

การสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM แบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม SENSWAT-GA Auto-Calibrating SENSWAT- Modified NAM using SENSWAT-GA

ณัฐวุฒิ ใจดี^{1,*} และ นุชนารถ ศรีวงศ์ตานนท์²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

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

บทคัดย่อ

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า จำเป็นต้องทำการสอบเทียบแบบจำลอง โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเพื่อทำให้เกิดการเข้ากันได้ระหว่างน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลองกับที่ได้จากการตรวจวัด การใช้การสอบเทียบแบบอัตโนมัติโดยใช้กระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้รับความสนใจเพื่อให้สามารถสอบเทียบแบบจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการศึกษานี้ได้นำ Genetic Algorithm (GA) ซึ่งเป็นกระบวนการแบบสุ่มที่เลียนแบบกลไกทางพันธุกรรมมาพัฒนาเป็นโปรแกรมภายใต้ศูนย์วิจัย SENSWAT ด้วยภาษา MATLAB โดยได้นำกระบวนการเข้ากันได้แบบสัดส่วน (Proportional Fitness) และกระบวนการคัดเลือกที่อยู่บนพื้นฐานของลำดับที่ได้จาก Roulette Wheel (Rank Based Roulette Wheel Selection) มาใช้เพื่อการหาฟังก์ชันการเข้ากันได้ที่เหมาะสมที่สุด (Fitness Function) ทั้งนี้ประสิทธิภาพของโปรแกรม SENSWAT-GA ที่ได้พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ได้รับการทดสอบโดยการเชื่อมต่อกับแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM ที่ถูกเขียนขึ้นด้วยภาษา MATLAB เช่นกัน จากนั้นทำการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า 6 สถานี ซึ่งตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปิงตอนบน ผลการศึกษาพบว่า NSE ที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลองกับที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานี P.4A, P.20, P.75, P.67, P.21 และ P.1 มีค่าเท่ากับ 0.79, 0.71, 0.77, 0.81, 0.75 และ 0.86 ตามลำดับ จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM และโปรแกรม SENSWAT-GA สามารถยอมรับได้ในประสิทธิภาพของการประเมินน้ำท่าและการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด ตามลำดับ

คำสำคัญ: กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด, Genetic Algorithm, โปรแกรม SENSWAT-GA, แบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM

Abstract

Rainfall-runoff models require model calibration by adjusting model parameters with the aim of matching the modeled runoff to the observed data. Auto-calibration using optimization procedure

has been obtained much attention for effectively calibrating the models. In this study, SENSWAT-GA – a random base algorithm by simulating a genetic mechanism – was developed under SENSWAT Research Centre using MATLAB language. The proportional fitness and rank based roulette wheel selection was used to optimize the multi-fitness functions. The performance of developed SENSWAT-GA program was tested by connecting the GA program with the SENSWAT-Modified NAM model - which was written using MATLAB language - and then calibrated at 6 gauging stations located in the Upper Ping River Basin. There are 10 model parameters and 5 initial condition values for the SENSWAT-Modified NAM which need to be calibrated. Multi-objective functions for optimizing the total flow, low flows, and flow duration curve were set to select model parameter values. The results of NSE values obtained from the comparison between runoff estimates and observed data at P.4A, P.20, P.75, P.67, P.21 and P.1 gauging stations are shown to be 0.79, 0.71, 0.77, 0.81, 0.75 and 0.86, respectively. It can be concluded that the developed SENSWAT-GA and SENSWAT-Modified NAM are accepted for their effectiveness in runoff estimation and optimizing the most suitable model parameter values, respectively.

Keywords: Optimization, Genetic Algorithm, SENSWAT-GA, SENSWAT-Modified NAM Model

1. คำนำและที่มาของงานวิจัย

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ได้ถูกนำมาใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งที่มีและไม่มีสถานีวัดน้ำท่าตั้งอยู่ (Gauged and Ungauged Catchments) เพื่อนำปริมาณน้ำท่าที่ประเมินได้ไปบริหารจัดการให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อทุกภาคส่วนของการใช้น้ำ รวมทั้งเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากสภาวะน้ำท่วมหรือสภาวะความแห้งแล้ง ดังนั้นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า จึงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึง

ปัจจุบัน อาทิเช่น แบบจำลอง SCS [1], NAM [2], FLEXL [3], FLEX-Topo [4] และ TANK [5] เป็นต้น โดยแต่ละแบบจำลองจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน รวมทั้งมีความแตกต่างของโครงสร้างของแบบจำลอง ความต้องการข้อมูลด้านเข้า และความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่า อย่างไรก็ตาม ทุกแบบจำลองจำเป็นต้องผ่านกระบวนการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Model Calibration and Validation) ซึ่งโดยทั่วไปจะดำเนินการโดยใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error) ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง (Model Parameters) เพื่อให้เกิดการเข้ากันได้มากที่สุดระหว่างกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประเมินโดยแบบจำลองและกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด อย่างไรก็ตาม การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองโดยวิธีลองผิดลองถูกมีแนวโน้มที่จะไม่ได้อัตโนมัติของพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดรวมทั้งต้องใช้เวลาในการดำเนินงานมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีการนำกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) มาประยุกต์ใช้เพื่อการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง ทั้งนี้ วิธีการในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่เป็นที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่งคือ Genetic Algorithm (GA) ซึ่งเป็นกระบวนการทางพันธุกรรมเพื่อการสร้างกลุ่มประชากรใหม่ที่มีแนวโน้มไปสู่การหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ผลการประยุกต์ใช้ Genetic Algorithm เพื่อการสอบเทียบแบบจำลองน้ำฝนน้ำท่า อาทิเช่น การสอบเทียบแบบจำลอง SAC-SMA โดยการประยุกต์ใช้ Genetic Algorithm มาช่วยในการหาพารามิเตอร์ควบคุมแบบจำลอง ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า GA สามารถช่วยลดระยะเวลาในการสอบเทียบแบบจำลอง และให้ค่าพารามิเตอร์ควบคุมแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพ [6]

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ที่ได้รับความนิยมในการนำมาประยุกต์ใช้มากที่สุดแบบจำลองหนึ่งคือ แบบจำลอง NAM ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นโดย The Hydrological Section of the Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering at the Technical University of Denmark และต่อมา Danish Hydraulic Institute (DHI) ได้รวมแบบจำลอง NAM ไว้ในซอฟต์แวร์ MIKE 11 (นูชนารด 2560) อย่างไรก็ตาม กระบวนการบางส่วนแบบจำลอง NAM สามารถนำออกโดยไม่สร้างผลกระทบต่อความถูกต้องในการประเมินน้ำท่ารวมทั้งเพื่อให้เหมาะสมกับการประเมินน้ำท่าสำหรับพื้นที่ของประเทศไทย ดังนั้น นูชนารด (2560) จึงได้ทำการปรับปรุงแบบจำลอง NAM และให้ชื่อว่าแบบจำลอง Modified NAM เพื่อให้สามารถใช้งานได้ง่ายขึ้นและยังคงมีประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าที่ถูกต้องใกล้เคียงกับน้ำท่าที่ได้จากสถานีตรวจวัด [7]

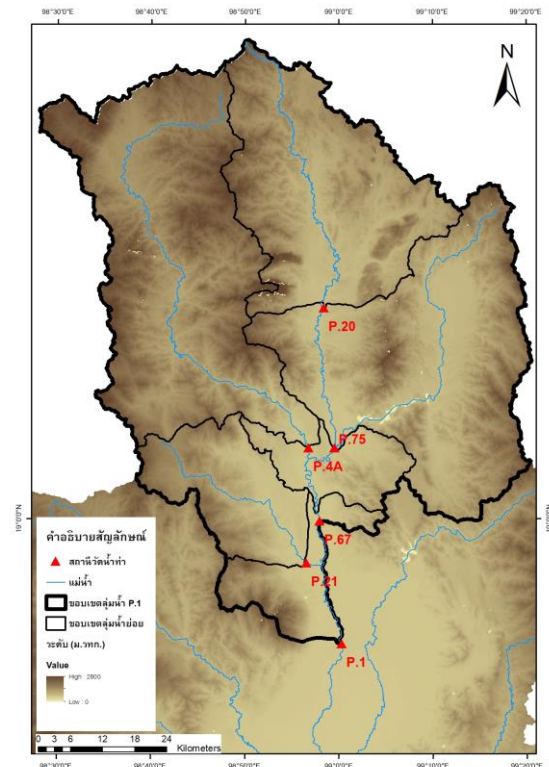
ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการสร้างโปรแกรม Genetic Algorithm ที่เชื่อมต่อกับแบบจำลอง Modified-NAM ด้วยภาษา MATLAB โดยดำเนินการภายใต้ศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management, SENSWAT) ดังนั้น จึงใช้ชื่อ SENSWAT-GA และ SENSWAT-Modified NAM ตามลำดับ จากนั้นทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมและแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งตั้งอยู่ในลุ่มน้ำปิงตอนบน รวมทั้งสถานีวัดน้ำท่าที่อยู่ในลุ่มน้ำสาขาของพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 จำนวน 5 สถานี ซึ่งประกอบด้วยสถานีวัด

น้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 เพื่อตรวจสอบความมีประสิทธิภาพของโปรแกรมและแบบจำลองที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ก่อนที่จะนำไปใช้ประกอบการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของประเทศต่อไป

2. พื้นที่ศึกษา และข้อมูลที่ใช้

2.1 พื้นที่ศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ได้พิจารณาใช้ลุ่มน้ำแม่ปิงตอนบนเป็นพื้นที่ศึกษาลุ่มน้ำปิงตอนบนมีพื้นที่รับน้ำประมาณ 25,000 ตารางกิโลเมตร และมีแม่น้ำปิงเป็นแม่น้ำสายหลัก ซึ่งมีต้นกำเนิดบริเวณทิวเขาผีปันน้ำในเขตอำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ ลักษณะภูมิประเทศของลุ่มน้ำส่วนใหญ่เป็นภูเขาสูงปกคลุมด้วยป่าไม้ สำหรับการศึกษานี้ได้พิจารณาใช้พื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 6,140 ตารางกิโลเมตร และเป็นส่วนหนึ่งของพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนเป็นพื้นที่ศึกษา รวมทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ซึ่งประกอบด้วย สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 สำหรับขอบเขตของพื้นที่ศึกษาแสดงดังในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขอบเขตของพื้นที่ศึกษาในลุ่มน้ำปิงตอนบน

2.2 ข้อมูลที่ใช้

2.2.1 ข้อมูลฝน

ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำข้อมูลฝนจากผลิตภัณฑ์ SENSWAT-GGR ซึ่งเป็นข้อมูลฝนแบบกริดที่ครอบคลุมทั้งประเทศไทย ในระหว่าง ปี พ.ศ. 2543-2560 โดยเป็นผลิตภัณฑ์ฝนที่ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้ศูนย์วิจัย Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management (SENSWAT) ทั้งนี้ ผลิตภัณฑ์ SENSWAT-GGR ถูกสร้างมาจากข้อมูลฝนรายวันที่ถูกเก็บรวบรวมข้อมูลโดยกรม

อุตุนิยมวิทยา กรมชลประทาน และหน่วยงานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ ข้อมูลฝนที่เก็บรวบรวมได้จาก 1,897 สถานี ถูกนำมาตรวจสอบความถูกต้องแบบรายเดือนด้วยวิธีการโค้งทับทวี (Double Mass Curve)

ข้อมูลฝนที่ผ่านการตรวจสอบมาข้อมูลฝนแบบกริด (Gridded Gauged Rainfall, GGR) ทั้งแบบรายเดือนและรายวันด้วยวิธีส่วนกลับของระยะทางยกกำลังสอง (Inverse Distance Square, IDS) สำหรับการศึกษานี้ ได้วิเคราะห์ข้อมูลฝนรายวันแบบกริดจากผลิตภัณฑ์ SENSWAT-GGR ที่ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของ 6 สถานี ซึ่งประกอบด้วย สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67, P.21 และ P.1 มาใช้เป็นข้อมูลด้านเข้าให้กับแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM

2.2.2 ข้อมูลน้ำท่า

ในการศึกษานี้ได้นำข้อมูลน้ำท่ารายวันที่ทำการตรวจวัดโดยกรมชลประทาน จำนวน 6 สถานี ซึ่งประกอบด้วยสถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67, P.21 และ P.1 มาใช้เพื่อการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM แบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม SENSWAT-GA ในระหว่างปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2556 โดยรายละเอียดของข้อมูลสถานีวัดน้ำท่าดังกล่าวแสดงดังในตารางที่ 1 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยของสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 6 สถานี มีค่าอยู่ระหว่าง 142.2 ถึง 1,571.3 ล้านลูกบาศก์เมตร ซึ่งตรวจวัดได้ที่สถานีวัดน้ำท่า P.21 และ P.1 ตามลำดับ และปริมาณการให้น้ำจำเพาะ (Specific yield) ของสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 6 สถานี มีค่าอยู่ระหว่าง 6.50 ถึง 12.03 ลิตรต่อวินาทีต่อตารางกิโลเมตร ซึ่งตรวจวัดได้ที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A และ P.20 ตามลำดับ

2.2.3 ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิง

ในการศึกษานี้ได้มีการใช้ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงรายวันที่ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ในช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ.2546 ถึง พ.ศ.2556 โดยข้อมูลดังกล่าวเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลการคายระเหยทั่วประเทศแบบกริด ที่ได้รับการพัฒนาภายใต้ศูนย์วิจัย SENSWAT ทั้งนี้ ข้อมูลการคายระเหยแบบกริดสร้างจากข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาทั้งหมด 103 สถานี ทั่วประเทศ เช่น อุณหภูมิ ชั่วโมงแสงแดด ความเร็วลม ความชื้นในอากาศ เป็นต้น มาใช้ประกอบการคำนวณการคายระเหยของพืชอ้างอิงด้วยวิธี Penman-Monteith จากนั้นจึงนำค่าการคายระเหยที่ได้ไปสร้างข้อมูลการคายระเหยทั่วประเทศแบบกริดด้วยการเฉลี่ยด้วยวิธีส่วนกลับของระยะทางยกกำลังสอง (Inverse Distance Square, IDS)

เพื่อพิจารณาตัดข้อมูลฝนที่มีความผิดพลาดประมาณ 4% ออกจากอนุกรมเวลา รวมทั้งทำการตัดข้อมูลทั้งหมดของ 5 สถานี จากนั้นจึงนำ

3. ทฤษฎี

3.1 Genetic Algorithm

3.1.1 หลักการของ Genetic Algorithm

Genetic Algorithm (GA) เป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ที่มีพื้นฐานมาจากการคัดเลือกทางธรรมชาติและวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ หรือที่เรียกว่าหลักทางพันธุกรรม โดยในปี 1960 John Holland ได้ริเริ่มสร้าง GA ขึ้นมาตามแนวคิดจากทฤษฎีวิวัฒนาการของ Darwin (Darwin's Theory of Evolution) ต่อมาในปี 1989 David E. Goldberg ซึ่งเป็นนักศึกษาในความดูแลของ John Holland ได้ขยายผล GA ให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย GA มีจุดเด่นที่แตกต่างจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดวิธีอื่นๆ ทั้งนี้ David E. Goldberg ได้สรุปหลักการของ GA ไว้ดังต่อไปนี้

- 1) GA ดำเนินงานบนพื้นฐานของรหัสของชุดพารามิเตอร์ (Coding of the Parameter Set) ไม่ใช่ค่าของพารามิเตอร์จริงๆ
- 2) GA เป็นกระบวนการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจากประชากรของจุด (A Population of Points) ไม่ใช่การหาจุดเพียงจุดเดียว (Single Point)
- 3) GA ใช้ข้อมูลที่กำหนดไว้ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function Information) เพื่อการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ไม่ใช่การใช้สมการอนุพันธ์หรือความรู้ด้านอื่นๆ มาช่วย
- 4) GA ใช้กฎของการเปลี่ยนความน่าจะเป็น (Probabilistic Transition Rules) ไม่ใช่กฎของกระบวนการที่เทอร์มินิสติก (Deterministic Rules)

ตารางที่ 1 รายละเอียดของข้อมูลน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา

รหัสสถานีวัดน้ำท่า	ชื่อสถานี	พื้นที่รับน้ำ (ตร.กม.)	ปริมาณน้ำท่ารายปี (ล้าน ลบ.ม.)			ปริมาณการให้น้ำจำเพาะ (ลิตร/วินาที/ตร.กม.)
			เฉลี่ย	ต่ำสุด	สูงสุด	
P.1	สะพานนารัฐ	6,140	1,571.3	817.2	3,034.8	8.11
P.21	บ้านริมใต้	542	142.2	80.1	269.4	8.32
P.67	บ้านแม่แต	5,269	1,376.5	640.1	2,642.6	8.28
P.4A	บ้านแม่แตง	1,960	402.4	178.7	889.3	6.50
P.75	บ้านซ้อแล	3,004	781.4	441.2	1,454.2	8.24
P.20	บ้านเชียงดาว	1,300	493.6	243.7	880.2	12.03

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานของ Genetic Algorithm

ขั้นตอนการดำเนินงานของ GA แบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อยๆ จำนวน 7 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยในแต่ละขั้นตอนในแผนผังสรุปได้ดังนี้

1) สุ่มประชากรชุดเริ่มต้น

ทำการสุ่มประชากรชุดเริ่มต้น (Initial Population) ในรูปแบบของเลขฐานสอง (Binary Bit Code) โดยประชากรแต่ละตัวที่เรียกว่า 1 สตริง (String) จะมีความยาวของสตริง (String length) ที่ครอบคลุมพารามิเตอร์ที่ต้องการหาค่า อาทิเช่น ในกรณีของการประยุกต์ใช้ GA เพื่อการสอบแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM ความยาวของสตริงจะครอบคลุมค่าของพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองและสภาพแวดล้อม

2) คัดเลือก Dominate Strings และ Elite Child Strings

กระบวนการนี้เป็นการนำประชากรชุดเริ่มต้นหรือชุดถัด ๆ ไป ซึ่งอยู่ในรูปแบบของเลขฐานสองมาแปลงเป็นเลขฐานสิบ (Decimal Value) เพื่อไปแทนค่าในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness Function) และนำค่าที่ได้จากประชากรแต่ละตัวมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาประชากรที่ให้ค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในลำดับต้น ๆ จำนวนหนึ่งเพื่อเลือกเป็น Elite Child Strings จากนั้น นำค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากประชากรชุดแรกทั้งหมดมาผ่านกระบวนการ Roulette Wheel เพื่อการตัดประชากรที่ด้อยออกไปและนำประชากรดีเด่นในระดับต้น ๆ มาทดแทนประชากรด้อยที่ถูกตัดออกไปเพื่อใช้เป็น Dominate Strings ที่มีจำนวนประชากรเท่าเดิมสำหรับนำไปสร้างเป็นประชากรชุดใหม่

3) ดำเนินการ Crossover

นำ Dominate Strings ที่ได้จากขั้นตอนก่อนหน้ามาจับคู่โดยกระบวนการแบบสุ่มเพื่อนำไปผ่านกระบวนการ Crossover ซึ่งหมายถึงการสลัดกันของ Binary Bit ระหว่างคู่ของ Dominate Strings ตำแหน่งที่ถูกคัดเลือกโดยกระบวนการแบบสุ่ม ทั้งนี้ จำนวนตำแหน่งระหว่างคู่ของ Dominate Strings ที่จะผ่านกระบวนการ Crossover จะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นที่กำหนดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ประชากรของการสอบแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM มีทั้งสิ้น 100 Strings จะทำการจับคู่ได้ 50 คู่ เมื่อความน่าจะเป็นของกระบวนการ Crossover เท่ากับ 0.70 จะเป็นผลให้จำนวนตำแหน่งระหว่างคู่ของ Dominate Strings ที่จะผ่านกระบวนการ Crossover มีทั้งสิ้น 70 จุด ซึ่งแต่ละจุดจะถูกเลือกโดยกระบวนการแบบสุ่ม ทั้งนี้ คู่ของ Dominate Strings บางคู่อาจไม่มีจุดใดเลยที่จะไม่ผ่านกระบวนการ Crossover หรือบางคู่อาจผ่านกระบวนการ Crossover มากกว่า 1 จุด

4) ดำเนินการ Mutation

นำประชากรของ Dominate Strings ที่ผ่านกระบวนการ Crossover ในขั้นตอนที่ (3) มาผ่านกระบวนการ Mutation ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนค่า Binary Bit จาก 0 เป็น 1 หรือจาก 1 เป็น 0 ณ ตำแหน่งที่ถูกคัดเลือกโดยกระบวนการแบบสุ่ม ทั้งนี้ จำนวนตำแหน่งของจุดใน Dominate Strings ที่จะผ่านกระบวนการ Mutation จะขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็นที่กำหนดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ประชากรของการสอบแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM มีทั้งสิ้น 100 Strings

เมื่อความน่าจะเป็นของกระบวนการ Mutation เท่ากับ 0.02 จะเป็นผลให้จำนวนตำแหน่งตำแหน่งของจุดใน Dominate Strings ที่จะผ่านกระบวนการ Mutation มีทั้งสิ้น 2 จุด ซึ่งแต่ละจุดจะถูกเลือกโดยกระบวนการแบบสุ่ม

5) สร้างประชากรรุ่นถัดไป

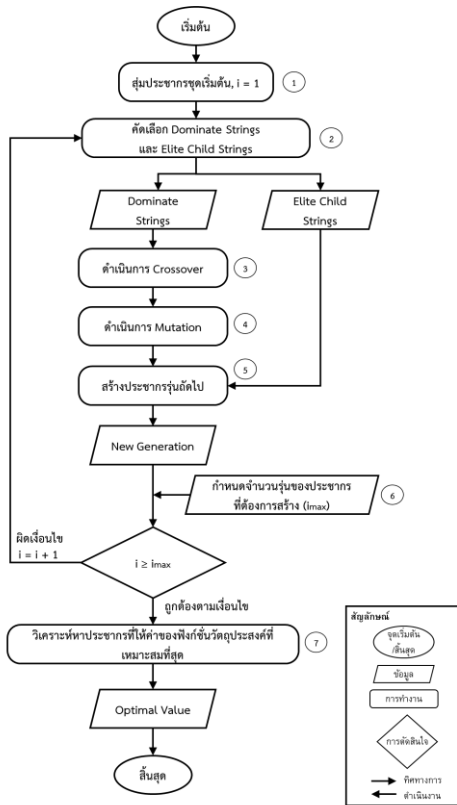
นำประชากรของ Dominate Strings ที่ผ่านกระบวนการ Mutation ในขั้นตอนที่ (4) ซึ่งอยู่ในรูปแบบของเลขฐานสองมาแปลงเป็นเลขฐานสิบ (Decimal Value) เพื่อไปแทนค่าในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness Function) และนำค่าที่ได้จากประชากรแต่ละตัวมาเปรียบเทียบกันเพื่อการเรียงลำดับจากมากไปน้อยในกรณีที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการหาค่าสูงสุด หรือเรียงลำดับจากน้อยไปมากในกรณีที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการหาค่าต่ำสุด จากนั้นเลือกประชากรที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในลำดับกลาง ๆ ออก ด้วยจำนวนเท่ากับ Elite Child Strings ที่จะนำมาแทนที่เพื่อเป็นประชากรในรุ่นถัดไป (New Generation)

6) กำหนดจำนวนรุ่นของประชากรที่ต้องการสร้าง

กระบวนการตามขั้นตอน (2) ถึง (5) จะดำเนินไปตามจำนวนรุ่นของประชากรที่กำหนดให้มีการสร้างขึ้น อาทิเช่น ในกรณีที่กำหนดให้จำนวนรุ่นเท่ากับ 50 รุ่น โปรแกรม GA จะดำเนินการต่อเนื่องจนได้ประชากรชุดสุดท้ายคือชุดที่ 50 เพื่อนำไปดำเนินการตามขั้นตอนที่ (7)

7) วิเคราะห์หาประชากรที่ให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมที่สุด

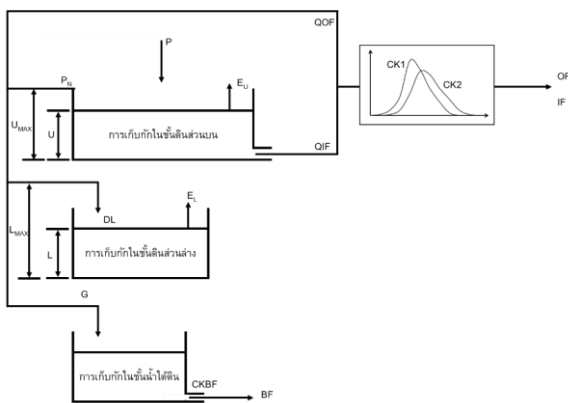
นำประชากรชุดสุดท้ายซึ่งอยู่ในรูปแบบของเลขฐานสองมาแปลงเป็นเลขฐานสิบ (Decimal Value) เพื่อไปแทนค่าในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเลือกประชากรที่ให้ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีค่ามากที่สุดหรือน้อยที่สุด (Optimum Value) ตามที่กำหนดไว้



รูปที่ 2 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานของ GA

3.3 แบบจำลอง Modified NAM

Modified NAM เป็นแบบจำลองได้รับการปรับปรุงจากแบบจำลอง NAM ที่พัฒนาขึ้นโดย The Danish Hydraulic Institute (DHI) ทั้งนี้แบบจำลอง NAM แบ่งปริมาณการเก็บกักออกเป็น 4 ส่วน คือ (1) การเก็บกักในชั้นหิมะ (2) การเก็บกักในชั้นดินส่วนบน (3) การเก็บกักในชั้นดินส่วนล่าง และ (4) การเก็บกักในชั้นน้ำใต้ดิน ในขณะที่แบบจำลอง Modified NAM ได้ตัดปริมาณการเก็บกักในชั้นหิมะออกไปเนื่องจากไม่มีหิมะในประเทศไทย รวมทั้งตัดตัวกระบวนการย่อย ๆ ที่ไม่มีผลมากมายต่อการประเมินน้ำท่าในภาพรวม ทั้งนี้แผนภาพโครงสร้างของแบบจำลอง Modified NAM แสดงดังในรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างของแบบจำลอง Modified NAM

3.3.1 การประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง Modified NAM

การประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง Modified NAM ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนการคำนวณ คือ (1) ปริมาณการระเหย (2) ปริมาณการไหลระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดิน (3) ปริมาณการไหลป่าผิวดิน (4) ปริมาณการไหลในชั้นน้ำใต้ดิน (5) การเคลื่อนตัวของปริมาณการไหลป่าบนผิวดิน และการเคลื่อนตัวของปริมาณการไหลในระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดิน และ (6) การเคลื่อนตัวของปริมาณการไหลของน้ำใต้ดิน สำหรับรายละเอียดของการคำนวณแต่ละขั้นตอนแสดงไว้ดังในตารางที่ 2

3.4 ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ Nash–Sutcliffe

ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ Nash–Sutcliffe (Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient, *NSE*) เป็นวิธีการทางสถิติที่บ่งบอกถึงสัดส่วนระหว่างความแปรผันของปริมาณการไหลที่ได้จากแบบจำลองเทียบกับความแปรผันของข้อมูลปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัดจากสถานีวัดน้ำท่า โดยค่า *NSE* สามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ (3.1) โดยที่ดัชนี *NSE* จะมีค่าระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 และในกรณีที่ $NSE = 1$ หมายถึง ปริมาณการไหลที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีความเข้ากันได้ทั้งหมดกับปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัด และสำหรับในกรณีที่ค่า $NSE < 0$ แสดงว่า ปริมาณการไหลเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดมีค่ามากกว่าปริมาณการไหลที่ได้จากแบบจำลอง

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q})^2} \tag{3.1}$$

โดยที่ Q_t^{obs} คือปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัดจากสถานีวัดน้ำท่า ณ เวลาที่ t , Q_t^{sim} คือปริมาณการไหลที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลอง ณ เวลาที่ t และ \bar{Q} คือปริมาณการไหลเฉลี่ยของปริมาณการไหลที่ได้จากการตรวจวัดจากสถานีวัดน้ำท่า

4. ขั้นตอนการศึกษา

งานวิจัยเรื่อง “การสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM แบบอัตโนมัติ โดยใช้โปรแกรม SENSWAT-GA” มีขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้

- 1) เขียนโปรแกรมการดำเนินงานแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM ที่มีพื้นฐานจากแบบจำลอง Modified NAM ด้วยภาษา MATLAB
- 2) เขียนการดำเนินงานโปรแกรม SENSWAT-GA ที่มีพื้นฐานของกระบวนการ Genetic Algorithm ด้วยภาษา MATLAB โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เดียว คือการหาค่าสูงสุดของดัชนี *NSE*
- 3) เขียนโปรแกรมการเชื่อมโยงระหว่างแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM และโปรแกรม SENSWAT-GA เพื่อการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM ในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองโดยอัตโนมัติ

4) รวบรวมข้อมูลฝน ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิง และ ข้อมูลน้ำท่า ที่อยู่ในพื้นที่รับน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.20, P.75, P.67, P.21 และ P.1

5) สอบเทียบแบบจำลอง SENSAT-Modified NAM แบบอัตโนมัติ โดยโปรแกรม SENSAT-GA ที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.20, P.75, P.67, P.21 และ P.1

6) วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา

3.2.1 เรื่อง “การประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง Modified NAM” ทั้งนี้ แบบจำลอง SENSAT- Modified NAM จะถูกกำหนดค่าเริ่มต้น (Initial condition) จำนวน 5 พารามิเตอร์ คือ U, L, OF, IF และ BF และพารามิเตอร์ของแบบจำลองจำนวน 10 พารามิเตอร์ซึ่ง ประกอบด้วย $U_{max}, L_{max}, CQOF, CKIF, TOF, TIF, TG, CK1, CK2$ และ $CKBF$ ที่เป็นผลจากโปรแกรม SENSAT-GA

5. ผลการศึกษา

5.1 การพัฒนาแบบจำลอง SENSAT-Modified NAM

แบบจำลอง Modified NAM ได้รับการพัฒนาให้เป็นแบบจำลอง SENSAT- Modified NAM โดยใช้ภาษา MATLAB เพื่อการประเมินน้ำท่าตามขั้นตอนการคำนวณ 6 ขั้นตอน ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อ ตารางที่ 2 รายละเอียดของขั้นตอนการประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง Modified NAM

ขั้นตอนการคำนวณ	สมการ		ความหมายของตัวแปร
1) ปริมาณการคายระเหย, ET	$E_U = \begin{cases} ET & ; U \geq ET \\ U & ; 0 < U < ET \\ 0 & ; U = 0 \end{cases}$ $E_L = (ET - E_U)(L / L_{max})$	E_U U E_L L L_{max}	= การคายระเหยที่ชั้นดินส่วนบน = ปริมาณการเก็บกักในชั้นดินส่วนบน = การคายระเหยที่ชั้นดินส่วนล่าง = ปริมาณการเก็บกักในชั้นดินส่วนล่าง = ความจุเก็บกักสูงสุดของชั้นรากพืช
2) ปริมาณการไหลระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดิน, QIF	$QIF = \begin{cases} U \frac{\Delta t}{CKIF} \left(\frac{L / L_{max} - TIF}{1 - TIF} \right) & ; L / L_{max} > TIF \\ 0 & ; L / L_{max} \leq TIF \end{cases}$	$CKIF$ TIF Δt	= ค่าคงที่ของเวลาสำหรับปริมาณน้ำที่ไหลในระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดิน = ค่าเริ่มต้นของการเกิดปริมาณการไหลในระหว่างผิวดิน และชั้นน้ำใต้ดิน = ช่วงเวลาการคำนวณ (Computational Time Step) หน่วยเป็น ชั่วโมง
3) ปริมาณการไหลป่าผิวดิน, QOF	$QOF = \begin{cases} CQOF \left(\frac{L / L_{max} - TOF}{1 - TOF} \right) & ; L / L_{max} > TOF \\ 0 & ; L / L_{max} \leq TOF \end{cases}$	$CQOF$ TOF	= สัมประสิทธิ์ของปริมาณน้ำท่าที่ไหลป่าบนผิวดิน = ค่าเริ่มต้นของการเกิดการไหลป่าบนผิวดิน
4) ปริมาณการไหลในชั้นน้ำใต้ดิน, G	$G = \begin{cases} (P_N - QOF) \left(\frac{L / L_{max} - TG}{1 - TG} \right) & ; L / L_{max} > TG \\ 0 & ; L / L_{max} \leq TG \end{cases}$ $DL = (P_N - QOF) - G$	PN TG DL	= ความลึกฝนส่วนเกินสุทธิ = ค่าเริ่มต้นของการเกิดการไหลในชั้นน้ำใต้ดิน = ปริมาณน้ำที่เติมให้ชั้นดินส่วนล่าง
5) การเคลื่อนตัวของปริมาณการไหลป่าบนผิวดินและการเคลื่อนตัวของปริมาณการไหลระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดิน	$OF_t^{(1)} = OF_{t-1}^{(1)} \times e^{-\Delta t / CK1} + QOF_t (1 - e^{-\Delta t / CK1})$ $OF_t^{(2)} = OF_{t-1}^{(2)} \times e^{-\Delta t / CK2} + OF_t^{(1)} (1 - e^{-\Delta t / CK2})$ $IF_t^{(1)} = IF_{t-1}^{(1)} \times e^{-\Delta t / CK1} + QIF_t (1 - e^{-\Delta t / CK1})$ $IF_t^{(2)} = IF_{t-1}^{(2)} \times e^{-\Delta t / CK2} + IF_t^{(1)} (1 - e^{-\Delta t / CK2})$	$OF_{t-1}^{(1)}, OF_{t-1}^{(2)}$ $OF_t^{(1)}, OF_t^{(2)}$ $IF_{t-1}^{(1)}, IF_{t-1}^{(2)}$	= ความลึกของการไหลของปริมาณการไหลป่าบนผิวดินที่ผ่านการเคลื่อนตัวครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ที่เวลา ก่อนหน้า ($t-1$) = ความลึกของการไหลของปริมาณการไหลป่าบนผิวดินที่ผ่านการเคลื่อนตัวครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ที่เวลา ปัจจุบัน (t) = ความลึกของการไหลของปริมาณการไหลระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดิน

			<p>ที่ผ่านการเคลื่อนตัวครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ที่เวลาก่อนหน้า ($t-1$)</p> <p>$IF_t^{(1)}, IF_t^{(2)}$ = ความลึกของการไหลของปริมาณการไหลระหว่างผิวดินและชั้นน้ำใต้ดิน ที่ผ่านการเคลื่อนตัวครั้งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ที่เวลาปัจจุบัน (t)</p> <p>$CK1, CK2$ = เวลาหน่วง (Lag Time) ของการเกิดน้ำท่า หน่วยเป็น ชั่วโมง</p>
6) การเคลื่อนตัวของปริมาณการไหลของน้ำใต้ดิน	$BF_t = BF_{t-1} \times e^{-\Delta t / CKBF} + G(1 - e^{-\Delta t / CKBF})$	<p>BF_{t-1} = ความลึกของการไหลในชั้นน้ำใต้ดิน ที่เวลาเริ่มต้น</p> <p>BF_t = ความลึกของการไหลในชั้นน้ำใต้ดิน ที่เวลาเริ่มต้นที่ผ่านการเคลื่อน</p> <p>$CKBF$ = เวลาหน่วงของการเกิดการไหลของน้ำใต้ดิน</p>	

5.2 การพัฒนาแบบจำลองโปรแกรม SENSWAT-GA

โปรแกรม SENSWAT-GA จะหน้าที่ในการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SENSWAT- Modified NAM ตามกระบวนการของ Genetic Algorithm ที่มีการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือดัชนี *NSE* เพื่อนำไปสู่การเข้ากันได้มากที่สุดระหว่างกราฟน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลอง SENSWAT- Modified NAM และกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด ทั้งนี้ ในกระบวนการของโปรแกรม SENSWAT-GA จะต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ควบคุมการดำเนินงานของโปรแกรม SENSWAT-GA ซึ่งประกอบด้วย (1) จำนวนรุ่นของประชากร (i_{max}) (2) จำนวนประชากร (Number of Population, Strings) (3) ความน่าจะเป็นของการเกิด Crossover (4) ความน่าจะเป็นของการเกิด Mutation และ (5) Elite Child Strings ซึ่งในการศึกษานี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 200, 200, 0.70, 0.02 และ 10% ของจำนวนประชากรตามลำดับ

5.3 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM แบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม SENSWAT-GA

จากการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM เพื่อการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม SENSWAT-GA ที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A, P.20, P.75, P.67, P.21 และ P.1 พบว่า ค่าเริ่มต้นและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM สำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่า แสดงดังในตารางที่ 3 และจากผลการสอบเทียบพบว่า ค่า *NSE* ของสถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้มีค่าเท่ากับ 0.79, 0.71, 0.77, 0.81, 0.75 และ 0.86 ตามลำดับ ซึ่งนับว่าเป็นที่ยอมรับได้ นอกจากนั้นแล้ว ในรูปที่ 4 ได้แสดงปริมาณน้ำท่าสะสมที่ได้จากการประเมินโดยแบบจำลองเทียบกับปริมาณน้ำท่าสะสมที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 6 สถานี

ซึ่งจากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ทุกสถานีวัดน้ำท่ายกเว้นสถานี P.20 มีการเข้ากันได้ดีมาก ทั้งนี้ ปริมาณน้ำท่าสะสมที่คำนวณโดยแบบจำลองที่สถานี P.20 มีน้อยกว่าปริมาณน้ำท่าสะสมที่ได้จากการตรวจวัด ทำให้ค่า *NSE* ของสถานี P.20 มีค่าเท่ากับ 0.71 ซึ่งต่ำสุดเมื่อเทียบกับค่า *NSE* ของสถานีวัดน้ำท่าอื่น ๆ ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากความผิดพลาดของข้อมูลน้ำฝนหรือข้อมูลน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดที่อาจไม่สอดคล้องกัน อย่างไรก็ตาม ทั้งแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM และโปรแกรม SENSWAT-GA ได้แสดงความสามารถในการสอบเทียบแบบจำลองได้โดยอัตโนมัติและให้ผลการประเมินกราฟน้ำท่าในเกณฑ์ที่ดีเป็นที่ยอมรับได้

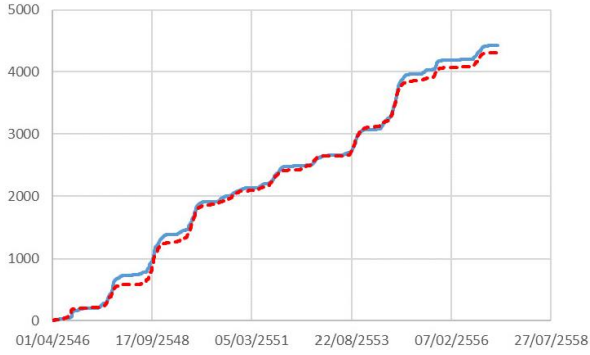
6. สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษานี้ได้พิสูจน์แล้วว่าโปรแกรม SENSWAT-GA สามารถวิเคราะห์ค่าของเงื่อนไขเริ่มต้นและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM แบบอัตโนมัติได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถลดระยะเวลาการดำเนินงานได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial and error) รวมทั้งสามารถสร้างความถูกต้องของผลการประเมินกราฟน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 6 สถานี ในลุ่มน้ำบึงตอนบนได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการกำหนดค่าของพารามิเตอร์ควบคุมการดำเนินงานของโปรแกรม SENSWAT-GA ซึ่งประกอบด้วย จำนวนรุ่นของประชากร จำนวนประชากร ความน่าจะเป็นของการเกิด Crossover ความน่าจะเป็นของการเกิด Mutation และจำนวน Elite Child Strings ให้มีค่าเท่ากับ 200, 200, 0.70, 0.02 และ 10% ของจำนวนประชากร ตามลำดับ ดังนั้น ในขั้นต่อไปทางศูนย์วิจัย SENSWAT จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาโปรแกรม SENSWAT-GA ให้สามารถหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวได้โดยอัตโนมัติ โดยจะทำการกำหนดใช้ค่าเริ่มต้นจากการศึกษานี้ เพื่อนำไปใช้หาค่า

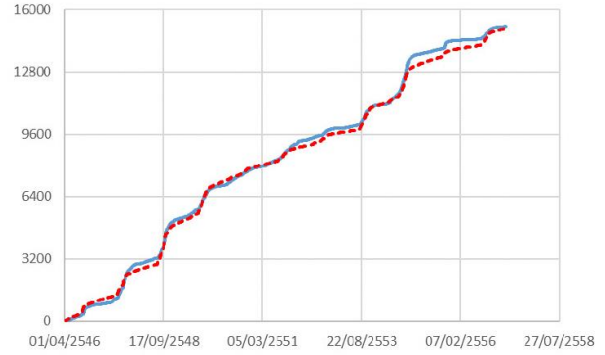
ของเงื่อนไขเริ่มต้นและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM ให้แล้วเสร็จก่อน จากนั้นจึงดำเนินการหาค่าของพารามิเตอร์ควบคุมการดำเนินงานของโปรแกรม SENSWAT-GA ต่อไป นอกจากนี้แล้ว ทางศูนย์วิจัย SENSWAT จะพัฒนาให้โปรแกรม SENSWAT-GA สามารถวิเคราะห์ค่าของเงื่อนไขเริ่มต้นและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น กล่าวคือ ในการดำเนินงานแบบจำลองในแต่ละครั้ง ผลการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ จะต้องมีความใกล้เคียงกันเพื่อสร้างความมั่นใจได้ว่า ค่าของเงื่อนไขเริ่มต้นและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SENSWAT-Modified NAM สามารถใช้เป็นตัวแทนที่แท้จริงของสถานีวิัดน้ำทำที่พิจารณาได้ เพื่อให้แบบจำลอง แบบจำลอง SENSWAT-ตารางที่ 3 ค่าเริ่มต้นและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Modified NAM จากการสอบเทียบแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม SENSWAT-GA

Modified NAM และโปรแกรม SENSWAT-GA ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้จริงต่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของประเทศ

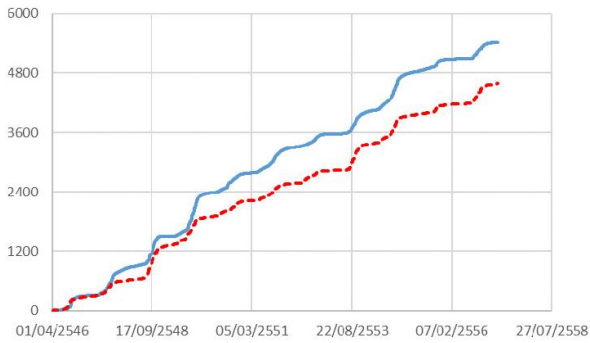
รหัสสถานี	ค่าเริ่มต้นและพารามิเตอร์ของแบบจำลอง														
	<i>U</i> (มม.)	<i>L</i> (มม.)	<i>OF</i> (มม.)	<i>IF</i> (มม.)	<i>BF</i> (มม.)	<i>U</i> _{max} (มม.)	<i>L</i> _{max} (มม.)	<i>CQOF</i>	<i>CKIF</i> (ชม.)	<i>TOF</i>	<i>TIF</i>	<i>TG</i>	<i>CK1</i> (ชม.)	<i>CK2</i> (ชม.)	<i>CKBF</i> (ชม.)
P.4A	9	128	0.1	0.9	0.3	34	515	0.319	1270	0.063	0.128	0.628	27	42	991
P.20	1	32	0.0	0.2	0.3	64	503	0.958	510	0.12	0.067	0.012	45	16	4048
P.75	7	130	0.2	0.0	0.4	85	760	0.542	1040	0.137	0.355	0.022	80	24	9446
P.67	15	55	0.0	0.2	0.5	66	513	0.767	260	0.198	0.609	0.132	22	96	7473
P.21	14	191	0.1	0.0	0.3	66	511	0.353	1700	0.062	0.009	0.51	32	30	8451
P.1	11	70	0.0	0.0	0.4	65	538	0.667	1290	0.314	0.011	0.256	33	62	4935



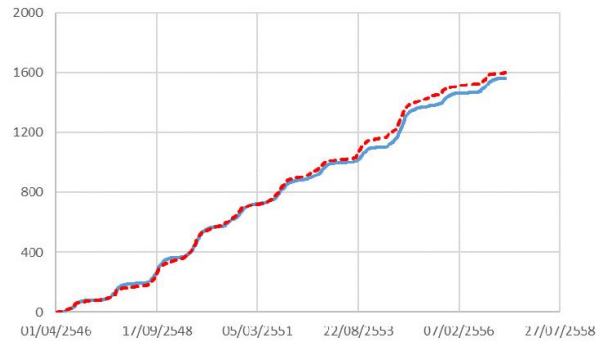
ก.สถานีวัดน้ำท่า P.4A



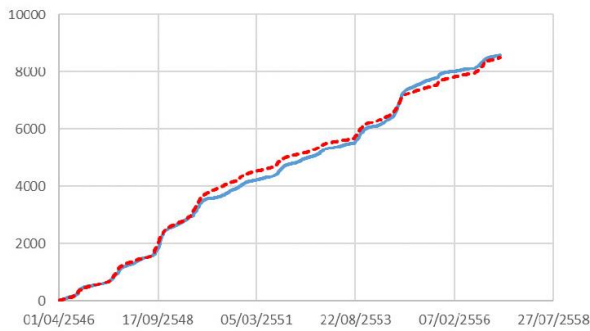
ง.สถานีวัดน้ำท่า P.6



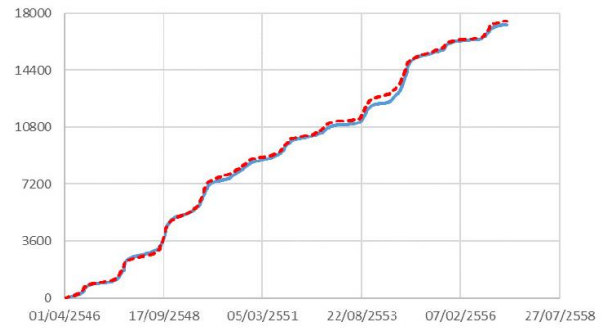
ข.สถานีวัดน้ำท่า P.20



จ.สถานีวัดน้ำท่า P.21



ค.สถานีวัดน้ำท่า P.75



ฉ.สถานีวัดน้ำท่า P.1

โดยที่

แกนตั้ง คือ ปริมาณน้ำท่าสะสม (ล้าน ลบ.ม.)

แกนนอน คือ วันที่

— ปริมาณน้ำท่าจากการตรวจวัด

- - - ปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง

รูปที่ 4 ปริมาณน้ำท่าสะสมจากแบบจำลองเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำท่าสะสมจากการตรวจวัดทั้ง 6 สถานี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management; SENSWAT) ที่ได้ให้การสนับสนุน ข้อมูล และข้อเสนอแนะในการศึกษา รวมทั้งกรมชลประทาน และกรมอุตุฯ มหาวิทยาลัยที่ได้ให้การสนับสนุนข้อมูลสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. D. Sharma and S. Singh (1992) , Runoff estimation using Landsat Thematic Mapper data and the SCS model, Hydrological Sciences Journal, vol.37, no.1, pp. 39-52
- [2] วิษุวัตม์กั แต่สมบัติ และกิตติพงษ์ ทองเชื้อ (2554). การประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ MIKE11-Data Assimilation เพื่อการพยากรณ์น้ำท่วมในลุ่มน้ำชีตอนบน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16, มหาวิทยาลัยมหิดล, 18-20 พฤษภาคม 2554
- [3] Fenicia, F., Savenije, H.H.G., Matgen, P. and Pfister, L. (2008). Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement. Water Resources Research, 44.
- [4] Gao, H., Hrachowitz, M., Fenicia, F., Gharari, S. and Savenije, H.H.G. (2014). Testing the realism of a topography-driven model (FLEX-Topo) in the nested catchments of the Upper Heihe, China. Hydrology and Earth System Sciences, 18, pp.1895-1915
- [5] Jung-Hun Song, Younggu Her, Jihoon Park and Moon-Seong Kang (2019). Exploring parsimonious daily rainfall-runoff model structure using the hyperbolic tangent function and Tank model. Journal of Hydrology, 574, pp.574-587
- [6] Martin Chulumbecky, Josef Buchtele and Karel Richta (2017). Application of random number generators in genetic algorithm to improve rainfall-runoff modelling. Journal of Hydrology, 553, pp.350-355
- [7] นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์ (2560), อุทกวิทยาขั้นสูง (ADVANCED HYDROLOGY). ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า 49-88.