

ขาดการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าโดยวิธีการ Phase Space Reconstruction (PSR)
Inflow Prediction using Phase Space Reconstruction (PSR)

กิริติการ นาคลินธ์¹, เผ่าเทพ ปานขาว², เขียรชาติ สุวงศ์³ และ นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์⁴

^{1,3} นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² วิศวกรแหล่งน้ำ บริษัท เอสพีที คอนซัลแตนท์ จำกัด

⁴ ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: ¹ krtk_1990@hotmail.com, ² phao1971@yahoo.com, ³ thienchart.su@ku.th

และ ⁴ fengnns@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าอย่างถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริงเป็นสิ่งก่อกำเนิดประโยชน์อย่างมากต่อการบริหารจัดการน้ำเพื่อการบรรเทาอุทกภัยและภัยแล้ง ดังนั้น การศึกษานี้จึงได้นำวิธีการ Phase Space Reconstruction (PSR) มาใช้คาดการณ์ปริมาณน้ำท่าทั้งแบบรายเดือนและรายวันที่สถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำปิงตอนบนที่มีข้อมูลอย่างน้อย 13 ปี จำนวน 19 สถานี รวมทั้งน้ำท่าที่ไหลเข้าเขื่อนภูมิพล เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล และเขื่อนแม่กวางอุดมธารา โดยผลการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนล่วงหน้า 1-12 เดือน สรุปได้ดังนี้ (1) ความถูกต้องของการคาดการณ์ล่วงหน้า 1-12 เดือนของทุกสถานีและเขื่อนมีแนวโน้มไม่แตกต่างกันมากนักแม้ว่าช่วงเวลาการคาดการณ์จะเพิ่มขึ้น โดย EI, Rel. RMSE และ r มีค่าระหว่าง 60%-63%, 69%-73% และ 0.79-0.82 ตามลำดับ และ (2) ความถูกต้องของการคาดการณ์ของทุกช่วงเวลาในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและเขื่อนมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดย EI, Rel. RMSE และ r มีค่าระหว่าง 47%-78%, 41%-106% และ 0.72-0.89 ตามลำดับ เนื่องจากบางสถานีวัดน้ำท่าหรือเขื่อนอาจได้รับผลกระทบจากการนำน้ำท่าไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ หรือสถิติข้อมูลไม่ยาวนานเพียงพอที่จะสร้าง Multi-Dimensional Phase Space เพื่อการคาดการณ์น้ำท่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ผลการคาดการณ์น้ำท่ารายวันล่วงหน้า 1-7 วัน สรุปได้ดังนี้ (1) ความถูกต้องของการคาดการณ์น้ำท่าล่วงหน้า 1-7 วัน สำหรับทุกสถานีและเขื่อนมีแนวโน้มน้อยลงเมื่อช่วงเวลาการคาดการณ์ยาวนานขึ้น โดยการคาดการณ์ล่วงหน้า 1 วัน มีความถูกต้องสูงสุด (ค่าเฉลี่ยของ EI, Rel. RMSE และ r เท่ากับ 68%, 93% และ 0.82 ตามลำดับ) และความถูกต้องต่ำสุดสำหรับการคาดการณ์ล่วงหน้า 7 วัน (ค่าเฉลี่ยของ EI, Rel. RMSE และ r เท่ากับ 32%, 136% และ 0.57 ตามลำดับ) เนื่องจากความลึกฝนรายวันเปลี่ยนแปลงมาจิ้งยากต่อการคาดการณ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อช่วงเวลาเพิ่มขึ้น (2) ความถูกต้องของทุกช่วงเวลาในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและเขื่อนแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดย EI, Rel. RMSE และ r มีค่าระหว่าง 17%-66%, 56%-237% และ 0.41-0.81 ตามลำดับ ทั้งนี้ การคาดการณ์น้ำท่าในลำน้ำสายหลักมีความถูกต้องมากกว่าในลำน้ำสายย่อย เนื่องจากน้ำท่าในลำน้ำสายย่อยขึ้นกับความลึกฝนของลำน้ำสายย่อยเท่านั้น ในขณะที่ปริมาณน้ำท่าในลำน้ำสายหลักจะขึ้นกับความลึกฝนและน้ำท่าของหลายลำน้ำสาขา ดังนั้น ปริมาณน้ำท่าอาจมีความมั่นคงแน่นอนมากกว่าจึงทำให้ง่ายกว่าในการคาดการณ์

คำสำคัญ: การคาดการณ์ปริมาณน้ำท่า, วิธีการ Phase Space Reconstruction (PSR), กลุ่มน้ำปิงตอนบน

Abstract

Accurate runoff prediction is extremely useful for water resources management to mitigate flood and drought situations. Therefore, Phase Space Reconstruction (PSR) was utilized in this study to predict monthly and daily runoff at 19 stations which have the data collection of at least 13 years, and to predict runoff flowing into Bhumibol Dam, Mae Ngat Somboon Chon Dam and Mae Kuang Udom Thara Dam. Results of runoff prediction for the next 1 to 12 months can be concluded as follows. Firstly, prediction accuracy for the next 1 to 12 months for every station and dams tend to be not much difference. The values of EI, Rel. RMSE and r varied between 60%-63%, 69%-73%, and 0.79-0.82, respectively. Secondly, prediction accuracy for the next 1 to 12 months at each station and dam tend to be difference. The values of EI, Rel. RMSE and r varied between 47%-78%, 41%-106% and 0.72-0.89, respectively. This is because some of stations and dams could affect by regulated flows or some stations may have too short period of record to be able to generate a suitable range of multi-dimensional phase space to be effectively used for flow prediction. Results of runoff prediction for the next 1 to 7 days can be concluded as in the followings. Firstly, an accuracy of runoff prediction for the next 1 to 7 days for all stations and dams tend to be more accurate for the shorter time prediction compared to the longer time prediction. The average values of EI, Rel. RMSE and r acquired for the next 1 day are 68%, 93% and 0.82, respectively. The lowest accuracy attained for the next 7 days with the average values of 32%, 136% and 0.57, respectively. This is according to basin rainfall depth tends to vary significantly, especially within a longer time frame. Secondly, prediction accuracy for the next 1 to 7 days at each station and dam tend to be significantly difference. The values of EI, Rel. RMSE and r varied between 17%-66%, 56%-237% and 0.41-0.81, respectively. Runoff prediction for the stations and dams which are located in the main river seem to be more accurate than those of located in tributaries. This is due to the fact that runoff at each tributary causes only by rainfall depth of its basin. On the other hand, runoff at the main Ping causes by rainfall as well as runoff in many tributaries that could cause runoff to be more certain to be predicted.

Keyword: Inflow Prediction, Phase Space Reconstruction (PSR), Upper Ping River Basin

1. บทนำ

การแก้ปัญหาด้านอุทกภัยและภัยแล้งของประเทศไทยจำเป็นที่จะต้องใช้ทั้งมาตรการใช้สิ่งก่อสร้างและมาตรการไม่ใช้สิ่งก่อสร้างร่วมกัน เพื่อลดผลกระทบด้านสังคมและสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ มาตรการไม่ใช้สิ่งก่อสร้างโดยวิธีการบริหารจัดการน้ำของอ่างเก็บน้ำสามารถเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหา ซึ่งการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าล่วงหน้าทั้งแบบรายเดือนและรายวันที่มีความถูกต้อง จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการน้ำของอ่างเก็บน้ำให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

กระบวนการเกิดน้ำท่าเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อน เนื่องจากการเกิดน้ำท่าเป็นกระบวนการทางพลศาสตร์ที่ถูกควบคุมโดยกลไกทางกายภาพมากมาย เช่น ปริมาณฝนที่เป็นตัวแปรอิสระที่มีความไม่แน่นอนทั้งในด้านสถานที่และเวลา สภาพทางกายภาพของพื้นที่รับน้ำฝน ชนิดและองค์ประกอบของดิน และการใช้ที่ดิน เป็นต้น จากความซับซ้อนของกระบวนการเกิดน้ำท่าดังกล่าว ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันจึงได้มีการนำวิธีการ Phase Space Reconstruction (PSR) ซึ่งดำเนินการโดยการนำอนุกรมน้ำท่าที่เกิดขึ้นตามเวลาที่แตกต่างกัน (Delay Time) มาหาความสัมพันธ์ระหว่างกัน โดยใช้จำนวนของอนุกรมน้ำท่าหรือจำนวนมิติอนุกรมน้ำท่า (Embedding Dimension) ที่หลากหลาย จากนั้นจึงนำอนุกรมน้ำท่าที่มีความสัมพันธ์มาสร้างข้อมูลน้ำท่าในแต่ละอนุกรมน้ำท่าด้วยวิธีการที่เหมาะสมที่เรียกว่า Local Mapping อาทิเช่น วิธีการ Local Polynomials, K Nearest Neighbor (KNN) เป็นต้น

จากในจำนวนงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎี Deterministic Chaos ผ่านทางวิธีการ Phase Space Reconstruction (PSR) เพื่อการคาดการณ์อนุกรมน้ำท่านั้น ผลงานศึกษาโดย Sivakumar et al. นับว่ามีความโดดเด่น โดยได้มีการนำทฤษฎีดังกล่าวมาสร้างอนุกรมน้ำท่าและอนุกรมน้ำฝนในหลายภูมิภาค อาทิเช่น งานศึกษาต่อไปนี้คือ Sivakumar et al. (1999); Sivakumar (2001); Sivakumar et al. (2002); Islam and Sivakumar (2002); Regonda et al. (2004); Sivakumar (2005); Sivakumar et al. (2006); Sivakumar et al. (2007); Sivakumar and Singh (2012) เป็นต้น

โดยในภาพรวมของงานศึกษาเหล่านั้นส่วนใหญ่เป็นการตรวจสอบให้เห็นว่า ข้อมูลอนุกรมน้ำท่าและอนุกรมน้ำฝนที่ศึกษาล้วนมีลักษณะเฉพาะเป็น Deterministic Chaos โดยผ่านทางหลักการของ Phase Space Reconstruction (PSR) จากนั้นจึงนำอนุกรมน้ำท่าและอนุกรมน้ำฝนมาหาความสัมพันธ์ของ Local Mapping เพื่อใช้คาดการณ์อนุกรมน้ำท่าและอนุกรมน้ำฝนสำหรับช่วงเวลาล่วงหน้าทั้งแบบรายวันและรายเดือน และในงานศึกษาเหล่านั้นยังให้ความสำคัญในการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Study) ของวิธีการ PSR เพื่อประเมินหาจำนวน Embedding Dimension และ Delay Time ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละช่วงเวลาคาดการณ์ล่วงหน้า เพื่อให้เกิดการเข้ากันได้ดีระหว่างอนุกรมน้ำฝน-น้ำท่า ที่ได้จากการคาดการณ์กับที่ได้จากการตรวจวัดภาคสนาม นอกจากนั้นแล้ว หนึ่งในจำนวนงานศึกษาเหล่านั้นได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของความถูกต้องของผลการคาดการณ์อนุกรมน้ำท่าสำหรับเวลาล่วงหน้า 1 ถึง 7 วัน ระหว่างวิธีการ Phase Space Reconstruction (PSR) กับ Artificial Neural Network (ANN) โดยผลการศึกษาพบว่า ทั้งวิธีการ PSR และวิธีการ ANN มีความสามารถในการคาดการณ์อนุกรมน้ำท่าได้ใกล้เคียงกับอนุกรมน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดภาคสนาม อย่างไรก็ตาม วิธีการ PSR ให้ความถูกต้องของผลการคาดการณ์อนุกรมน้ำท่าที่ดีกว่าผลที่ได้จากการใช้วิธีการ ANN

ดังนั้น จึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ในการนำวิธีการ Phase Space Reconstruction (PSR) มาใช้คาดการณ์ปริมาณน้ำท่าทั้งแบบรายเดือนและรายวันสำหรับสถานีวัดน้ำท่าและเขื่อนที่สำคัญที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปิงตอนบน เพื่อนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ประกอบการบริหารจัดการน้ำและอ่างเก็บน้ำ รวมทั้งสามารถนำกระบวนการที่ได้ไปประยุกต์ใช้เพื่อการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำอื่น ๆ ต่อไป

2. วัตถุประสงค์

(1) เพื่อศึกษาทฤษฎีของวิธีการ Phase Space Reconstruction (PSR) สำหรับการประเมินน้ำท่า และนำมาสร้างเป็นโปรแกรมการประยุกต์ใช้ที่สามารถสอบเทียบพารามิเตอร์ของวิธีการ PSR ได้โดยอัตโนมัติ

(2) เพื่อคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าแบบรายเดือนล่วงหน้า 1 ถึง 12 เดือน และแบบรายวันล่วงหน้า 1 ถึง 7 วัน ที่สถานีวัดน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนที่มีสถิติข้อมูลยาวนานเพียงพอ รวมทั้งปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าเขื่อนภูมิพล เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล และ เขื่อนแม่งวงอุดมธารา โดยวิธีการ Phase Space Reconstruction (PSR)

3. ทฤษฎีและขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 ทฤษฎี

วิธีการ Phase Space Reconstruction (PSR) ดำเนินการโดยการนำอนุกรมน้ำท่าในอดีต X_i ($i = 1, 2, \dots, N$) มาวางเหลื่อมกัน (Delay Time; τ) และหาความสัมพันธ์ระหว่างกันโดยใช้จำนวนมิติอนุกรมน้ำท่า (Embedding Dimension; m) ที่หลากหลาย เพื่อการสร้าง Multi-Dimensional Phase Space ซึ่งสามารถสร้างโดยใช้รูปแบบดังแสดงในสมการที่ (1)

$$Y_j = (X_j, X_{j+\tau}, X_{j+2\tau}, \dots, X_{j+(m-1)\tau}) \quad (1)$$

เมื่อ $j = 1, 2, \dots, N-(m-1)\tau$

โดยที่ m คือ Dimension ของเวกเตอร์ Y_j ซึ่งหมายถึง Embedding Dimension และ τ คือ Delay Time (Packard et al, 1980; Takens, 1981)

การประเมินน้ำท่าโดยวิธีการ Phase Space Reconstruction (PSR) สามารถแสดงได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

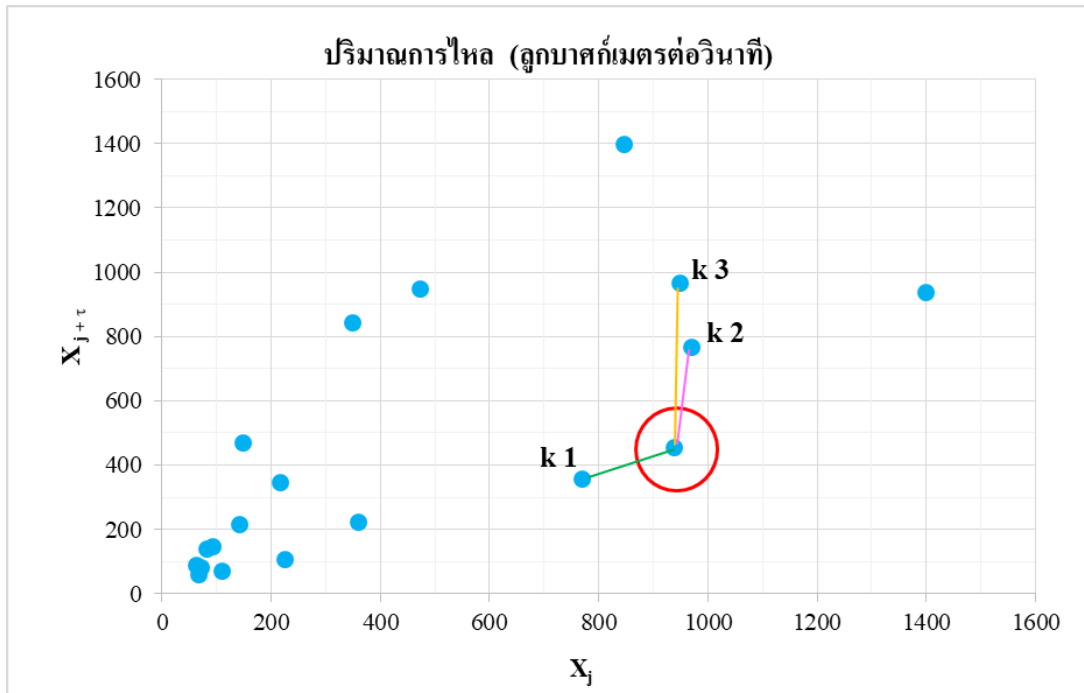
(1) สร้าง Phase-Space ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นการสร้างอนุกรมน้ำท่าในเดือนที่ 21 โดยวิธี Phase Space Reconstruction โดยใช้ $m = 2$, $\tau = 1$ และ $k = 3$

(2) นำชุดของอนุกรมน้ำท่าที่สร้างขึ้นมาหาความสัมพันธ์กันเพื่อใช้คาดการณ์น้ำท่าล่วงหน้าด้วยวิธีการ K Nearest Neighbor (KNN) ซึ่งมีหลักการคือ เมื่อสร้าง Multi-dimensional Phase Space แล้ว จากนั้นจะสร้างข้อมูลน้ำท่าในอนาคตโดยเริ่มจากข้อมูลน้ำท่า ณ เวลาปัจจุบัน โดยการหาระยะทางระหว่างจุดของชุดข้อมูลน้ำท่าในปัจจุบันถึงจุดของชุดข้อมูลน้ำท่าอื่น ๆ ใน space จากนั้นเลือกจำนวนจุดที่ใกล้ที่สุดซึ่งหมายถึงจำนวน k ของ K Nearest Neighbor เพื่อนำข้อมูลน้ำท่าค่าถัดไปในแต่ละ k มาหาค่าเฉลี่ยตามจำนวน k ที่เลือก

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในสิ่งที่ได้ยกตัวอย่างการสร้าง Phase Space Reconstruction (PSR) สำหรับกรณีที่ $m = 2$, $\tau = 1$ และ $k = 3$ ดังแสดงในตารางที่ 1 จากตารางดังกล่าวจะเห็นว่าข้อมูลน้ำท่ามีถึงเดือนที่ 20 ดังนั้น จะทำการคาดการณ์ข้อมูลน้ำท่าในเดือนที่ 21 ซึ่งดำเนินการได้โดยการนำอนุกรมน้ำท่าที่มี 2 ชุด หรือ 2 มิติ ไปพล็อตลงในรูปที่ 1 ซึ่งสามารถพล็อตจุดของอนุกรมน้ำท่าได้จำนวน 19 จุด จากนั้นหาระยะทางระหว่างจุดสุดท้ายคือจุดของเดือนที่ 19 และชุดข้อมูลอื่นใน Space อีกจำนวน 18 จุด โดยระยะทางสำหรับจุดของชุดข้อมูลทั้ง 18 จุด แสดงดังในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระยะทางที่ใกล้ที่สุด 3 ค่า ซึ่งหมายถึงจำนวน K Nearest Neighbor เท่ากับ 3 มีค่าเท่ากับ 194.6, 315.0 และ 514.2 โดยข้อมูลน้ำท่าลำดับถัดไปของจุดของชุดข้อมูลทั้ง 3 จุด เท่ากับ 224.8, 359.5 และ 768.4 ซึ่งเกิดขึ้นในเดือนที่ 10, 9 และ 8 ตามลำดับ ดังนั้น ข้อมูลน้ำท่าที่ได้จากการคาดการณ์จะเท่ากับค่าเฉลี่ยของข้อมูลน้ำท่าทั้ง 3 ค่า ดังกล่าว ซึ่งเท่ากับ 450.9 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งข้อมูลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดในเดือนที่ 21 ซึ่งเท่ากับ 332.6 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งในกรณีนี้เป็นการคาดการณ์ข้อมูลสำหรับ 1 เดือน ถัดไป ถ้าในกรณีที่ต้องการคาดการณ์สำหรับ 2 เดือน สามารถกระทำได้ในทำนองเดียวกันดังอธิบายข้างต้น แต่จะนำข้อมูลน้ำท่าซึ่งเท่ากับ 450.9 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที มาใช้ประกอบการคาดการณ์น้ำท่าร่วมกับข้อมูลดิบ

ตารางที่ 1 การสร้างอนุกรมน้ำท่าในเดือนที่ 21 โดยวิธี Phase Space Reconstruction โดยใช้ $m=2$, $\tau = 1$ และ $k = 3$

เดือนที่	ปริมาณการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)		ระยะทางจากจุด ของชุดข้อมูลเดือนที่ 19	ลำดับของระยะทางที่ใกล้ กับจุดของชุดข้อมูล เดือนที่ 19
	X_j	$X_{j+\tau}$		
1	67.4	62.6	954.9	18
2	62.6	91.3	947.9	17
3	91.3	146.9	901.0	12
4	146.9	472.3	791.3	9
5	472.3	948.0	678.3	6
6	948.0	969.0	514.2	3
7	969.0	768.4	315.0	2
8	768.4	359.5	194.6	1
9	359.5	224.8	622.6	4
10	224.8	109.2	792.6	10
11	109.2	71.6	913.1	14
12	71.6	81.2	943.6	15
13	81.2	142.2	912.1	13
14	142.2	215.7	831.0	11
15	215.7	348.6	730.1	8
16	348.6	845.1	706.9	7
17	845.1	1398.2	947.9	16
18	1398.2	938.0	667.2	5
19	938.0	454.9		
20	454.9			
21	332.6			



รูปที่ 1 ระยะทางระหว่างจุดของชุดข้อมูลในเดือนที่ 19 (วงกลมสีแดง) ถึงจุดอื่นใน space ของข้อมูล

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

(1) ศึกษาทฤษฎีของวิธีการ Phase Space Reconstruction (PSR) สำหรับการประเมินน้ำท่า และสร้างโปรแกรมการประยุกต์ใช้ที่สามารถสอบเทียบพารามิเตอร์ของวิธีการ PSR ได้โดยอัตโนมัติ

(2) คัดเลือกสถานีวัดน้ำท่าที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปิงตอนบนเพื่อการคาดการณ์น้ำท่าโดยวิธีการ PSR ซึ่งจากการรวบรวมและตรวจสอบข้อมูลน้ำท่า พบว่า ในลุ่มน้ำปิงตอนบนมีจำนวนสถานีวัดน้ำท่าทั้งสิ้น 61 สถานี และมีสถานีวัดน้ำท่าจำนวน 19 สถานี ที่มีข้อมูลไม่น้อยกว่า 13 ปี เพื่อให้มีข้อมูลเพียงพอสำหรับการฝึกหัด (Training) และการทดสอบ (Testing) โปรแกรม PSR

(3) ประยุกต์ใช้โปรแกรม PSR ที่สร้างขึ้น เพื่อการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าแบบรายเดือนล่วงหน้า 1 ถึง 12 เดือน และแบบรายวันล่วงหน้า 1 ถึง 7 วัน ที่สถานีวัดน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนทั้ง 19 สถานี รวมทั้งปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าเขื่อนภูมิพล เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล และ เขื่อนแม่กวางอุดมธารา โดยการแบ่งข้อมูลน้ำท่าออกเป็น 2 ชุด คือ ข้อมูล 70% สำหรับการสร้าง Multi-Dimensional Phase Space ซึ่งเรียกว่าการฝึกหัด (Training) และข้อมูล 30% เพื่อการทดสอบ (Testing) โปรแกรม PSR ที่สร้างขึ้นเพื่อการคาดการณ์น้ำท่า

(4) เปรียบเทียบผลจากการคาดการณ์น้ำท่าทั้งแบบรายเดือนและรายวันที่ได้จากกระบวนการ PSR กับข้อมูลน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด โดยใช้ตัวแปรทางสถิติดังนี้ (1) สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient; r) (2) ดัชนีประสิทธิภาพ (Efficiency Index; EI) และ (3) รากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองสัมพันธ์ (Relative Root Mean Square Error; Rel. RMSE)

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าโดยวิธีการ Phase Space Reconstruction (PSR) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

4.1 ผลการสร้างโปรแกรม PSR

โปรแกรม PSR ถูกเขียนขึ้นโดยโปรแกรม MATLAB ตามขั้นตอนการดำเนินงานที่อธิบายด้วย Flowchart ดังในรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังนี้

- (1) เริ่มโปรแกรม
- (2) ใส่ข้อมูลนำเข้าโปรแกรมซึ่งประกอบด้วย (1) อนุกรมน้ำท่ารายเดือนจากการตรวจวัด (2) ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ Embedding Dimension (m) (3) ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ Delay Time (τ) (4) ค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ K Nearest Neighbor (k) และ (5) เวลาล่วงหน้าในการคาดการณ์น้ำท่า
- (3) กำหนดค่าพารามิเตอร์ Delay Time (τ) เท่ากับ 1 เพื่อเป็นค่าเริ่มต้นในการสร้าง Multi-Dimensional Phase Space
- (4) กำหนดค่าพารามิเตอร์ Embedding Dimension (m) เท่ากับ 2 เพื่อเป็นค่าเริ่มต้นในการสร้าง Multi-Dimensional Phase Space
- (5) สร้าง Multi-Dimensional Phase Space ตามมิติ τ และ m ที่กำหนด และนำ Phase Space จำนวน 70% ของข้อมูลอนุกรมน้ำท่ารายเดือน สำหรับใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการฝึกหัด (Training) หาชุดพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด
- (6) กำหนดค่าพารามิเตอร์ K Nearest Neighbor (k) เท่ากับ 1 เพื่อเป็นค่าเริ่มต้นในกระบวนการการคาดการณ์น้ำท่า
- (7) คาดการณ์น้ำท่าตามเวลาล่วงหน้าที่กำหนด
- (8) ตรวจสอบผลการคาดการณ์น้ำท่าจากวิธี PSR ว่าครบตามจำนวนข้อมูลอนุกรมน้ำท่าที่กำหนดไว้สำหรับการทดสอบ (Testing) คือจำนวน 30% ของอนุกรมน้ำท่าทั้งหมดที่เหลือจากอนุกรมน้ำท่า 70% ที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการฝึกหัด (Training) หากครบแล้วโปรแกรมจะทำงานต่อในขั้นตอนที่ (10) หากยังไม่ครบโปรแกรมจะทำงานในขั้นตอนที่ (9)
- (9) เพิ่มข้อมูลอนุกรมน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดที่ผ่านการคาดการณ์น้ำท่าตามเวลาล่วงหน้าที่กำหนดเพิ่มเข้าไปใน Multi-Dimensional Phase Space สำหรับใช้ในกระบวนการการคาดการณ์น้ำท่าในขั้นตอนที่ (7)
- (10) คำนวณตัวแปรทางสถิติเพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลการคาดการณ์น้ำท่า แต่ละชุดพารามิเตอร์เทียบกับข้อมูลตรวจวัด โดยค่าตัวแปรทางสถิติที่นำมาใช้ในการประเมินผลการคาดการณ์ประกอบด้วย (1) สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient; r) (2) ดัชนีประสิทธิภาพ (Efficiency Index; EI) และ (3) รากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยยกกำลังสองสัมพัทธ์ (Relative Root Mean Square Error; Rel. RMSE)

(11) ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ K Nearest Neighbor (k) ว่าเท่ากับค่าสูงสุด (k_{max}) ที่นำเข้าหรือไม่ ถ้า k เท่ากับ k_{max} ให้ดำเนินการในขั้น (11) ต่อไป หาก k น้อยกว่า k_{max} จะไปเพิ่มค่า k เป็น $k+1$ และวนรอบกลับไปดำเนินการในขั้นตอนที่ (7) ต่อไป

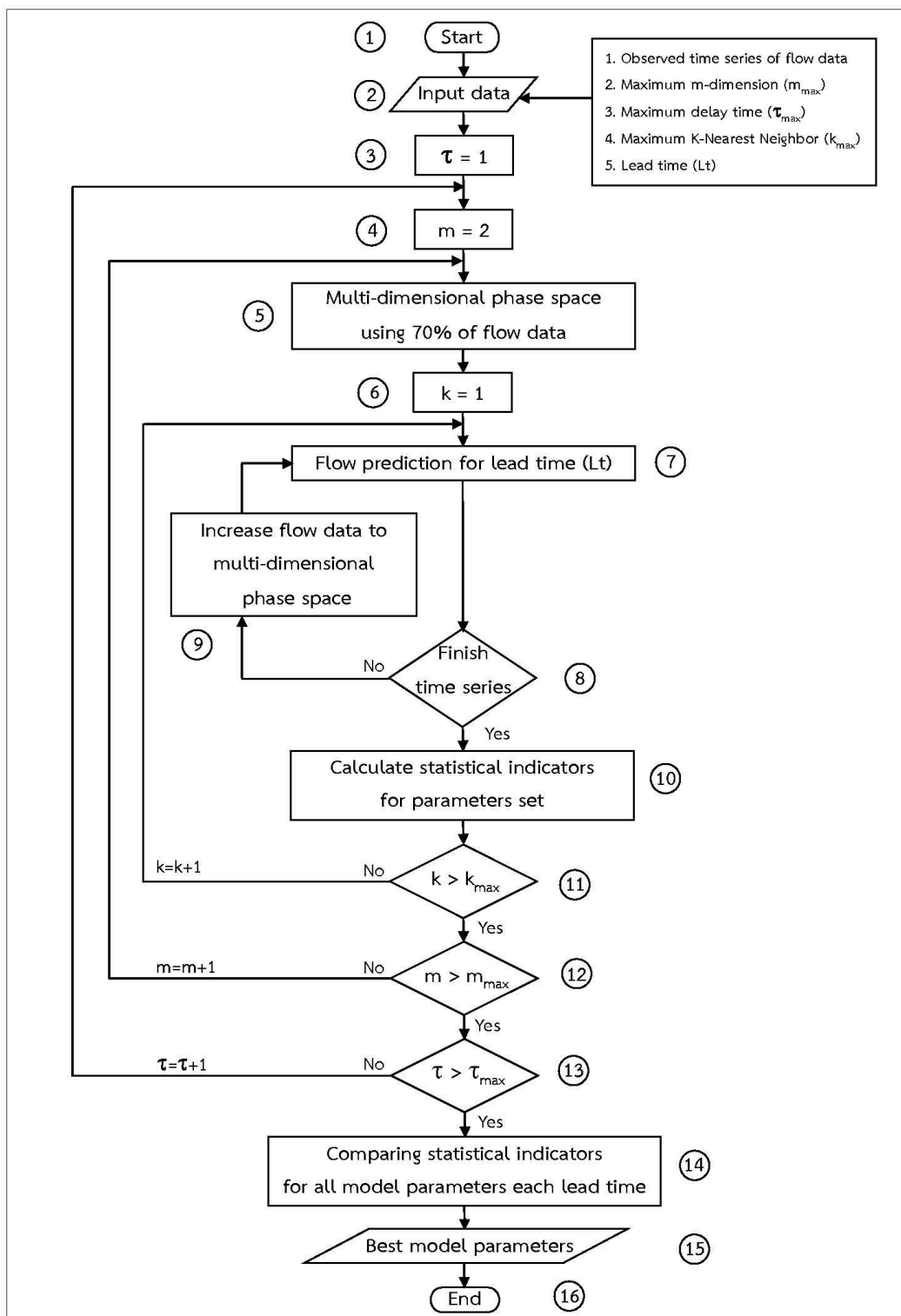
(12) ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ Embedding Dimension (m) เท่ากับค่าสูงสุด (m_{max}) ที่นำเข้าหรือไม่ ถ้า m เท่ากับ m_{max} ให้ดำเนินการในขั้น (12) ต่อไป หาก m น้อยกว่า m_{max} จะไปเพิ่มค่า m เป็น $m+1$ และวนรอบกลับไปดำเนินการในขั้นตอนที่ (5) ต่อไป

(13) ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ Delay Time (τ) เท่ากับค่าสูงสุด (τ_{max}) ที่นำเข้าหรือไม่ ถ้า τ เท่ากับ τ_{max} ให้ดำเนินการในขั้น (13) ต่อไป หาก τ น้อยกว่า τ_{max} จะไปเพิ่มค่า τ เป็น $\tau+1$ และวนรอบกลับไปดำเนินการในขั้นตอนที่ (4) ต่อไป

(14) เปรียบเทียบค่าตัวแปรทางสถิติของทุกชุดพารามิเตอร์ เพื่อหาชุดพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด สำหรับการคาดการณ์น้ำท่าล่วงหน้า

(15) ได้ชุดพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด

(16) จบโปรแกรม



รูปที่ 2 ขั้นตอนการสร้างโปรแกรม PSR เพื่อการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่า

4.2 ผลการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าแบบรายเดือนล่วงหน้า 1 ถึง 12 เดือน

การประยุกต์ใช้วิธีการ Phase Space Reconstruction (PSR) เพื่อการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ารายเดือนล่วงหน้าตั้งแต่ 1 ถึง 12 เดือน โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายเดือนที่สถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำปิงตอนบนที่ได้รับการคัดเลือก จำนวน 19 สถานี ซึ่งประกอบด้วยสถานีวัดน้ำท่า P.1, P.4A, P.5, P.14, P.20, P.21, P.24A, P.42, P.56A, P.64, P.65, P.67, P.71, P.73, P.75, P.76, P.77, P.79 และ P.80 รวมทั้งการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ารายเดือนล่วงหน้าตั้งแต่ 1 ถึง 12 เดือน กับข้อมูลปริมาณการไหลเข้าเขื่อนภูมิพล เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล และเขื่อนแม่งัดอุตรดิตถ์ ทั้งนี้ ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

(1) ผลการประเมินตัวแปรทางสถิติในภาพรวมของแต่ละช่วงเวลาการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนล่วงหน้าของทุกสถานีวัดน้ำท่าและเขื่อน

ผลการประเมินตัวแปรทางสถิติในภาพรวมของแต่ละช่วงเวลาการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนล่วงหน้าของทุกสถานีวัดน้ำท่าและทุกเขื่อน แสดงดังในตารางที่ 2 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่าทางสถิติที่ดีที่สุดคือการคาดการณ์ล่วงหน้า 12 เดือน เนื่องจากการคาดการณ์สำหรับเดือนที่พิจารณาซึ่งง่ายต่อการคาดการณ์มากที่สุด ในขณะที่ค่าสถิติที่ด้อยที่สุดคือการคาดการณ์ล่วงหน้า 6 เดือน เนื่องจากการคาดการณ์ของเดือนที่อยู่ระหว่างกลาง อย่างไรก็ตาม ผลการคาดการณ์สำหรับทั้ง 12 เดือน มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือ EI มีค่าระหว่าง 59.5%-63.2% และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 60.6% สำหรับ Rel. RMSE มีค่าระหว่าง 69.4%-73.0% และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 72.0% และค่า r มีค่าระหว่าง 0.79-0.82 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.80

จากผลการศึกษาการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ารายเดือนล่วงหน้าด้วยชุดพารามิเตอร์ที่ให้ผลการคาดการณ์ที่ถูกต้องที่สุด พบว่า ผลการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ารายเดือนมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดสำหรับในกรณีปริมาณการไหลต่ำ ๆ ถึงกลาง ๆ (Low to Medium Flows) แต่ในกรณีปริมาณการไหลสูง ๆ (High Flows) นั้น พบว่า ผลจากการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ามีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการตรวจวัด และเมื่อมาพิจารณาพารามิเตอร์ของแบบจำลองพบว่า ค่าของ K-nearest มีอิทธิพลต่อการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าที่มีค่าสูง ๆ โดยพบว่าในกรณีที่ K-nearest เท่ากับ 1 นั้น โปรแกรม PSR จะนำปริมาณน้ำท่าที่เหมาะสมต่อการคาดการณ์เพียง 1 ค่า มาใช้เป็นผลการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าทำให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับการตรวจวัดมากขึ้น ดังนั้น จึงเป็นที่มาของการเพิ่มความถูกต้องของผลการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนล่วงหน้าด้วยการผสมผลการคาดการณ์น้ำท่าจากพารามิเตอร์ 2 ชุด กล่าวคือ ชุดที่ 1 สำหรับการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าที่มีค่าต่ำ ๆ ถึงกลาง ๆ (Low to Medium Flows) โดยการกำหนดให้ค่าของ K-nearest มีค่าเท่าใดก็ได้ระหว่าง 1 ถึง 15 และชุดที่ 2 สำหรับการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าที่มีค่าสูง ๆ (High Flows) โดยการกำหนดให้ค่าของ K-nearest มีค่าเท่ากับ 1 เท่านั้น และนำปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการคาดการณ์ทั้ง 2 กรณี มาผสมกัน ซึ่งจำเป็นต้องหาจุดรวมที่เหมาะสม ซึ่งจะใช้การลองผิดลองถูก (Trial and Error) ด้วยค่าเริ่มต้นของการแบ่งขนาดของปริมาณการไหล (Threshold Flow; Q) ที่เหมาะสมที่สุดที่จะให้ได้ค่าตัวแปรทางสถิติที่ดีที่สุดจากผลการรวมปริมาณการไหลที่ได้จากพารามิเตอร์ทั้ง 2 ชุด ซึ่งกระบวนการดังกล่าวในที่นี่ให้ชื่อว่าการผสมปริมาณการไหล (Mix Flows) ซึ่งผลการปรับปรุงตัวแปรทางสถิติในภาพรวมของแต่ละช่วงเวลาการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนล่วงหน้าของทุกสถานีและเขื่อน แสดงดังในตารางที่ 2 โดยในตารางแสดงให้เห็นว่า EI, Rel. RMSE และ r ที่ผ่านกระบวนการ Mix

Flows คิดเป็นค่าเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 4.0%, 3.2% (ลดลง) และ 1.5% ตามลำดับ ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการ Mix Flows มีประโยชน์ต่อการเพิ่มความถูกต้องให้กับผลการคาดการณ์ในทุกช่วงเวลาของการคาดการณ์

ตารางที่ 2 ค่าของตัวแปรทางสถิติในแต่ละช่วงเวลาของผลการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนของทุกสถานีวัดน้ำท่าและเขื่อนรวมทั้งการปรับปรุงตัวแปรทางสถิติจากกระบวนการ Mix Flows

ลำดับ ที่	เวลาคาดการณ์ ล่วงหน้า (เดือน)	EI (%)			Rel. RMSE (%)			r		
		ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
1	12	62.4 (4.7)	88.3 (0.2)	46.5 (0.0)	69.4 -(4.2)	100.2 (0.0)	26.9 -(0.7)	0.81 (1.73)	0.94 -(0.23)	0.71 (0.00)
4	1	63.2 (1.6)	79.2 (0.5)	48.6 (0.0)	70.6 -(1.5)	104.0 (0.0)	44.1 -(3.4)	0.82 (0.37)	0.90 -(0.26)	0.74 (0.00)
2	9	61.4 (5.4)	83.2 -(6.5)	44.8 (3.8)	71.8 -(4.3)	113.8 (0.0)	40.0 -(0.8)	0.80 (1.97)	0.92 -(1.98)	0.70 (0.00)
9	11	60.7 (2.7)	78.9 -(4.2)	41.1 (0.0)	71.7 -(2.1)	111.8 (0.0)	39.1 (0.0)	0.80 (0.82)	0.89 -(0.25)	0.69 (0.00)
8	7	60.5 (3.8)	80.5 (2.6)	45.1 (0.0)	72.5 -(3.1)	109.3 (0.0)	36.2 (0.0)	0.80 (1.56)	0.90 (1.01)	0.69 (0.00)
7	8	60.5 (4.5)	81.7 -(2.6)	43.1 (5.2)	72.8 -(3.4)	112.7 (0.0)	36.2 (0.0)	0.79 (1.79)	0.91 -(0.16)	0.69 (0.00)
5	10	60.1 (5.5)	80.8 -(4.7)	45.2 (0.0)	72.6 -(4.6)	112.9 (0.0)	40.7 (0.0)	0.79 (2.10)	0.90 -(1.91)	0.70 (0.00)
6	3	59.6 (5.0)	77.5 (4.9)	44.4 (4.3)	72.3 -(3.6)	99.2 (0.0)	41.7 (3.0)	0.80 (2.01)	0.90 (0.83)	0.71 (3.39)
10	5	59.8 (3.7)	74.9 (8.6)	42.9 -(22.1)	72.6 -(3.1)	110.1 (0.0)	37.9 (0.0)	0.79 (1.12)	0.87 (3.94)	0.66 (0.00)
3	2	59.8 (7.0)	74.3 (6.2)	46.0 (3.0)	72.6 -(5.5)	101.3 (0.0)	47.3 -(5.1)	0.79 (3.54)	0.88 (3.12)	0.70 (4.33)
12	4	59.5 (1.6)	72.6 (12.0)	42.6 (4.4)	72.5 -(0.9)	101.3 (0.0)	40.9 -(4.6)	0.79 (0.46)	0.87 (4.14)	0.74 -(1.84)
11	6	59.8 (2.7)	78.3 (0.0)	42.8 (0.0)	73.0 -(2.3)	109.6 (0.0)	36.1 (0.0)	0.80 (0.80)	0.89 (0.00)	0.67 (0.00)
ค่าเฉลี่ย		60.6	79.2	44.4	72.0	107.2	38.9	0.80	0.90	0.70
เปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย		(4.0)	(1.2)	-(0.1)	-(3.2)	(0.0)	-(1.1)	(1.52)	(0.65)	(0.49)

(2) ผลการประเมินตัวแปรทางสถิติในภาพรวมของการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนของทุกช่วงเวลาในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและเขื่อน

ผลการประเมินตัวแปรทางสถิติในภาพรวมของการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนของทุกช่วงเวลาในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและเขื่อน แสดงดังใน**ตารางที่ 3** จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าทางสถิติที่ดีที่สุดคือการคาดการณ์สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.80 ในขณะที่ค่าสถิติที่ด้อยที่สุดคือการคาดการณ์สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.76 ทั้งนี้ ผลการคาดการณ์สำหรับทั้ง 19 สถานี และ 3 เขื่อน มีค่าแตกต่างกันพอสมควร กล่าวคือ EI มีค่าระหว่าง 46.5%-78.0% และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 60.6% สำหรับ Rel. RMSE มีค่าระหว่าง 40.8%-105.9% และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 72.0% และค่า r มีค่าระหว่าง 0.72-

0.89 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.80 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนล่วงหน้า 1 ถึง 12 เดือน ให้ผลอยู่ในเกณฑ์ที่แตกต่างกันไปในแต่ละสถานีและแต่ละเขื่อน

ผลการปรับปรุงตัวแปรทางสถิติในภาพรวมของทุกช่วงเวลาตั้งแต่ 1 ถึง 12 เดือน ในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและเขื่อน แสดงดังในตารางที่ 3 โดยในตารางแสดงให้เห็นว่า EI, Rel. RMSE และ r ที่ผ่านกระบวนการ Mix Flows คิดเป็นค่าเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 4.0%, 3.2% (ลดลง) และ 1.5% ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่าในภาพรวมของกระบวนการ Mix Flows นั้น นับว่ามีประโยชน์ต่อการเพิ่มความถูกต้องให้กับผลการคาดการณ์น้ำท่าในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและแต่ละเขื่อน

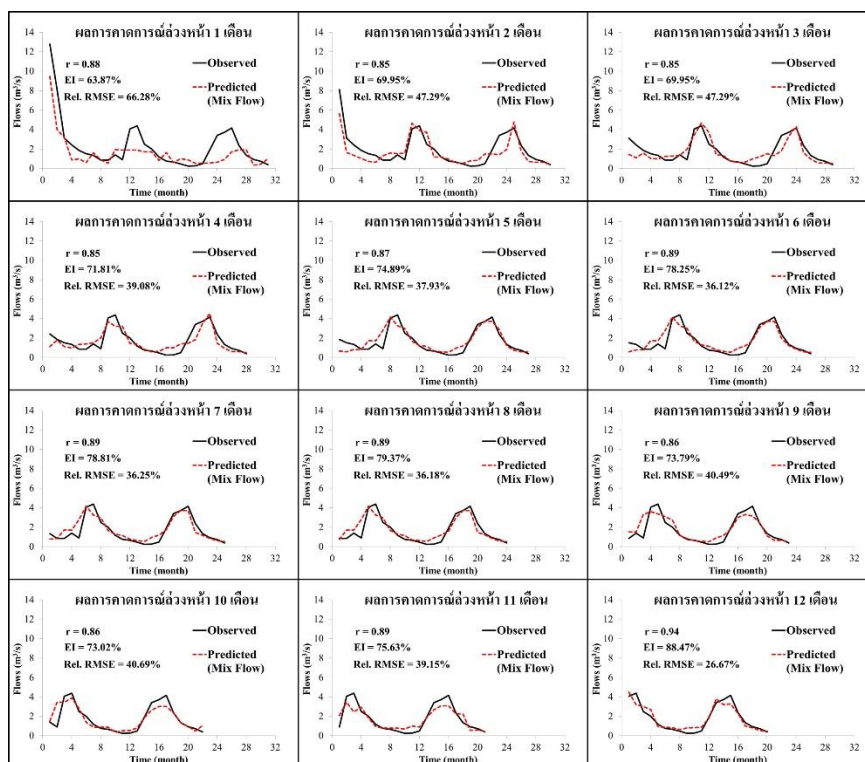
ตารางที่ 3 ค่าของตัวแปรทางสถิติของผลการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนของทุกช่วงเวลาในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและแต่ละเขื่อนรวมทั้งการปรับปรุงตัวแปรทางสถิติจากกระบวนการ Mix Flows

ลำดับที่	สถานีวัดน้ำท่า	พื้นที่รับน้ำฝน (ตร.กม.)	จำนวนสถิติข้อมูล (ปี)	EI (%)			Rel. RMSE (%)			r		
				ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
1	P.80	129	13	74.3 (0.7)	88.3 (0.2)	63.9 (0.0)	40.8 (0.7)	66.3 (0.0)	26.9 (-0.7)	0.87 (0.39)	0.94 (-0.23)	0.82 (3.33)
3	P.56A	546	13	78.0 (-5.7)	83.2 (-0.6)	72.6 (-12.7)	45.5 (9.4)	51.4 (15.6)	40.0 (4.9)	0.89 (-1.58)	0.92 (-0.98)	0.87 (-2.10)
4	P.64	502	18	69.3 (-0.7)	73.8 (0.2)	67.2 (-8.1)	48.0 (0.7)	52.2 (7.6)	41.8 (-0.2)	0.86 (-0.69)	0.87 (2.11)	0.84 (-3.83)
2	P.65	243	15	71.2 (7.3)	74.2 (9.5)	66.2 (0.9)	53.6 (-9.9)	59.2 (-4.2)	50.0 (-14.2)	0.86 (2.73)	0.87 (3.19)	0.83 (0.15)
5	เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล	1,281	30	72.0 (1.0)	79.2 (0.0)	70.1 (-2.4)	60.8 (-1.4)	63.9 (-0.9)	51.8 (0.0)	0.86 (0.80)	0.90 (0.99)	0.84 (-0.72)
8	P.75	3,080	13	55.8 (-1.7)	61.7 (16.0)	44.4 (-24.7)	48.9 (1.1)	54.1 (13.1)	44.1 (-10.1)	0.77 (3.57)	0.81 (10.54)	0.70 (-4.42)
6	P.71	1,722	14	60.7 (11.6)	65.0 (12.9)	55.4 (1.3)	64.1 (-9.8)	70.3 (-0.8)	57.1 (-5.8)	0.80 (3.65)	0.82 (4.55)	0.77 (-0.72)
7	เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล	569	21	65.2 (10.4)	71.4 (11.4)	62.4 (0.4)	73.4 (-8.9)	77.6 (-0.1)	60.2 (-5.7)	0.82 (4.35)	0.85 (6.25)	0.81 (-1.62)
11	P.14	3,836	42	61.9 (4.0)	65.1 (14.2)	60.9 (0.6)	68.9 (-3.4)	69.4 (0.0)	66.1 (-14.3)	0.80 (1.38)	0.81 (8.09)	0.79 (0.19)
10	P.73	14,814	16	68.6 (4.0)	73.5 (3.5)	63.1 (5.7)	78.8 (-4.4)	84.4 (-0.8)	70.7 (-4.4)	0.84 (1.47)	0.88 (0.00)	0.80 (2.28)
9	P.79	136	13	46.5 (9.1)	57.0 (17.7)	41.1 (0.0)	52.6 (-4.5)	57.0 (-2.2)	46.7 (-7.2)	0.75 (1.87)	0.87 (0.00)	0.69 (0.71)
12	เขื่อนภูมิพล	26,386	31	61.5 (6.7)	68.4 (3.7)	59.7 (6.5)	74.8 (-5.5)	77.7 (-5.9)	67.8 (-4.8)	0.84 (0.10)	0.86 (0.04)	0.81 (2.77)
14	P.21	452	53	57.9 (1.8)	65.4 (5.0)	56.1 (0.0)	67.9 (-1.3)	69.1 (0.0)	61.9 (-4.8)	0.76 (0.92)	0.81 (2.52)	0.75 (0.00)
15	P.1	6,350	62	56.1 (0.4)	66.3 (0.0)	53.6 (-9.1)	70.2 (-0.3)	72.1 (5.4)	62.3 (0.0)	0.75 (0.55)	0.82 (0.00)	0.73 (-2.84)
13	P.20	1,345	33	54.1 (16.1)	62.9 (9.4)	50.5 (11.5)	74.8 (-10.1)	76.7 (-6.0)	66.5 (-6.5)	0.78 (3.40)	0.83 (1.51)	0.76 (2.35)
16	P.24A	452	41	54.0 (7.7)	55.2 (15.2)	53.4 (0.2)	85.0 (-4.7)	85.8 (0.0)	84.3 (-9.3)	0.76 (1.81)	0.79 (1.98)	0.75 (0.00)
18	P.77	550	14	59.5 (0.0)	64.9 (0.0)	53.4 (0.0)	93.3 (0.0)	99.3 (0.0)	89.2 (0.0)	0.80 (0.00)	0.83 (0.00)	0.76 (0.00)
17	P.4A	1,930	36	58.7 (5.6)	68.3 (7.8)	52.3 (0.0)	95.9 (-4.4)	101.3 (0.0)	84.5 (-8.5)	0.78 (2.64)	0.84 (3.16)	0.75 (0.00)
20	P.42	318	17	50.0 (3.5)	56.1 (0.6)	46.5 (0.0)	88.2 (-1.8)	91.7 (-1.0)	84.7 (-2.2)	0.73 (1.62)	0.76 (2.23)	0.72 (0.00)
19	P.67	5,323	18	53.8 (6.7)	59.6 (8.5)	51.4 (4.0)	93.8 (-4.0)	95.9 (-2.1)	85.8 (-2.2)	0.75 (3.37)	0.82 (0.00)	0.74 (3.15)
21	P.5	1,569	23	54.9 (3.2)	60.6 (1.2)	53.4 (0.0)	99.3 (-2.0)	102.3 (0.0)	91.7 (-1.2)	0.76 (1.24)	0.80 (0.00)	0.74 (2.21)
22	P.76	1,545	13	49.2 (1.7)	61.4 (10.3)	42.8 (0.0)	105.9 (-1.0)	113.8 (0.0)	90.6 (-6.5)	0.72 (0.52)	0.81 (2.77)	0.66 (0.00)
ค่าเฉลี่ย				60.6	67.3	56.4	72.0	76.9	64.8	0.80	0.84	0.77
เปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้น/ลดลง				(4.0)	(6.3)	(-1.2)	(-3.2)	(0.3)	(-4.8)	(1.52)	(2.17)	(0.04)

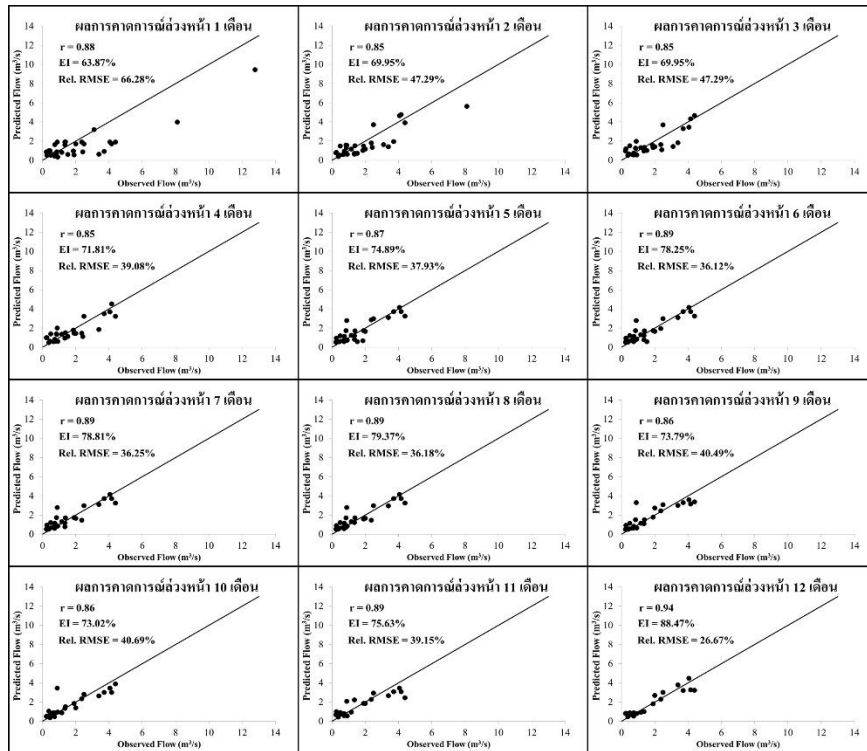
ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ชุดพารามิเตอร์และค่าตัวแปรทางสถิติสำหรับการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ารายเดือนล่วงหน้าตั้งแต่ 1 ถึง 12 เดือน ของสถานีวัดน้ำท่า P.80 แสดงดังในตารางที่ 4 รวมทั้งการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างผลการคาดการณ์และผลการตรวจวัด ในรูปแบบ Time Series Plot และ Scatter Plot แสดงดังในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ชุดพารามิเตอร์และค่าตัวแปรทางสถิติสำหรับการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ารายเดือนล่วงหน้าตั้งแต่ 1 ถึง 12 เดือน ของสถานีวัดน้ำท่า P.80

เวลาการคาดการณ์ล่วงหน้า (เดือน)	high flows						low to medium flows						Q (m ³ /s)	mix flows			การปรับปรุง		
	ค่าพารามิเตอร์			ค่าตัวแปรทางสถิติ			ค่าพารามิเตอร์			ค่าตัวแปรทางสถิติ				ค่าตัวแปรทางสถิติ (%)					
	m	τ	k	r	EI (%)	Rel. RMSE (%)	m	τ	k	r	EI (%)	Rel. RMSE (%)		r	EI (%)	Rel. RMSE (%)	r	EI (%)	Rel. RMSE (%)
1	8	4	1	0.91	62.55	67.49	10	10	2	0.88	63.87	66.28	6	0.88	63.87	66.28	0.00	0.00	0.00
2	7	4	1	0.89	67.03	49.53	9	7	5	0.85	69.95	47.29	6	0.85	69.95	47.29	0.00	0.00	0.00
3	7	4	1	0.81	56.03	47.65	8	7	13	0.82	66.38	41.66	7	0.85	69.95	47.29	3.54	5.39	13.50
4	7	4	1	0.80	55.14	49.29	8	7	11	0.84	69.04	40.95	3	0.85	71.81	39.08	1.62	4.00	-4.57
5	7	10	1	0.77	57.40	49.40	8	2	10	0.87	74.89	37.93	4	0.87	74.89	37.93	0.00	0.00	0.00
6	8	4	1	0.82	60.90	48.43	8	2	10	0.89	78.25	36.12	4	0.89	78.25	36.12	0.00	0.00	0.00
7	7	4	1	0.83	62.32	48.33	8	2	10	0.89	78.81	36.25	4	0.89	78.81	36.25	0.00	0.00	0.00
8	7	4	1	0.83	63.72	47.98	8	2	10	0.89	79.37	36.18	4	0.89	79.37	36.18	0.00	0.00	0.00
9	7	4	1	0.83	63.35	47.87	7	2	14	0.86	73.79	40.49	4	0.86	73.79	40.49	0.00	0.00	0.00
10	5	3	1	0.80	61.42	48.66	4	5	2	0.86	73.02	40.69	7	0.86	73.02	40.69	0.00	0.00	0.00
11	7	10	1	0.77	59.43	50.51	6	8	10	0.89	75.63	39.15	4	0.89	75.63	39.15	0.00	0.00	0.00
12	6	8	1	0.86	65.08	46.42	6	3	14	0.94	88.30	26.86	3	0.94	88.47	26.67	-0.23	0.19	-0.72
ค่าเฉลี่ย				0.83	61.20	50.13				0.87	74.28	40.82	5	0.88	74.82	41.12	0.41	0.80	0.68



รูปที่ 3 Time Series Plot ระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการคาดการณ์และที่ได้จากการตรวจวัดใน แต่ละเดือนของสถานีวัดน้ำท่า P.80



รูปที่ 4 Scatter Plot ระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการคาดการณ์และที่ได้จากการตรวจวัดใน แต่ละเดือนของสถานีวัดน้ำท่า P.80

4.3 ผลการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าแบบรายวันล่วงหน้า 1 ถึง 7 วัน

การประยุกต์ใช้วิธีการ PSR เพื่อการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ารายวันล่วงหน้า ดำเนินการในทำนองเดียวกับรายเดือน เพียงแต่ใช้ข้อมูลน้ำท่ารายวัน อย่างไรก็ตาม อนุกรมน้ำท่าแบบรายวันมีปริมาณมากกว่าอนุกรมน้ำท่าแบบรายเดือนมาก ดังนั้น ในกระบวนการหาค่าชุดพารามิเตอร์ที่ให้ผลการคาดการณ์ที่ถูกต้องมากที่สุด จึงไม่สามารถกำหนดค่าของพารามิเตอร์ m , τ และ k ให้พบบันทัดเหมือนกับที่กำหนดในกรณีการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ารายเดือนล่วงหน้า เนื่องจากข้อจำกัดในการประมวลผลของเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังนั้น ในการศึกษาจึงประยุกต์ใช้กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ในการเลือกค่าชุดพารามิเตอร์ที่ให้ผลการคาดการณ์ที่ถูกต้องมากที่สุดสำหรับการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ารายวันล่วงหน้า โดยใช้โปรแกรม MOSCEM (Vrugt et al., 2003) ซึ่งเป็นโปรแกรมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ดัชนีประสิทธิภาพ (Efficiency Index; EI) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ทั้งนี้ กำหนดให้พารามิเตอร์ m มีค่าระหว่าง 2-15 พารามิเตอร์ τ มีค่าระหว่าง 1-12 และพารามิเตอร์ k มีค่าระหว่าง 1-15 เช่นเดียวกับการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าล่วงหน้ารายเดือน แต่เป็นการสุ่มค่าชุดของพารามิเตอร์และเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้ ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

(1) ผลการประเมินตัวแปรทางสถิติของแต่ละช่วงเวลาคาดการณ์น้ำท่ารายวันล่วงหน้าของทุกสถานีวัดน้ำท่าและทุกเขื่อน

ผลการคาดการณ์น้ำท่ารายวันล่วงหน้าจาก 1 ถึง 7 วัน ของทั้งสถานีวัดน้ำท่า 19 สถานี และ 3 เขื่อน แสดงดังในตารางที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในภาพรวมแล้วทุกสถานีวัดน้ำท่าและทุกเขื่อน

จะให้ความถูกต้องที่ดีกว่าสำหรับการคาดการณ์ล่วงหน้าสำหรับช่วงเวลาสั้น ๆ และความถูกต้องจะลดลงเมื่อช่วงเวลาของการคาดการณ์ยาวนานขึ้น โดยค่าความถูกต้องของการคาดการณ์ล่วงหน้ามีค่าสูงสุดสำหรับการคาดการณ์ 1 วัน และความถูกต้องจะลดลงเมื่อช่วงเวลาของการคาดการณ์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าต่ำสุดสำหรับการคาดการณ์ล่วงหน้า 7 วัน

ตารางที่ 5 ค่าของตัวแปรทางสถิติในแต่ละช่วงเวลาของผลการคาดการณ์น้ำท่ารายวันของทุกสถานีวัดน้ำท่าและทุกเขื่อน

ลำดับ ที่	เวลาคาดการณ์ ล่วงหน้า (วัน)	EI (%)			Rel. RMSE (%)			r		
		ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
1	1	67.6	90.1	31.8	92.6	215.3	35.2	0.82	0.95	0.57
2	2	50.2	76.6	24.2	116.0	226.9	50.2	0.71	0.88	0.49
3	3	42.1	67.3	20.5	125.5	232.2	56.5	0.65	0.83	0.46
4	4	37.5	60.8	15.1	130.4	240.0	60.8	0.61	0.78	0.39
5	5	35.4	55.9	11.2	132.8	245.4	62.5	0.60	0.76	0.35
6	6	33.8	56.1	8.7	134.3	248.7	63.6	0.59	0.76	0.33
7	7	32.0	52.2	7.1	136.1	250.8	65.4	0.57	0.74	0.31
ค่าเฉลี่ย		42.7	65.6	16.9	124.0	237.0	56.3	0.65	0.81	0.41

(2) ผลการประเมินตัวแปรทางสถิติของการคาดการณ์น้ำท่ารายวันของทุกช่วงเวลาในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและแต่ละเขื่อน

ผลการประเมินตัวแปรทางสถิติของการคาดการณ์น้ำท่ารายวันของทุกช่วงเวลาในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและแต่ละเขื่อนแสดงดังในตารางที่ 6 โดยได้จัดลำดับผลการประเมินตัวแปรทางสถิติของแต่ละสถานีจากสถานีที่ได้ค่าตัวแปรทางสถิติที่ดีที่สุดจนถึงที่ด้อยที่สุด จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่าทางสถิติที่ดีที่สุดคือการคาดการณ์สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.75 ในขณะที่ค่าสถิติที่ด้อยที่สุดคือการคาดการณ์สำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.42 ทั้งนี้ ผลการคาดการณ์สำหรับทั้ง 19 สถานี และ 3 เขื่อน มีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก กล่าวคือ EI มีค่าระหว่าง 16.9%-65.6% และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 42.7% สำหรับ Rel. RMSE มีค่าระหว่าง 56.3%-237.0% และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 123.9% และค่า r มีค่าระหว่าง 0.41-0.81 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.65 ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการคาดการณ์น้ำท่ารายวันล่วงหน้า 1 ถึง 7 วัน สำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและแต่ละเขื่อนให้ผลอยู่ในเกณฑ์ที่แตกต่างกันไปในแต่ละสถานี และบางสถานีมีผลการคาดการณ์ที่ไม่ใกล้เคียงกับค่าจากการตรวจวัด

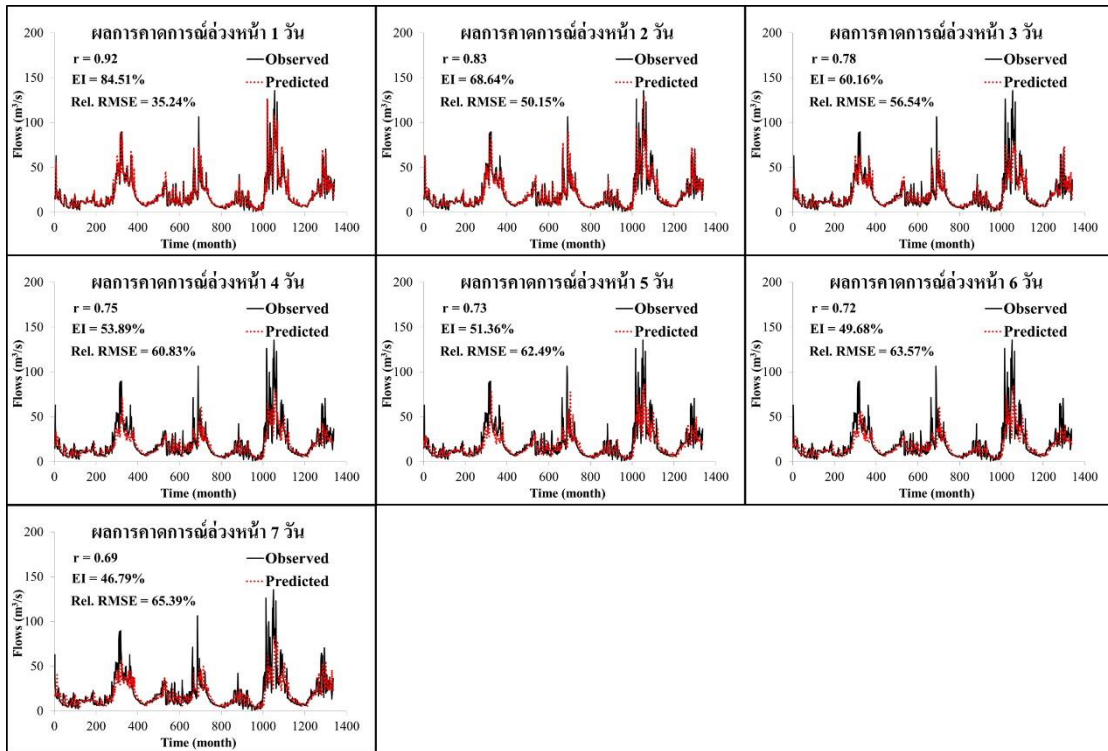
ตารางที่ 6 ค่าของตัวแปรทางสถิติของผลการคาดการณ์น้ำท่ารายวันของทุกช่วงเวลาในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและแต่ละเขื่อน

ลำดับ ที่	สถานีวัดน้ำท่า	พื้นที่รับน้ำฝน (ตร.กม.)	จำนวนสถิติข้อมูล (ปี)	EI (%)			Rel.RMSE (%)			r		
				ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด
1	P.75	3,080	13	59.3	84.5	46.8	56.3	65.4	35.2	0.77	0.92	0.69
2	P.1	6,350	20	60.9	87.3	48.5	83.8	98.0	48.6	0.79	0.94	0.70
3	P.73	14,814	16	65.6	90.1	52.2	93.3	112.6	51.3	0.81	0.95	0.73
4	P.67	5,323	18	60.7	85.1	49.8	97.9	112.4	61.1	0.79	0.92	0.74
5	เขื่อนภูมิพล	26,386	31	59.8	85.4	45.2	96.4	114.4	59.1	0.77	0.93	0.68
6	P.65	243	15	48.8	71.2	37.9	92.3	101.7	70.5	0.70	0.84	0.62
7	เขื่อนแม่วงดุมชารา	569	21	42.9	61.6	35.3	94.8	101.2	78.0	0.65	0.79	0.60
8	P.21	452	20	42.8	70.0	34.2	98.9	106.7	72.2	0.65	0.84	0.60
9	P.79	136	13	34.2	52.7	27.1	95.4	100.5	81.3	0.59	0.73	0.53
10	เขื่อนแม่งัดสมบูรณ์ชล	1,281	30	46.6	65.8	39.8	113.9	121.5	91.5	0.69	0.82	0.65
11	P.14	3,836	20	45.5	69.4	32.5	113.8	127.4	85.9	0.68	0.85	0.59
12	P.20	1,345	33	45.0	69.3	34.2	114.1	125.6	85.8	0.67	0.83	0.59
13	P.5	1,569	23	48.8	88.1	29.4	123.6	149.7	61.2	0.70	0.94	0.56
14	P.56A	546	13	35.6	64.7	27.5	113.9	121.6	84.7	0.60	0.81	0.53
15	P.4A	1,930	36	45.9	76.2	32.7	135.0	152.3	90.6	0.67	0.87	0.57
16	P.80	129	13	35.2	51.9	26.7	121.0	128.8	104.6	0.60	0.74	0.53
17	P.71	1,722	14	31.1	64.0	21.1	130.6	140.6	95.1	0.56	0.80	0.48
18	P.64	502	18	31.0	52.6	23.5	161.0	169.9	133.9	0.58	0.75	0.50
19	P.24A	452	20	30.1	56.8	20.2	162.7	174.6	128.6	0.54	0.76	0.45
20	P.77	550	14	22.7	42.6	14.1	181.4	191.3	156.8	0.50	0.67	0.43
21	P.76	1,545	13	30.4	66.6	18.1	208.7	228.2	145.8	0.55	0.82	0.45
22	P.42	318	17	16.9	31.8	7.1	237.0	250.8	215.3	0.41	0.57	0.31
ค่าเฉลี่ย				42.7	67.6	32.0	123.9	136.2	92.6	0.65	0.82	0.57

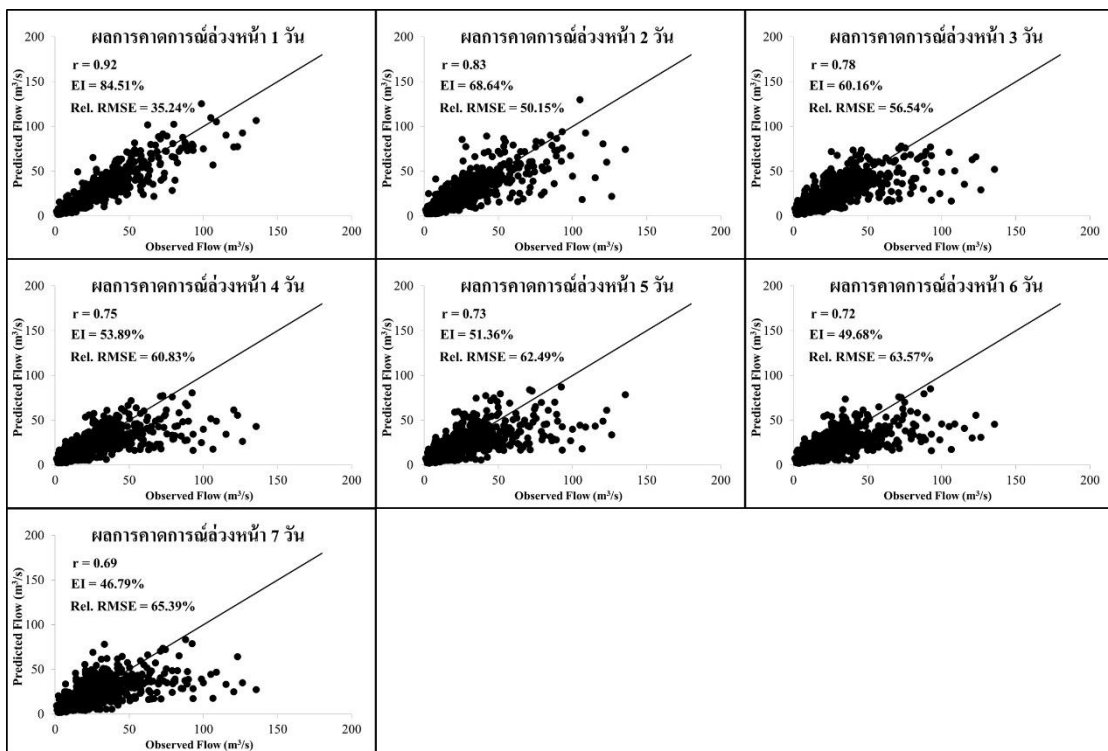
ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ชุดพารามิเตอร์และค่าตัวแปรทางสถิติสำหรับการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ารายวันล่วงหน้าตั้งแต่ 1 ถึง 7 วัน ของสถานีวัดน้ำท่า P.75 แสดงดังในตารางที่ 7 รวมทั้งการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างผลการคาดการณ์และผลการตรวจวัด ในรูปแบบ Time Series Plot และ Scatter Plot แสดงดังในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 7 ชุดพารามิเตอร์และค่าตัวแปรทางสถิติสำหรับการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ารายวันล่วงหน้าตั้งแต่ 1 ถึง 7 วัน ของสถานีวัดน้ำท่า P.75

เวลาคาดการณ์ล่วงหน้า (วัน)	ค่าพารามิเตอร์			ค่าตัวแปรทางสถิติ		
	m	T	k	r	EI (%)	Rel. RMSE (%)
1	3	3	10	0.92	84.51	35.24
2	3	7	15	0.83	68.64	50.15
3	5	2	15	0.78	60.16	56.54
4	8	2	15	0.75	53.89	60.83
5	8	2	9	0.73	51.36	62.49
6	8	2	15	0.72	49.68	63.57
7	5	2	15	0.69	46.79	65.39
ค่าเฉลี่ย				0.77	59.29	56.32



รูปที่ 5 Time Series Plot ระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการคาดการณ์และที่ได้จากการตรวจวัดในแต่ละวันของสถานีวัดน้ำท่า P.75



รูปที่ 6 Scatter Plot ระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการคาดการณ์และที่ได้จากการตรวจวัดในแต่ละวันของสถานีวัดน้ำท่า P.75

5. สรุปผลการศึกษา

5.1 การคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ารายเดือนล่วงหน้าตั้งแต่ 1 ถึง 12 เดือน

(1) ผลการประเมินตัวแปรทางสถิติในภาพรวมของแต่ละช่วงเวลาการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนล่วงหน้าของทุกสถานีวัดน้ำท่าและแต่ละเขื่อน พบว่า ช่วงเวลาการคาดการณ์ที่มีค่าทางสถิติที่ดีที่สุด คือ การคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนล่วงหน้า 12 เดือน เนื่องจากการคาดการณ์สำหรับเดือนที่พิจารณาซึ่งง่ายต่อการคาดการณ์มากที่สุด โดยค่าเฉลี่ยของตัวแปรทางสถิติซึ่งประกอบด้วย EI, Rel. RMSE และ r มีค่าเท่ากับ 62.4%, 69.4% และ 0.81 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสถิติที่ด้อยที่สุด คือ การคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนล่วงหน้า 6 เดือน เนื่องจากการคาดการณ์ของเดือนที่อยู่ระหว่างกลาง โดย EI, Rel. RMSE และ r มีค่าเท่ากับ 59.8%, 73.0% และ 0.80 ตามลำดับ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนล่วงหน้าตั้งแต่ 1 ถึง 12 เดือน สำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและแต่ละเขื่อนให้ผลอยู่ในเกณฑ์ดีแม้ว่าช่วงเวลาของการคาดการณ์จะเพิ่มขึ้น

(2) ผลการประเมินตัวแปรทางสถิติในภาพรวมของการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนของทุกช่วงเวลาในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและแต่ละเขื่อน พบว่า สถานีที่มีค่าทางสถิติที่ดีที่สุด คือ สถานีวัดน้ำท่า P.80 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของ EI, Rel. RMSE และ r เท่ากับ 74.3%, 40.8% และ 0.87 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสถิติที่ด้อยที่สุด คือ ที่สถานีวัดน้ำท่า P.76 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของ EI, Rel. RMSE และ r เท่ากับ 49.2%, 105.9% และ 0.72 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่าการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนล่วงหน้าตั้งแต่ 1 ถึง 12 เดือน สำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและแต่ละเขื่อนให้ผลอยู่ในเกณฑ์ที่แตกต่างกันไปในแต่ละสถานี ซึ่งอาจเนื่องมาจากสาเหตุสำคัญดังนี้คือ (2.1) ผลกระทบจากการนำน้ำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ (Regulated Flows) ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ซึ่งทำให้การไหลไม่เป็นไปตามธรรมชาติ (Natural Flows) จึงยากต่อการคาดการณ์การไหล (2.2) ช่วงปีสถิติข้อมูลที่ไม่ยาวนานเพียงพอ ทำให้ไม่มีข้อมูลมากพอที่จะใช้ในการสร้าง Multi-Dimensional Phase Space จึงทำให้การคาดการณ์ที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงกระทำได้ยากเมื่อขาดข้อมูลน้ำท่าต้นแบบ (2.3) สถานีวัดน้ำท่าหรือเขื่อนที่มีขนาดใหญ่อาจยากต่อการคาดการณ์มากกว่าขนาดเล็ก เนื่องจากสถานีวัดน้ำท่าหรือเขื่อนขนาดใหญ่อาจมีความซับซ้อนของกระบวนการเกิดน้ำท่ามากกว่าขนาดเล็ก เพราะเมื่อพื้นที่ขนาดใหญ่ย่อมมีความหลากหลายของลักษณะเฉพาะของกลุ่มน้ำและปริมาณฝนที่ตกลงบนพื้นที่ลุ่มน้ำอาจแตกต่างกันไปในพื้นที่ขนาดใหญ่จึงทำให้น้ำท่าที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนทำให้ยากต่อการคาดการณ์

(3) การเพิ่มความถูกต้องของผลการคาดการณ์น้ำท่ารายเดือนล่วงหน้าด้วยการผสมผลการคาดการณ์น้ำท่า จากพารามิเตอร์ 2 ชุด สรุปได้ว่ากระบวนการ Mix Flows ที่ได้นำมาใช้ในการปรับปรุงตัวแปรทางสถิติพบว่า มีประโยชน์อย่างมากต่อการเพิ่มความถูกต้องให้กับผลการคาดการณ์ในทุกช่วงเวลาของการคาดการณ์และแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและเขื่อน กล่าวคือ มีการปรับปรุงตัวแปรทางสถิติดังนี้ EI มีค่าเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 4.0%, Rel. RMSE มีค่าเฉลี่ยที่ลดลงเท่ากับ 3.2% และ r มีค่าเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 1.52%

5.2 การคาดการณ์ปริมาณน้ำท่ารายวันล่วงหน้าตั้งแต่ 1 ถึง 7 วัน

(1) ผลการประเมินตัวแปรทางสถิติในภาพรวมของแต่ละช่วงเวลาการคาดการณ์น้ำท่ารายวันล่วงหน้าของทุกสถานีวัดน้ำท่าและเขื่อน พบว่า ทุกสถานีวัดน้ำท่าและทุกเขื่อนจะให้ความ

ถูกต้องที่ต่ำกว่าสำหรับการคาดการณ์ล่วงหน้าสำหรับช่วงเวลาสั้น ๆ และความถูกต้องจะลดลงเมื่อช่วงเวลาของการคาดการณ์ยาวนานขึ้น โดยค่าความถูกต้องของการคาดการณ์ล่วงหน้ามีค่าสูงสุดสำหรับการคาดการณ์ 1 วัน (ค่าเฉลี่ยของ EI, Rel. RMSE และ r เท่ากับ 67.6%, 92.6% และ 0.82 ตามลำดับ) และความถูกต้องจะลดลงเมื่อช่วงเวลาของการคาดการณ์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าต่ำสุดสำหรับการคาดการณ์ล่วงหน้า 7 วัน (ค่าเฉลี่ยของ EI, Rel. RMSE และ r เท่ากับ 32.0%, 136.1% และ 0.57 ตามลำดับ) ทั้งนี้ผลที่ได้มีความสมเหตุสมผลเนื่องจากการคาดการณ์น้ำท่ารายวันในช่วงเวลาสั้น ๆ ย่อมมีความถูกต้องมากกว่า และเมื่อช่วงเวลาของการคาดการณ์เพิ่มขึ้น ความถูกต้องย่อมลดน้อยลงไป เนื่องจากปริมาณน้ำท่าในช่วงเวลาใกล้ ๆ กัน ย่อมมีความสัมพันธ์กันมากกว่าเมื่อช่วงเวลาเพิ่มมากขึ้น กล่าวคือ เมื่อช่วงเวลาเพิ่มมากขึ้น ตัวแปรสำคัญที่ทำให้ปริมาณน้ำท่าเปลี่ยนแปลงไปคือ ความลึกฝนซึ่งยากต่อการคาดคะเนในลักษณะรายวัน

(2) ผลการประเมินตัวแปรทางสถิติในภาพรวมของทุกช่วงเวลาตั้งแต่ 1 ถึง 7 วัน ในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและเขื่อน พบว่า สถานีที่มีค่าทางสถิติที่ดีที่สุด คือ สถานีวัดน้ำท่า P.75 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของ EI, Rel. RMSE และ r เท่ากับ 59.3%, 56.3% และ 0.77 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสถิติที่ต่ำที่สุด คือ ที่สถานีวัดน้ำท่า P.42 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของ EI, Rel. RMSE และ r เท่ากับ 16.9%, 237.0% และ 0.41 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่าการคาดการณ์น้ำท่ารายวันล่วงหน้า 1 ถึง 7 วัน สำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่าและเขื่อนให้ผลอยู่ในเกณฑ์ที่แตกต่างกันไปในแต่ละสถานี และบางสถานีมีผลการคาดการณ์ที่ไม่ใกล้เคียงกับค่าจากการตรวจวัด อย่างไรก็ตาม จากการพิจารณาผลการคาดการณ์น้ำท่ารายวันของทุกสถานีพบว่า ผลการคาดการณ์มีความถูกต้องสูงสุด 4 ลำดับแรก คือ ที่สถานีวัดน้ำท่า P.75, P.1, P.73 และ P.67 โดยสถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้ตั้งอยู่ในแม่น้ำปิงสายหลักทั้งสิ้น ดังนั้น ปริมาณน้ำท่าอาจมีความแน่นอนมากกว่าปริมาณน้ำท่าในลำน้ำสายย่อย กล่าวคือ ปริมาณน้ำท่าในลำน้ำสายย่อยจะขึ้นกับความลึกฝนของลำน้ำสายย่อยเท่านั้น ในขณะที่ในลำน้ำสายหลักนั้น ปริมาณน้ำท่าขึ้นกับหลายลำน้ำสาขา ดังนั้น ปริมาณน้ำท่าอาจมีความมั่นคงแน่นอนมากกว่า จึงเป็นผลให้การคาดการณ์น้ำท่ารายวันมีความถูกต้องที่สูงกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของเขื่อนก็พบว่า ผลการคาดการณ์สำหรับเขื่อนภูมิพลซึ่งตั้งอยู่ในแม่น้ำปิงสายหลักและมีพื้นที่รับน้ำมากกว่าเขื่อนแม่กวงอุดมธาราและเขื่อนแม่จัดสมบูรณ์ชลก็ให้ผลการคาดการณ์น้ำท่ารายวันที่มีความถูกต้องมากกว่าเช่นกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่สนับสนุนทุนวิจัยเพื่อการศึกษา และขอขอบคุณกรมชลประทานและการไฟฟ้าฝ่ายผลิตที่อนุเคราะห์ข้อมูลประกอบการศึกษา

7. เอกสารอ้างอิง

นุชนารถ และคณะ. (2555). “การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศต่อปริมาณน้ำฝนและน้ำท่าในลุ่มน้ำปิงตอนบนเพื่อการบริหารจัดการน้ำของเขื่อนภูมิพล” สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพมหานคร

- นุชนารถ และคณะ. (2558). “การคาดการณ์ปริมาณน้ำไหลเข้าเขื่อนภูมิพลเพื่อการบริหารจัดการอุทกภัยและภัยแล้ง, รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 1” สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพมหานคร
- Abarbanel, H.D.I., Brown, R., and Kadtke, J.B. (1990). “Prediction in chaotic nonlinear systems: Methods for time series with broadband Fourier spectra.” *Phys. Rev. A*, 41(4), 1782-1807.
- Casdagli, M. (1989). “Nonlinear prediction of chaotic time series.” *Physica D36*, 335-356.
- Casdagli, M. (1991). “Chaos and deterministic versus stochastic nonlinear modeling.” *J. Royal Stat. Soc. B*, 54(2), 303-328.
- Farmer, J.D. and Sidorowich, J.J. (1987). “Predicting chaotic time series.” *Phys. Rev. Lett.* 59, 845-848.
- Fraedrich, K. (1986). “Estimating the dimensions of weather and climate attractors.” *J. Atmos. Sci.*, 43(5), 119-132.
- Frison, T. (1994). “Nonlinear data analysis techniques, in *Trading on the Edge: Neural, Genetic, and Fuzzy Systems for Chaotic Financial Markets.*” edited by G. J. Deboeck, 280-296, Wiley, New York.
- Holzfluss, J.W. and Mayer-Kress, G. (1986). “An approach to error estimation in the application of dimension algorithms.” *Dimension and entropies in chaotic systems*, G. Mayer-Kress, ed., Springer, New York, 114-117.
- Muller-Jerking, J., Martinerie, J., Neuenschwander, S., Pezard, L., Ranault, B. and Varela, F.J. (1996). “Detecting non-linearities in neuro-electrical signals: A study of synchronous local field potentials.” *Physica D*, 94, 65-91.
- Packard, N.H., Crutchfield, J.P., Farmer, J.D., and Shaw, R.S., (1980). “Geometry from a time series.” *Phys. Rev. Lett.* 45 (9), 712-716.
- Regonda, S., Sivakumar, B. and Jain, A. (2004). “Temporal scaling in river flow: Can it be chaotic?” *Hydrol. Sci. J.*, 49(3), 373-385, 2004.
- Sangoyomi, T.B., Lall, U. and Abarbanel, H.D.I. (1996). “Nonlinear dynamics of the Great Salt Lake: Dimension estimation.” *Water Resource. Res.*, 32(1), 149-159.
- Schuster, H.G. (1984). “*Deterministic chaos.*” VCH, Weinheim, Germany.
- Sivakumar, B., Liong, S.Y., Liaw, C.Y. and Phoon, K.K. (1999a). “Singapore rainfall behavior: chaotic?” *J. Hydrol. Eng ASCE* 4(1), 38-48.
- Sivakumar, B., Phoon, K.K., Liong, S.Y. and Liaw, C.Y. (1999b). “A systematic approach to noise reduction in observed chaotic time series.” *J. Hydrol.* 219(3/4), 103-135.
- Sivakumar, B. (2001). “Monthly runoff prediction using phase space reconstruction” *Hydrol. Sci. J.* 46(3), 377-387.

- Sivakumar, B., Jayawardena, A.W. and Fernando, T.M.K.G. (2002). "River flow forecasting: use of phase-space reconstruction and artificial neural networks approaches." *J. Hydrol.* 265, 225–245.
- Sivakumar, B. (2005). "A multi-variable time series phase-space reconstruction approach to investigation of chaos in hydrological processes." *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. VOL.1, NO.1, 35-51.
- Sivakumar, B. and Singh, V.P. (2012) "Hydrologic system complexity and nonlinear dynamic concepts for a catchment classification framework" *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8. C6585–C6589.
- Sugihara, G. and May, R. M. (1990). "Nonlinear forecasting as a way of distinguishing chaos from measurement error in time series." *Nature* 344, 734-741.
- Takens, F. (1981). "Detecting strange attractors in turbulence." *Dynamical systems and turbulence*, D. A. Rand and L. S. Young, eds., Springer, Warwick, 366–381.
- Theiler, J. (1987). "Efficient algorithm for estimating the correlation dimension from a set of discrete points." *Phys. Rev. A*, 36(9), 4456–4462.