and S. Chumchean (2012). Bias correction of radar rainfall estimates based on a geostatistical technique. *ScienceAsia*, 38(4), pp.373-385
- [9] Goudenhoofd, E. and L. Delobbe (2009). Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 13(2), pp.195-203.
- [10] Pereira Fo, A. J., K. C. Crawford and C. L. Hartzell (1998). Improving WSR-88D Hourly Rainfall Estimates. *Weather and Forecasting*, 13(4), pp.1016-1028.
- [11] Chen, T., L. Ren, F. Yuan, X. Yang, S. Jiang, T. Tang, Y. Liu, C. Zhao and L. Zhang (2017). Comparison of Spatial Interpolation Schemes for Rainfall Data and Application in Hydrological Modeling. *Water*, 9(5), pp.342-360.
- [12] Um, M.-J., H. Yun, C.-S. Jeong and J.-H. Heo (2011). Factor analysis and multiple regression between topography and precipitation on Jeju Island, Korea. *Hydrology*, 410(3), pp.189-203.
- [13] Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Hydrology*, 228(1), pp.113-129.
- [14] F.-W. Chen and C.-W. Liu. Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan, *Paddy and Water Environment*, vol. 10, no. 3, pp. 209-222, 2012.

- [15] Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Hydrology*, 228(1), pp.113-129.
- [16] Hohn, M. E. (1991). An Introduction to Applied Geostatistics: by Edward H. Isaaks and R. Mohan Srivastava, 1989, Oxford University Press, New York, 561 p., ISBN 0-19-505012-6, ISBN 0-19-505013-4 (paperback), \$55.00 cloth, \$35.00 paper (US).
- [17] Sumner, M.E. 1999. Handbook of Soil Science. CRC press. Boca Raton, New York. Soil. Agriculture Handbook no. 60.
- [18] Nash, J.E. and J.V.Sutcliffe (1970), River Flow Forecasting Through Conceptual Models, Part 1: A Discussion of Principles, *Hydrology*, 10(3), pp.282-290.
- [19] ESRI (2016). How Kriging works. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>