

การศึกษาการจำลองปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำห้วยหลวงโดยใช้แบบจำลอง SWAT Study of Runoff Simulation in Huai Luang Watershed Using SWAT

ปิยะวัฒน์ วุฒิชัยกิจเจริญ^{1*}
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีรวัฒน์ ปลาเงิน²
ดร.สมพินิจ เหมืองทอง³

¹อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
E-mail: piyawat@rmu.ac.th

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
E-mail: phee2010@gmail.com

³อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
E-mail: somphinith.mu@rmu.ac.th

บทคัดย่อ : การศึกษานี้เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT ในการจำลองปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำห้วยหลวง จังหวัดอุดรธานี เพื่อทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลอง รวมถึงการสอบเทียบและการตรวจสอบแบบจำลอง โดยทำการจำลองปริมาณน้ำท่ารายเดือน ณ สถานี Kh.53 และ Kh.103 วิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรและสอบเทียบแบบจำลองในช่วงปี พ.ศ. 2548-พ.ศ. 2553 และทำการตรวจสอบแบบจำลองในช่วง พ.ศ. 2554-พ.ศ. 2556 ผลการศึกษาพบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำท่ามากที่สุดได้แก่ค่า CN2, SOL_AWC และ SOL_K ตามลำดับ จากการสอบเทียบและการตรวจสอบแบบจำลองพบว่าแบบจำลอง SWAT ให้ผลการจำลองปริมาณน้ำท่าอยู่ในเกณฑ์ที่น่าเชื่อถือ โดยพิจารณาจากค่าสถิติทดสอบ R^2 , NSE และ PBIAS โดยผลการจำลองน้ำท่า ณ สถานี Kh.53 และ Kh.103 ในช่วงเวลาทั้งหมด (พ.ศ. 2548-พ.ศ. 2556) ให้ค่า $R^2 = 0.564$ และ 0.712 , ค่า NSE = 0.562 และ 0.709 , ค่า PBIAS = 6.739 และ 5.932 ตามลำดับ ผลการศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำห้วยหลวงภายใต้สถานการณ์เปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและการใช้ที่ดินในอนาคต เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการวางแผนจัดการลุ่มน้ำห้วยหลวงในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ: แบบจำลองลุ่มน้ำ น้ำท่า ห้วยหลวง

ABSTRACT : This study explores the application of SWAT model to simulation of runoff in the watershed of Huai Luang, Udon Thani Province, Thailand. The sensitivity of the parameters used in the model, the model calibration and model verification were also evaluated. The monthly runoff at stations Kh.53 and Kh.103 were simulated. The sensitivity and model calibration were analyzed from 2005-2010, and the model validation was continuously simulated from 2011-2013. The results of the study reveal that, the most sensitive variables affecting the simulated runoff are CN2, SOL_AWC and SOL_K. The model calibration and validation results reveal that applying the SWAT model for runoff simulation in the study basin provides a promising output with respect to R^2 , NSE and PBIAS. The model calibration and validation results for stations Kh.53 and Kh.103 are summarized as follows: $R^2 = 0.564$ and 0.712 , $NSE = 0.562$ and 0.709 , $PBIAS = 6.739$ and 5.932 . The results of this study could be used to predict runoff in the Huai Luang watershed under changing of climate and land use conditions in the future for future watershed management planning.

Keywords : Watershed Modeling, Runoff, SWAT, Huai Luang

1. บทนำ

แบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool, SWAT พัฒนาโดย Arnold et al. [1, 2] เป็นแบบจำลองทางอุทกวิทยาที่สามารถจำลองลักษณะทางกายภาพของกลุ่มน้ำ โดยการกระจายพารามิเตอร์ตามสภาพทางกายภาพของพื้นที่จริง สามารถใช้ในการคาดการณ์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศและการใช้ที่ดินต่อปริมาณน้ำท่า ปริมาณตะกอน และสารเคมีจากเกษตรกรรม โดยมีกระบวนการคำนวณที่มีประสิทธิภาพและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายเป็นที่ยอมรับทั้งในระดับสากลและในระดับภูมิภาคของประเทศไทย [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเหมาะสมของแบบจำลอง SWAT และประเมินค่าชุดตัวแปรของแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับ

ประยุกต์ใช้ในการจำลองปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำห้วยหลวง ซึ่งเป็นลุ่มน้ำย่อยของกลุ่มน้ำโขงในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยมีอ่างเก็บน้ำห้วยหลวงเป็นแหล่งกักเก็บน้ำต้นทุนที่สำคัญของจังหวัดอุดรธานี มีปริมาณเก็บกักสูงสุด 135 ล้าน ลบ.ม. คิดเป็น 75% ของความต้องการใช้น้ำทั้งหมดของจังหวัดอุดรธานี (ข้อมูลจากสำนักงานทรัพยากรน้ำภาค 3) ซึ่งปัจจุบันมีอัตราการขยายตัวทางเศรษฐกิจสูงและมีแนวโน้มเข้าสู่ภาวะขาดแคลนน้ำในฤดูแล้ง เนื่องจากมีประชากรเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคเพิ่มมากขึ้นและนอกจากนี้ยังมีโอกาสเกิดน้ำท่วมมากขึ้นในฤดูฝน เนื่องจากมีสิ่งปลูกสร้างทางด้านเศรษฐกิจขวางทางน้ำเพิ่มมากยิ่งขึ้น [11] โดยผลการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็น

เครื่องมือในการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำห้วยหลวง ภายใต้การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและการใช้ที่ดินในอนาคต เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการวางแผนและกำหนดยุทธศาสตร์การจัดการทรัพยากรน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหลวงให้เป็นไปอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป

2. วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาประกอบด้วยขั้นตอนการรวบรวมข้อมูล การตั้งค่าพื้นฐานในแบบจำลอง SWAT การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร การสอบเทียบแบบจำลอง และการตรวจสอบแบบจำลอง โดยได้แสดงรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในแบบจำลอง SWAT สองกลุ่มใหญ่ ได้แก่ ข้อมูลทางกายภาพของลุ่มน้ำ และข้อมูลสภาพภูมิอากาศรายวัน ข้อมูลกลุ่มแรกประกอบไปด้วย ข้อมูลระดับผิวดิน ชนิดดิน และการใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลกลุ่มที่สอง ได้แก่ ข้อมูลน้ำฝน อุณหภูมิสูงสุดต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์ รังสีแสงอาทิตย์ และความเร็วลม ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลสภาพภูมิอากาศรายวัน หรือข้อมูลขาดหาย แบบจำลอง SWAT สามารถประมาณค่าดังกล่าวจากสถิติข้อมูลสภาพอากาศพื้นฐานในแต่ละพื้นที่ได้ แบบจำลองย่อยดังกล่าวเรียกว่า Weather Generator รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง SWAT ของการศึกษานี้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาแบบจำลอง SWAT

ที่	ชนิดของข้อมูล	ช่วงเวลา (พ.ศ.)	ที่มา
1	ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) 30 ม. x 30 ม.	2554	ASTER GDEM v.2 [12]
2	ข้อมูลชุดดิน	2558 (ปรับปรุงล่าสุด)	กรมการพัฒนาที่ดิน
3	ข้อมูลการใช้ที่ดิน	2553	กรมการพัฒนาที่ดิน
4	ข้อมูลฝนและอุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุด รายวัน	2546-2556	กรมอุตุนิยมวิทยา
5	ข้อมูลน้ำท่ารายวัน	2546-2556	กรมชลประทาน

การศึกษานี้เลือกใช้ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) จาก ASTER GDEM 30 ม. X 30 ม. เนื่องจากผลการเปรียบเทียบตำแหน่งทางกายภาพของสภาพลุ่มน้ำ (ค่าระดับดิน ตำแหน่งอ่างเก็บน้ำ เส้นแนวลำน้ำ แนวถนน ฯลฯ) กับข้อมูลในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ที่ได้จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ประกอบกับผลการสำรวจภาคสนาม ให้ผลเป็นที่น่าพอใจที่สุด จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่าระดับดินในลุ่มน้ำห้วยหลวงอยู่ในช่วง 87-647 ม.รทก. ซึ่งมีค่าระดับเฉลี่ยทั้งลุ่มน้ำที่ 205.3 ม.รทก. โดยพื้นที่ส่วนใหญ่ (73.16% ของพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมด) มีระดับความสูงอยู่ในช่วง 167-247 ม.รทก.

ข้อมูลชนิดดินที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้แก่ ข้อมูลชุดดิน (Soil Series) ซึ่งเป็นหน่วยจำแนกดินที่ละเอียดที่สุด ที่ได้ทำการสำรวจข้อมูลโดยกรมพัฒนาที่ดิน ของประเทศไทย จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่าในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยหลวงประกอบด้วยชุดดินทั้งหมดจำนวน 16 ชุดดิน

โดยส่วนใหญ่ (เกินกว่า 50%) เป็นชุดดิน โปนพิสัย และชุดดินปึกธงชัย ครอบคลุมพื้นที่ ลุ่มน้ำ 38.81% และ 17.37% ตามลำดับ การ หาค่าคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของชุดดิน แต่ละชนิดที่ใช้ในแบบจำลอง SWAT ในบางตัว ที่กรมพัฒนาที่ดินไม่ได้ทำการทดสอบไว้ จะใช้ วิธีการคำนวณตามวิธีของ Shrestha et al. [4] และในกรณีของดินบริเวณที่ลาดชันเชิงซ้อน (SC) ที่ไม่มีการสำรวจคุณสมบัติดินไว้ จะใช้คุณสมบัติ ของดินบริเวณใกล้เคียงแทน

ข้อมูลการใช้ที่ดินที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็น ข้อมูลที่ทำการสำรวจในช่วงปี พ.ศ. 2553 โดย ถูกจำแนกเป็นกลุ่มใหญ่ทั้งสิ้น 9 กลุ่ม ดังแสดง ในตารางที่ 2

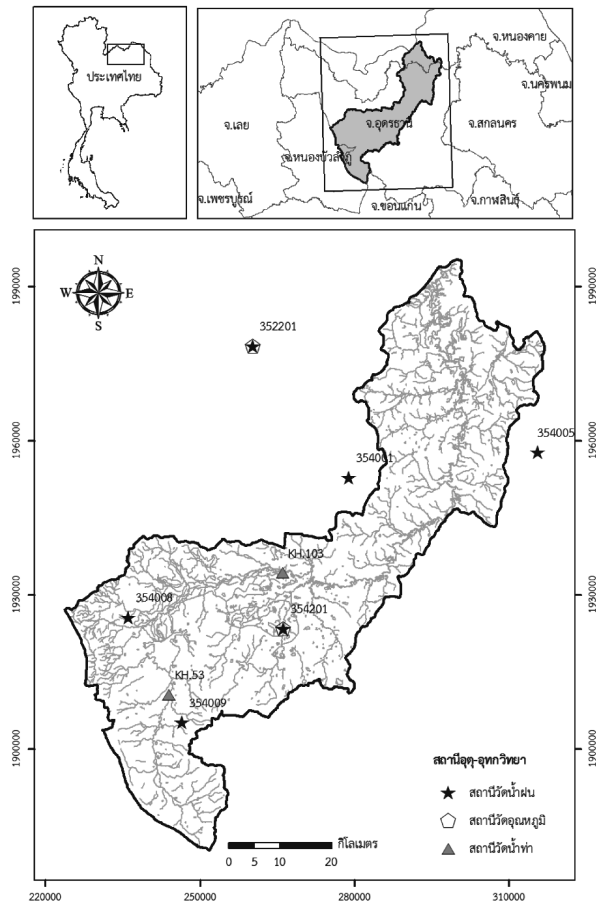
ตารางที่ 2 ข้อมูลการใช้ที่ดินลุ่มน้ำห้วยหลวง ปีพ.ศ. 2553

ที่	การใช้ที่ดิน	พื้นที่ (ตร.กม.)	ร้อยละของ พื้นที่รวม
1	ไม้ผลและเกษตรกรรมอื่น ๆ	251.83	7.37
2	มันสำปะหลัง	117.54	3.44
3	ข้าวโพด	0.68	0.02
4	ป่าไม้	575.76	16.85
5	นาข้าว	1400.63	40.99
6	ทุ่งหญ้าไม้ละเมาะและอื่น ๆ	436.01	12.76
7	อ้อย	201.60	5.90
8	ชุมชน	261.74	7.66
9	แหล่งน้ำ	171.53	5.02
รวม		3417.00	100.00

ข้อมูลน้ำฝนและข้อมูลน้ำท่าถูกคัดเลือก เพื่อให้อยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับข้อมูลการใช้ ที่ดิน เพื่อให้การคำนวณเป็นไปอย่างน่าเชื่อ ถือมากที่สุด ข้อมูลน้ำฝนรวบรวมได้ทั้งสิ้น 6 สถานีกระจายทั่วทั้งลุ่มน้ำศึกษา ข้อมูลอุทกวิทยิ รวบรวมได้ทั้งสิ้น 2 สถานี ข้อมูลน้ำท่าที่มีความ สมบูรณ์ในลุ่มน้ำศึกษามีจำนวนค่อนข้างน้อย รวบรวมได้ทั้งสิ้น 2 สถานี ได้แก่ สถานี Kh.53 และ Kh.103 ซึ่งอยู่ในช่วงต้นและช่วงกลางของ ลำน้ำห้วยหลวง ตามลำดับ รายละเอียดของ ข้อมูลสถานีอุตุ-อุทกวิทยาในลุ่มน้ำศึกษาแสดง ไว้ในตารางที่ 3 และ ภาพที่ 1

ตารางที่ 3 ข้อมูลสถานีอุตุ-อุทกวิทยาที่ใช้ในการศึกษา

ที่	รหัส สถานี	ที่ตั้งสถานี	ประเภทสถานี
1	354201	อ.เมือง จ.อุดรธานี	น้ำฝน, อุณหภูมิ
2	354001	อ.เพ็ญ จ.อุดรธานี	น้ำฝน
3	354005	อ.บ้านดุง จ.อุดรธานี	น้ำฝน
4	354008	อ.กุดจับ จ.อุดรธานี	น้ำฝน
5	354009	อ.หนองวัวซอ จ.อุดรธานี	น้ำฝน
6	352201	อ.ศรีเชียงใหม่ จ.หนองคาย	น้ำฝน, อุณหภูมิ
7	Kh.53	อ.หนองวัวซอ จ.อุดรธานี	น้ำท่า
8	Kh.103	อ.เมือง จ.อุดรธานี	น้ำท่า

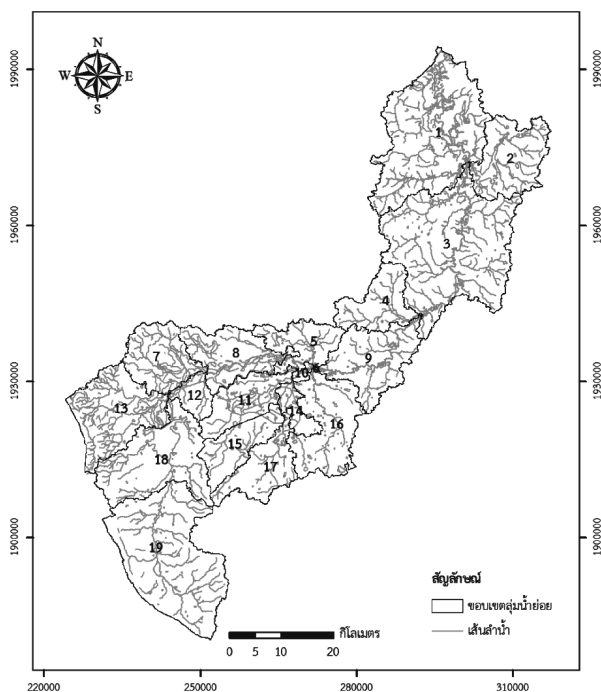


ภาพที่ 1 ตำแหน่งสถานีอุตุ-อุทกวิทยาที่ใช้ในการศึกษา

2.2 การตั้งค่าพื้นฐานในแบบจำลอง SWAT

แบบจำลอง SWAT ที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ ได้แก่ ArcSWAT Version 2009.93.7b โดยการตั้งค่าพื้นฐานในแบบจำลองเริ่มจากการกำหนดให้แบบจำลอง SWAT ทำการสร้างเส้นแนวลำน้ำ และแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย โดยในแต่ละลุ่มน้ำย่อยนั้นจะมีการแบ่งออกเป็นพื้นที่หน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic Response Units, HRUs) ตามลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน ชนิด

ดิน และความลาดชันผิวดิน โดยการศึกษานี้ได้แบ่งกลุ่มค่าความลาดชันของผิวดินออกเป็น 3 กลุ่ม ตามคำแนะนำของ FAO [13] ได้แก่ 0-8%, 8-30% และ >30% ซึ่งเป็นตัวแทนของ พื้นที่ราบลุ่ม ลาดชัน และภูเขา ตามลำดับ การคำนวณต่าง ๆ จะเริ่มที่ HRUs นี้ แล้วรวมกันเป็นลุ่มน้ำย่อย และเคลื่อนที่ไปสู่แม่น้ำในลำดับถัดไป การศึกษาใช้ขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำต่ำสุดในการสร้างเส้นลำน้ำเท่ากับ 100 ตร.กม. ใช้เกณฑ์ในการแบ่ง HRUs ตามพื้นที่ครอบคลุมของ การใช้ประโยชน์ที่ดิน ชนิดดิน และความลาดชันของผิวดิน ที่มีค่าเกิน 10% ของแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย (ถ้าครอบคลุมพื้นที่ไม่ถึง 10% ของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยจะไม่นำมาพิจารณาในการแบ่งกลุ่ม HRUs) เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้มีจำนวน HRUs มากเกินความจำเป็น ซึ่งจะทำให้ใช้เวลามากในการคำนวณโดยที่ได้ผลลัพธ์ไม่แตกต่างกันไปมาก โดยคู่มือการใช้แบบจำลอง SWAT แนะนำค่าไว้ที่ประมาณ 5-20% [14] เมื่อทำการแบ่งเส้นลำน้ำและพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยแล้วพบว่า มีความสอดคล้องกับข้อมูล GIS เส้นแนวลำน้ำและขอบเขตลุ่มน้ำ ที่รวบรวมได้จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำรวมจากแบบจำลอง SWAT คำนวณได้ 3,357 ตร.กม. และพื้นที่ลุ่มน้ำรวมจากกรมทรัพยากรน้ำมีขนาดเท่ากับ 3,417 ตร.กม. (แตกต่างกัน 1.8%) โดยแบ่งเป็นพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยได้ทั้งหมด 19 ลุ่มน้ำย่อย แสดงดังภาพที่ 2 และมีจำนวน HRUs ทั้งสิ้น 257 หน่วย โดยในแต่ละลุ่มน้ำย่อยจะมี HRUs อยู่ในช่วงระหว่าง 8-20 หน่วย



ภาพที่ 2 การแบ่งลุ่มน้ำย่อยโดยแบบจำลอง SWAT

การศึกษานี้ใช้แบบจำลอง Weather Generator ซึ่งเป็นแบบจำลองสภาพภูมิอากาศที่ถูกติดตั้งมาในแบบจำลอง SWAT ในการสังเคราะห์ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ข้อมูลรังสีแสงอาทิตย์ และข้อมูลความเร็วลม รายวัน โดยใช้สถิติข้อมูลสภาพภูมิอากาศย้อนหลัง 30 ปี (พ.ศ. 2524-พ.ศ. 2553) จากสถานีภูมิอากาศหลักในพื้นที่ศึกษาและบริเวณใกล้เคียงทั้งสิ้น 3 จังหวัด ได้แก่ จ.อุดรธานี จ.หนองคาย และ จ.ขอนแก่น เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับแบบจำลอง Weather Generator

2.3 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร
การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรโดยใช้แบบจำลอง SWAT-CUP Version 5.1.6.2 (SWAT Calibration and Uncertainty Procedures) โดยทำการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณน้ำท่า ณ สถานี Kh.53 ใช้ข้อมูลน้ำท่ารายเดือนในช่วง มกราคม 2548-ธันวาคม 2553 (72 เดือน) และการใช้ที่ดินของปี พ.ศ. 2553 เป็นข้อมูลทดสอบทำการวิเคราะห์ซ้ำเพื่อศึกษาความอ่อนไหวของตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำท่า 10 ตัวแปร [4,14] จำนวน 500 ครั้ง SWAT-CUP โดยแสดงผลในรูปแบบของกราฟ Dotty Plots ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและ Objective Function โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของตัวแปร และศึกษาความอ่อนไหวของตัวแปรในเบื้องต้น ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ค่า NSE (Nash-Sutcliffe Model Efficiency Coefficient) เป็นค่า Objective Function ซึ่งเป็นค่าแกนตั้งใน Dotty Plot ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าตัวแปรแต่ละตัวที่แปรผันไปในช่วงขอบเขตที่ได้รับระบุไว้ นอกจากการพิจารณาผลจาก Dotty Plot แล้ว SWAT-CUP สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรในรูปแบบของ Global Sensitivity Analysis โดยจะแสดงผลในรูปแบบของตารางแสดงค่า t-Stat และ P-Value ค่าสถิติสองค่านี้เป็นค่าที่ได้มาจากการทดสอบสมมติฐานว่าตัวแปรที่พิจารณาใด ๆ มีความสัมพันธ์กับค่า Objective Function หรือไม่ โดยการสร้างสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการถดถอยเชิงซ้อน ซึ่งสามารถทดสอบสถิติได้โดยพิจารณาจากค่า t-Stat มาก (ไม่พิจารณาเครื่องหมาย) หมายถึงตัวแปรนั้น

มีความอ่อนไหวต่อ Objective Function มาก และค่า P-Value เข้าใกล้ศูนย์ หมายถึงตัวแปรตัวนั้นมีความอ่อนไหวต่อ Objective Function อย่างมีระดับนัยสำคัญมาก [15] การศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรจากทั้ง Dot Plot และ Global Sensitivity Analysis

2.4 การสอบเทียบและการตรวจสอบแบบจำลอง

การสอบเทียบแบบจำลอง สามารถใช้ผลการศึกษาจาก แบบจำลอง SWAT-CUP 2012 Version 5.1.6.2 โดยใช้เทคนิค Sequential Uncertainty Fitting version 2 (SUFI2) ในการคำนวณ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร จากข้อมูลที่มี การศึกษานี้ได้ทำการศึกษาชุดตัวแปรที่เหมาะสมกับการประเมินปริมาณน้ำท่ารายเดือน ณ สถานี Kh.53 และ สถานี Kh.103 ในช่วงปี พ.ศ. 2548-พ.ศ. 2553 และหลังจากนั้น จะใช้ค่าชุดตัวแปรดังกล่าวทำการตรวจสอบแบบจำลองในช่วง พ.ศ. 2554-พ.ศ. 2556 ภายใต้สภาพการใช้ที่ดินคงที่ ในปี พ.ศ. 2553 โดยใช้สถิติทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลองที่เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานอุทกวิทยา [4, 16] จำนวน 3 ตัว ได้แก่ R^2 (Coefficient of Determination), NSE (Nash-Sutcliffe Model Efficiency Coefficient) และ PBIAS (Percent Bias) แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \times 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (3)$$

เมื่อ i คือ ลำดับที่ของข้อมูล, n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด, O_i คือ ค่าจากการตรวจวัด, $\bar{O}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลตรวจวัดทั้งหมด, P_i คือ ค่าจากแบบจำลอง และ $\bar{P}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากแบบจำลองทั้งหมด

SWAT-CUP ให้ผลการสอบเทียบแบบจำลองในรูปแบบของช่วงของตัวแปรที่เหมาะสมพร้อมกับการแสดงค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของการใช้ชุดตัวแปรดังกล่าว โดยแสดงผลการจำลองเป็นช่วง 95% ของความไม่แน่นอนจากการทำนาย (95% Prediction Uncertainty, 95PPU) ซึ่งช่วง 95PPU สามารถคำนวณได้ที่ค่าปริมาณน้ำท่า ณ ตำแหน่งที่สอดคล้องกับค่าร้อยละสะสมของการแจกแจงแบบปกติที่ระดับ 2.5% และ 97.5% จากผลการคำนวณซ้ำในช่วงตัวแปรที่พิจารณา โดยใช้การสุ่มตัวอย่างแบบละตินไฮเปอร์คิวบ์ (Latin Hypercube Sampling) [15] จากผลการคำนวณช่วง 95PPU นี้ SWAT-CUP จะแสดงผลของความไม่แน่นอนจากการทำนายในรูปแบบของค่า p-Factor และ

r-Factor โดยค่า p-Factor เป็นค่าที่แสดงถึงร้อยละของข้อมูลจริง (ค่าตรวจวัด) ที่ปรากฏอยู่ในช่วง 95PPU และ r-Factor คำนวณได้จากสัดส่วนของช่วงความกว้างเฉลี่ยของ 95PPU กับค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลจริง [15] โดยช่วงตัวแปรที่ดีที่สุดตามทฤษฎีจะต้องได้ค่า p-Factor = 100% และ r-Factor เข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งความเป็นจริงไม่สามารถเป็นได้ เนื่องจากค่า p-Factor จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ r-Factor มีค่ามาก คำตอบที่ดีที่สุดจึงถูกกำหนดเป็นช่วงของตัวแปรซึ่งให้ค่า p-Factor สูงที่สุดและ r-Factor ต่ำที่สุด โดยค่าที่แนะนำได้แก่ p-Factor ควรมีค่ามากกว่า 0.70 และ r-Factor ควรมีค่าน้อยกว่า 1.50 [17] นอกจากนี้แล้ว SWAT-CUP ยังสามารถแสดงผลของค่าชุดตัวแปรที่ดีที่สุด (Best Simulation Parameters) ซึ่งเป็นชุดตัวแปรที่ให้ค่า Objective Function สูงที่สุด ซึ่งเป็นชุดตัวแปรที่ดีที่สุดสามารถนำไปใช้ในการประยุกต์ใช้แบบจำลองในลำดับต่อไป

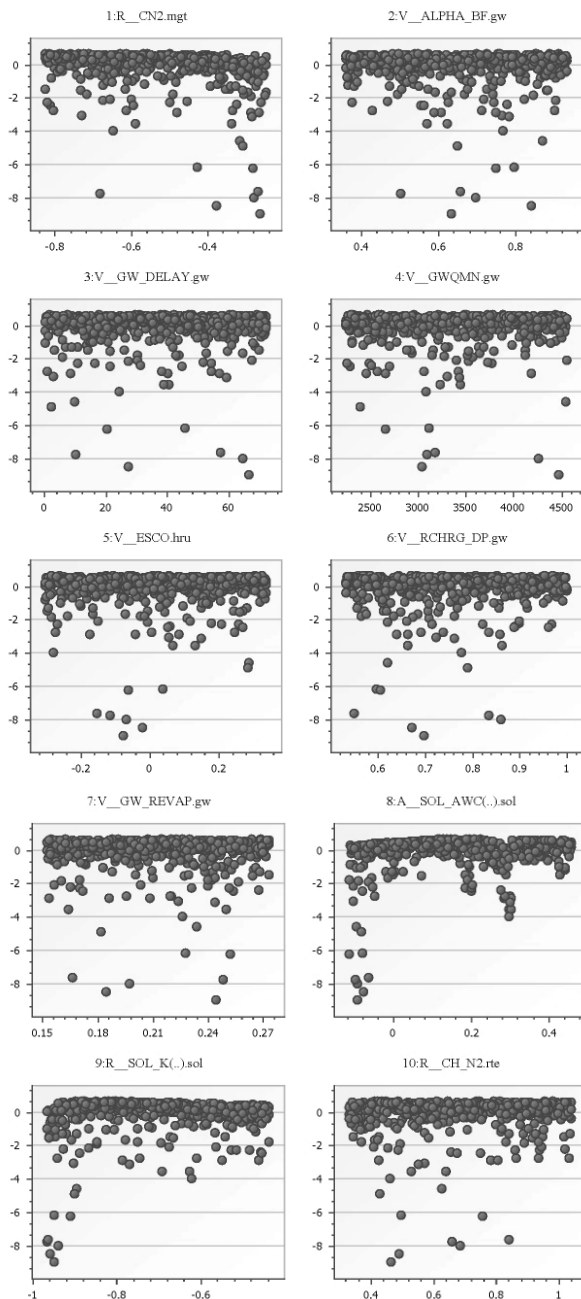
3. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาได้แก่ ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร ผลการสอบเทียบและการตรวจสอบแบบจำลองซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร

จากการใช้แบบจำลอง SWAT-CUP ทำการวิเคราะห์ซ้ำจำนวน 500 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณ

น้ำท่าที่คัดเลือกไว้จำนวน 10 ตัวแปรในช่วงที่พิจารณา ได้ผลการศึกษากาแฟ Dotty Plots ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยจะเห็นได้ว่าค่า CN2 และ SOL_AWC และ SOL_K เป็นตัวแปรมีความอ่อนไหวต่อค่า NSE (Objective Function) สูงกว่าตัวแปรอื่น ๆ ซึ่งพิจารณาได้จากแนวโน้มที่ชัดเจนของค่า NSE ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 มากยิ่งขึ้นตามทิศทางการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในช่วงที่พิจารณา โดยค่า NSE จะมีค่ามากขึ้นเมื่อค่า CN2 ลดลง ในขณะที่ SOL_AWC และ SOL_K มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงตัวแปรที่พิจารณานั้น ปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าปริมาณน้ำท่าจริง การลดปริมาณน้ำท่าลงจึงทำให้ NSE มีค่าเพิ่มมากขึ้นโดยตัวแปรอื่น ๆ ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน กล่าวคือค่า NSE มีทั้งค่ามากและน้อยเมื่อปรับค่าตัวแปรให้มีความมากขึ้นและลดลง โดย CN2 คือค่า SCS Runoff Curve Number ที่ความชื้นในดินระดับที่สอง (Moisture Condition II) SOL_AWC คือปริมาณน้ำในดินที่พืชสามารถนำมาใช้ได้ (Soil Available Water Capacity) และ SOL_K คือค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของดินในสภาพอิ่มตัว (Saturated Hydraulic Conductivity) ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการซึม (Infiltration) เป็นกระบวนการที่มีผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่าผิวดินมากที่สุด โดยทั้งสามตัวแปรดังกล่าว เกี่ยวข้องโดยตรงกับการซึม ซึ่งค่าการซึมจะมีปริมาณมากขึ้น (น้ำท่าผิวดินจะลดลง) เมื่อลดค่า CN2 และเพิ่มค่า SOL_AWC และ SOL_K ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับคำแนะนำและการศึกษาที่ผ่านมาของนักวิจัยหลายท่าน [5, 8, 14, 15, 17]



ภาพที่ 3 Dotty Plot ของตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา โดยแกนนอนคือค่าตัวแปรที่พิจารณา แกนตั้งคือค่า NSE

ผลการศึกษา Global Sensitivity Analysis แสดงในตารางที่ 4 โดยเห็นชัดเจนว่าค่า CN2 และ SOL_AWC และ SOL_K เป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่ามากที่สุด เรียงตามลำดับ โดยพิจารณาจากค่า t-Stat มีค่าสูงที่สุด และ P-Value มีค่าน้อยที่สุด (<0.05) ส่วนตัวแปรอื่นๆ มีความอ่อนไหวต่อปริมาณน้ำท่าน้อยกว่าสามตัวแปรแรก (มีค่า $P\text{-Value} > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่ได้จากการพิจารณา Dotty Plot ที่กล่าวไว้ในตอนต้น

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ Global Sensitivity Analysis

ตัวแปร	t-Stat	P-Value
1:R_CN2.mgt	-5.707	<0.004
8:A_SOL_AWC(..).sol	4.057	<0.004
9:R_SOL_K(..).sol	2.851	0.004
6:V_RCHRG_DP.gw	1.260	0.208
5:V_ESCO.hru	1.122	0.262
10:R_CH_N2.rte	1.068	0.286
7:V_GW_REVAP.gw	-0.989	0.323
2:V_ALPHA_BF.gw	-0.966	0.335
3:V_GW_DELAY.gw	0.724	0.470
4:V_GWQMN.gw	0.593	0.554

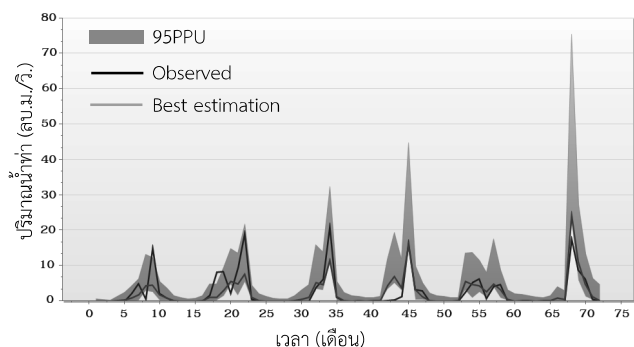
3.2 ผลการสอบเทียบและการตรวจสอบแบบจำลอง

ผลการสอบเทียบแบบจำลอง โดยใช้แบบจำลอง SWAT-CUP จากการคำนวณซ้ำโดยแปรผันชุดตัวแปรจำนวน 500 ครั้ง ในช่วงของชุดตัวแปรที่พิจารณา สำหรับสถานี Kh.53 ได้ผลการคำนวณค่า p-Factor และ r-Factor เท่ากับ 0.33 และ 1.20 ตามลำดับ และให้ค่า NSE ที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.56 ดังแสดงผลการศึกษาในตารางที่ 5 และ ภาพที่ 4 โดยเมื่อพิจารณาจาก

ค่า r-Factor ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1.5 แสดงให้เห็นว่าช่วงความกว้างเฉลี่ยของ 95PPU จากการใช้ชุดตัวแปรในช่วงจากค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดดังแสดงในตารางที่ 5 อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ [17] แต่เมื่อพิจารณาค่า p-Factor ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.70 แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองในช่วง 95PPU มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ตรวจวัดได้จริงอยู่ค่อนข้างมาก [17] ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่า NSE ที่มีค่ามากกว่า 0.50 ซึ่งคำนวณได้จากชุดตัวแปรที่ดีที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าให้ผลการคำนวณปริมาณน้ำท่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [16] โดยได้เลือกชุดตัวแปรที่ดีที่สุดนี้ สำหรับการตรวจสอบแบบจำลองในลำดับต่อไป

ตารางที่ 5 ผลการสอบเทียบแบบจำลองโดย SWAT-CUP

ตัวแปร	ค่าที่ดีที่สุด	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด
1:R_CN2.mgt	-0.476	-0.655	-0.285
2:V_ALPHA_BF.gw	0.820	0.739	1.005
3:V_GW_DELAY.gw	492.50	0.000	500
4:V_GWQMN.gw	845.00	0.000	1000
5:V_ESCO.bsn	0.312	0.010	1.000
6:V_RCHRG_DP.gw	0.647	0.483	0.779
7:V_GW_REVAP.gw	0.106	0.020	0.200
8:A_SOL_AWC(..).sol	0.132	0.093	0.349
9:R_SOL_K(..).sol	-0.809	-0.995	-0.752
10:R_CH_N2.rte	0.759	0.464	0.793



ภาพที่ 4 ผลการสอบเทียบแบบจำลองโดย SWAT-CUP

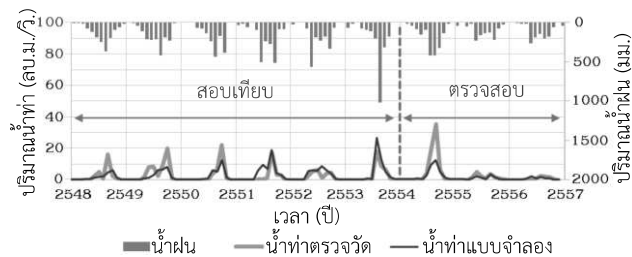
จากค่าชุดตัวแปรที่ดีที่สุดดังกล่าวเมื่อนำมาทดสอบในช่วงตรวจสอบแบบจำลอง (พ.ศ. 2554-พ.ศ.2556) ของสถานี Kh.53 และ Kh.103 ได้ผลการศึกษาดังแสดงใน ตารางที่ 6 ถึง ตารางที่ 7 และ ภาพที่ 5 ถึง ภาพที่ 6 ตามลำดับ โดยได้แสดงผลในรูปแบบเส้นกราฟ 1:1 ดังภาพที่ 7 ถึง ภาพที่ 8 ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง SWAT ให้ค่า R^2 และ NSE มีค่ามากกว่า 0.50 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานศึกษาของผู้วิจัยหลายท่านในอดีตที่ผ่านมา [5, 6, 7, 8, 17] แต่เมื่อพิจารณาผลต่างของปริมาณน้ำท่าโดยรวมจากค่า PBIAS พบว่ามีบางช่วงที่แตกต่างมีค่าเกิน 25% ทั้งนี้ อาจเป็นผลที่เกิดจากความแปรผันของปริมาณน้ำท่าที่ค่อนข้างมาก (เหตุการณ์ที่มีค่าสูงหรือต่ำมาก) และการคลาดเคลื่อนของการตรวจวัด ในขณะที่มีปริมาณน้ำท่ามาก (เหตุการณ์น้ำท่วมเป็นต้น) ตัวอย่างเช่น ณ สถานี Kh.53 ในช่วงปี พ.ศ. 2554 เป็นเหตุการณ์น้ำท่วมครั้งใหญ่ของประเทศไทย เป็นผลทำให้แบบจำลองคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าได้ต่ำกว่าที่เกิดขึ้นจริง ทำให้ค่า PBIAS และค่าอื่น ๆ แสดงความคลาดเคลื่อนในภาพรวมค่อนข้างสูง แต่เมื่อพิจารณาผลในภาพรวมทั้งหมดของทั้งช่วงสอบเทียบและตรวจสอบพบว่าได้ค่า PBIAS ไม่เกิน $\pm 25\%$ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และเมื่อพิจารณาเส้นกราฟ 1:1 ในภาพรวมของทั้งสองสถานี จะเห็นว่าปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าน้ำท่าที่ตรวจวัดได้จริง

ตารางที่ 6 ผลการสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง
SWAT ข้อมูลน้ำท่าสถานี Kh.53

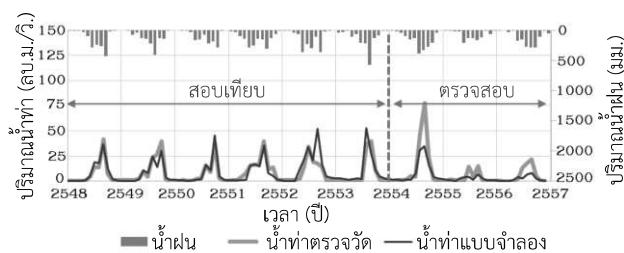
สถิติ ทดสอบ	สอบเทียบ (2548-2553)	ตรวจสอบ (2554-2556)	ทั้งหมด (2548-2556)
R^2	0.581	0.934	0.564
NSE	0.556	0.569	0.562
PBIAS	-7.737	38.136	6.739

ตารางที่ 7 ผลการสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง
SWAT ข้อมูลน้ำท่าสถานี Kh.103

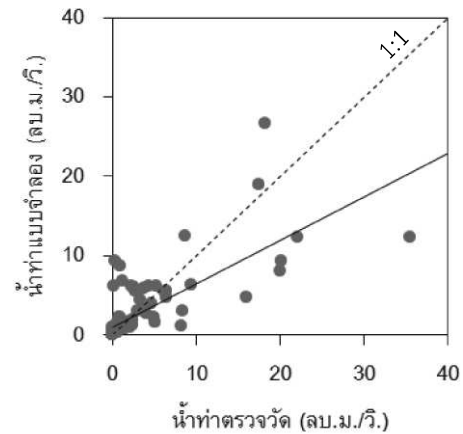
สถิติ ทดสอบ	สอบเทียบ (2548-2553)	ตรวจสอบ (2554-2556)	ทั้งหมด (2548-2556)
R^2	0.795	0.914	0.712
NSE	0.754	0.657	0.709
PBIAS	-9.347	40.104	5.932



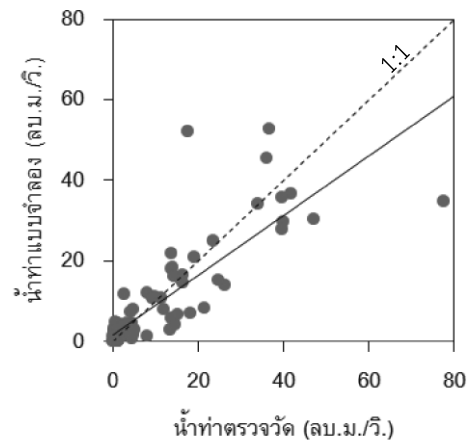
ภาพที่ 5 ผลการสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง
สำหรับปริมาณน้ำท่า ณ สถานี Kh.53



ภาพที่ 6 ผลการสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง
สำหรับปริมาณน้ำท่า ณ สถานี Kh.103



ภาพที่ 7 ผลการสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง
สำหรับปริมาณน้ำท่าทั้งหมดในปี พ.ศ. 2548-
พ.ศ. 2556 ณ สถานี Kh.53



ภาพที่ 8 ผลการสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง
สำหรับปริมาณน้ำท่าทั้งหมดในปี พ.ศ. 2548-
พ.ศ. 2556 ณ สถานี Kh.103

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลอง SWAT ในการจำลองปริมาณน้ำท่ารายเดือนในกลุ่มน้ำห้วยหลวง จังหวัดอุดรธานี เพื่อการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปรทางกายภาพที่ใช้ในแบบจำลอง รวมถึงการสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลอง ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของตัวแปร กับข้อมูลน้ำท่า ณ สถานี Kh.53 ในช่วง พ.ศ. 2548-พ.ศ. 2553 พบว่า CN2, SOL_AWC, และ SOL_K คือตัวแปรที่มีความอ่อนไหวต่อการจำลองน้ำท่ามากที่สุดตามลำดับ และ จากผลการสอบเทียบแบบจำลอง (พ.ศ. 2548-พ.ศ. 2553) และตรวจสอบแบบจำลอง (พ.ศ. 2554-พ.ศ.2556) ณ สถานี Kh.53 และ Kh.103 สรุปได้ว่า ในภาพรวมให้ผลอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยพิจารณาจาก R^2 และ NSE เกิน 0.50 และเมื่อพิจารณาจาก PBIAS พบว่า ปริมาณน้ำท่าที่ประมาณได้จากแบบจำลอง SWAT ในช่วงการสอบเทียบและตรวจสอบแบบจำลองมีค่าค่อนข้างแตกต่างกัน แต่เมื่อพิจารณาผลในภาพรวมทั้งหมดของทั้งช่วงสอบเทียบและตรวจสอบพบว่าได้ค่า PBIAS ไม่เกิน $\pm 25\%$ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [16] สามารถนำชุดตัวแปรนี้ไปประยุกต์ใช้ได้อย่างน่าเชื่อถือต่อไป

การศึกษาครั้งนี้มีข้อจำกัดในด้านความเพียงพอของจำนวนสถานีและข้อมูลปริมาณน้ำท่า จึงไม่สามารถสอบเทียบแบบจำลองปริมาณน้ำท่าได้อย่างทั่วถึงทั้งลุ่มน้ำ อีกทั้งความยาวของการจัดเก็บข้อมูลต่อเนื่องมีค่อนข้างน้อย หากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องมีการพัฒนาระบบสำรวจข้อมูลน้ำท่าให้มีจำนวนหลากหลายกระจายทั่วทั้งลุ่มน้ำ และมีการจัดเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องในระยะเวลายาวนาน ก็จะทำให้สามารถ

สอบเทียบแบบจำลองได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

แบบจำลอง SWAT เป็นแบบจำลองเชิงกายภาพ (Physical Model) ซึ่งจะต้องใช้ข้อมูลพื้นฐานทางกายภาพของลุ่มน้ำ เป็นจำนวนมาก ในการศึกษาครั้งนี้ ข้อมูลบางชนิดไม่มีการสำรวจหรือจัดเก็บไว้ก่อน จึงจำเป็นต้องใช้การประมาณค่าจากข้อมูลอื่นที่มี อย่างเช่นข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพของดินบางชนิด ได้แก่ ความหนาแน่นขึ้น (BD) ปริมาณน้ำในดินที่พืชนำไปใช้ได้ (AWC) การนำน้ำของดินในสภาพที่อิ่มตัว (SHC) และความสามารถในการดูดซับน้ำของดิน (FC) ไม่มีการทดสอบไว้ ซึ่งค่าคุณสมบัติของดินเหล่านี้ถูกประมาณขึ้นจากการใช้สมการความสัมพันธ์กับข้อมูลคุณสมบัติอื่น ๆ ที่มีอยู่แล้ว เป็นผลให้ผลการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนแฝงอยู่ด้วย ซึ่งหากต้องการจำลองสภาพลุ่มน้ำในเชิงลึกทั้งในแง่ของเวลาและขนาดพื้นที่ที่มีความละเอียดมาก การเตรียมข้อมูลพื้นฐานดังกล่าวจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการใช้งานแบบจำลองในลักษณะเดียวกันนี้ อันจะส่งผลให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาครั้งนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่อง การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำท่าในกลุ่มน้ำห้วยหลวงและผลกระทบต่อปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำห้วยหลวงจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ภายใต้ชุดโครงการ การปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สัญญาเลขที่ RDG5830001 คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณกรมชลประทาน กรมพัฒนาที่ดิน และกรม

อุตุนิยมวิทยา ที่ให้การสนับสนุนข้อมูล และบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกในทุก ๆ ด้าน และขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้งสามท่านเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ทำให้บทความนี้มีความสมบูรณ์และมีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- (1) Arnold J. G., R. Srinivasan R., Muttiah R. S., and Williams J. R., 1998. Large-area Hydrologic Modeling and Assessment: Part I. Model development. J. American Water Resour. Assoc., 34(1): 73-89.
- (2) Neitsch S. L., J. G. Arnold, Kiniry J. R., Srinivasan R., and Williams J. R., 2009. Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation, Version 2009. Temple, Tex.: USDA Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station.
- (3) Cruise J.F., Limaye A.S., and Al-Abed N., 1999. Assessment of Impacts of Climate Change on Water Quality in the Southeastern United States, Journal of the American Water Resources Association, 35(6), 1539-1550.
- (4) Shrestha B., Babel M. S., Maskey S., van Griensven A., Uhlenbrook S., Green A., & Akkharath I, 2013. Impact of Climate Change on Sediment Yield in The Mekong River Basin: A Case Study of The Nam Ou Basin, Lao PDR. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17(1), 1-20.
- (5) Babel M.S., Shrestha B.m Perret S.R., 2011. Hydrological Impact of Biofuel Production: A Case Study of The Khlong Phlo Watershed in Thailand. Agricultural Water Management, 101, 8-26.
- (6) โอฟาร์ เวศอุโร, 2548. ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินต่อน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำน่านตอนบน โดยใช้แบบจำลองทางอุทกวิทยา SWAT. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- (7) ศรายุทธ วงษาศรี, 2554. การประเมินปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำพอง จังหวัดหนองบัวลำภู โดยใช้แบบจำลอง SWAT. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- (8) ปิยะวัฒน์ วุฒิชัยกิจเจริญ และ เจริญ สารตัน, 2556. การประเมินปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำแม่แจ่มโดยใช้แบบจำลอง SWAT, เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมแหล่งน้ำแห่งชาติ ครั้งที่ 5, บทความที่ 128.
- (9) ปิยะวัฒน์ วุฒิชัยกิจเจริญ และ นรินทร์ แก้วพิน, 2557. การประเมินปริมาณตะกอนแขวนลอยในลุ่มน้ำแม่แจ่มโดยใช้แบบจำลอง SWAT, เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19, บทความที่ 5.
- (10) CARD, 2014. SWAT Literature Database for Peer-Reviewed Journal Articles, Center for Agricultural and Rural Development, IOWA State University (Online) https://www.card.iastate.edu/swat_articles/index.aspx
- (11) จริยา จิติเวศน์ และ พนมศักดิ์ พรหมบุรมย์, 2556. การประเมินและวิเคราะห์แนวโน้มความเสี่ยงของพื้นที่ศึกษานำร่องในบริบทของจังหวัดต่อสภาพอากาศแปรปรวนและการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศเพื่อจัดทำกรอบการศึกษาด้านการปรับตัวต่อภูมิอากาศแบบบูรณาการเชิงพื้นที่แบบองค์รวม. รายงานการวิจัย ชุดโครงการ การปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย.
- (12) ASTER, 2011. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM V2) (Online) <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>
- (13) FAO, 1995. The Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties. CD-ROM, Version 3.5. Rome, Italy.
- (14) Arnold J. G., Kiniry J.R., Srinivasan R., Williams J.R., Haney E.B., Neitsch S.L., 2011. Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation Version 2009, Texas Water

- Resources Institute Technical Report No. 365,
Texas A&M University System College Station,
Texas.
- (15) Abbaspour, K. C., 2014, SWAT-CUP 2012: SWAT
Calibration and Uncertainty Programs - A
User Manual, Eawag: Swiss Federal Institute of
Aquatic Science and Technology, Switzerland.
- (16) Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W.,
Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., 2007.
Model Evaluation Guidelines for Systematic
Quantification of Accuracy in Watershed
Simulations, Transactions of the American
Society of Agricultural and Biological Engineers,
ISSN 0001-2351, 50(3), 885-900.
- (17) Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi,
S., Srinivasan, R., Yang, H., & Klove, B., 2015. A
continental-scale hydrology and water quality
model for Europe: Calibration and uncertainty
of a high-resolution large-scale SWAT model.
Journal of Hydrology, 524, 733-752.