



การศึกษาความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง SWAT ต่อปริมาณน้ำท่า และปริมาณน้ำใต้ดิน: กรณีศึกษาลุ่มน้ำเพชรบุรี

The Study of Parameter Sensitivity of SWAT Model for Runoff and Groundwater: A Case Study of Phetchaburi Basin

วันฉพร แมงสาโม่ง¹, ฮาซัน คอแดะ¹

Wannachaporn Mangsamong¹, Hasan Kodah¹

บทคัดย่อ

แบบจำลอง SWAT เป็นแบบจำลองหนึ่งที่ยอมรับใช้งานสำหรับการประเมินทรัพยากรน้ำ การวางแผน และการจัดการทรัพยากรน้ำในปัจจุบันและอนาคต เนื่องจากเป็นแบบจำลองแบบกระจายค่าพารามิเตอร์ ซึ่งในการนำแบบจำลองมาใช้ ผู้ใช้ต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่การศึกษา โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลอง SWAT ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดิน กรณีศึกษาพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี โดยใช้ดัชนีความอ่อนไหวเป็นตัวกำหนดความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ ผลการศึกษาพบว่าพารามิเตอร์ที่มีค่าดัชนีความอ่อนไหวต่อปริมาณน้ำท่ามากที่สุด 4 อันดับ ได้แก่ ค่า curve number (Cn2) ค่าปริมาณน้ำที่ดินสามารถเก็บไว้ได้ (Sol_Awc) ปัจจัยชดเชยการระเหยจากผิวดิน (Esko) และค่าความสามารถการนำน้ำของดิน (Soil_K) ตามลำดับ และพบว่า พารามิเตอร์ที่มีค่าดัชนีความอ่อนไหวต่อปริมาณน้ำใต้ดินมากที่สุด 5 อันดับ ได้แก่ ค่าปริมาณน้ำที่ดินสามารถเก็บไว้ได้ (Sol_Awc), ความล่าช้าของปริมาณน้ำใต้ดิน (Gw_Delay) ปัจจัยชดเชยการระเหยจากผิวดิน (Esko) ค่าความสามารถการนำน้ำของดิน (Soil_K) และค่า curve number (Cn2) ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองเพื่อนำไปใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่าของพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีได้ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นต่อไป

คำสำคัญ: SWAT ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ ปริมาณน้ำท่า ปริมาณน้ำใต้ดิน ลุ่มน้ำแม่เพชรบุรี

Abstract

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is important for planning and sustainable use of water resources to meet various demands. Since it is a distributed parameter values model, the user must set parameters to suit the studied area. The purpose of this research was to investigate the sensitivity of SWAT model parameters on the runoff and groundwater content. This case study of Phetchaburi Basin used the relative sensitivity index to determine the sensitivity of parameters. The results of this research showed that the top 4 ranking of parameters sensitivity value index to runoff were: 1) the curve number (Cn2), 2) the available water capacity (Sol_Awc), 3) the soil evaporation compensation factor (Esko), and 4) the saturated hydraulic conductivity (Soil_K). While the top 5 ranking of parameters sensitivity value index to groundwater were: 1) the available water capacity of soil (Sol_Awc), 2) the groundwater delay (Gw_Delay), 3) the soil evaporation compensation factor (Esko), 4) the saturated hydraulic conductivity (Soil_K), and 5) the curve number (Cn2). The results of this study could be further used for SWAT mode calibration to simulate runoff in Phetchaburi Basin in the future.

Keywords: SWAT, Parameter sensitivity, Runoff, groundwater, Phetchaburi Basin

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครราชสีมาคริสตจักร

¹ Department of Civil Engineering, Princess of Naradhiwas University



บทนำ

แบบจำลองทางอุทกวิทยา (hydrology model) เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญสำหรับการประเมินทรัพยากรน้ำสำหรับการวางแผนและการจัดการทรัพยากรน้ำในปัจจุบันและอนาคต (Baumgarten & Reichel, 1976) โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองทางอุทกวิทยาได้ถูกพัฒนามาบนพื้นฐานของการเลียนแบบวัฏจักรทางอุทกวิทยา (hydrologic cycle) โดยในอดีตที่ผ่านมาแบบจำลองทางอุทกวิทยาเป็นการจำลองน้ำทำในลักษณะของการรวมและเฉลี่ยค่าพารามิเตอร์ทั้งลุ่มน้ำ แต่ปัจจุบันการใช้ในแบบจำลองทางอุทกวิทยาที่สามารถวิเคราะห์ลุ่มน้ำด้วยลักษณะพารามิเตอร์แบบกระจาย (distributed parameter model) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะสามารถประเมินลุ่มน้ำย่อยต่อเนื่องเป็นโครงข่ายลุ่มน้ำขนาดใหญ่ได้ โดยแบบจำลอง SWAT (Soil and Water Assessment Tool) เป็นแบบจำลองชนิดกึ่งกระจายค่าพารามิเตอร์ สามารถประเมินสภาพลุ่มน้ำที่มีความซับซ้อนทางอุทกวิทยาได้ดี (Neitsch, Arnold, Kiniry & Williams, 2005)

แบบจำลอง SWAT ถูกพัฒนาขึ้นด้วยความร่วมมือกันระหว่าง United States Department of Agriculture (USDA) Agricultural Research Service และ Blackland Research & Extension Center ประเทศสหรัฐอเมริกา (Neitsch et al., 2005) โดยเป็นแบบจำลองอุทกวิทยาระดับลุ่มน้ำ ที่ใช้ในการทำนายผลกระทบของการบริหารจัดการการใช้ที่ดินต่อปริมาณน้ำและคุณภาพน้ำของพื้นที่ลุ่มน้ำตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงลุ่มน้ำที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของสภาพดิน การใช้ที่ดิน และการจัดการโดยสามารถจำลองกระบวนการทางกายภาพต่างๆ ที่เกิดขึ้นในลุ่มน้ำ โดยผู้ใช้สามารถแบ่งลุ่มน้ำที่ต้องการศึกษาออกเป็นลุ่มน้ำย่อยต่างๆ เพื่อให้แต่ละลุ่มน้ำย่อยมีลักษณะการใช้ที่ดิน หรือประเภทดิน ที่คล้ายคลึงหรือแตกต่างกันได้ ซึ่งจะมีผลต่อลักษณะทางอุทกวิทยาของลุ่มน้ำ (Arnold & Fohrer, 2005; Neitsch et al., 2005)

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง เป็นการประเมินความไม่แน่นอน และความเหมาะสมในการปรับแก้พารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งพารามิเตอร์แต่ละตัวจะมีความไวจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันออกไป (Lenhart, Eckhardt, Fohrer, & Frede, 2002; White & Chaubey, 2005) โดยการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลองแสดงให้เห็นถึงว่าพารามิเตอร์ใดมีความสำคัญ และเป็นตัวชี้วัดถึงความอ่อนไหวของแบบจำลองที่มีต่อพารามิเตอร์ในแต่ละตัวที่เกี่ยวข้อง ซึ่งส่งผลต่อการคำนวณผลลัพธ์ของแบบจำลอง เพื่อให้ทราบถึงค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อพื้นที่ศึกษาต่างๆ การศึกษาครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง กรณีศึกษาพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี โดยใช้ดัชนีความอ่อนไหว (the relative sensitivity index) เป็นตัวกำหนดความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ (Khanal & Parajuli, 2014) และได้ใช้เกณฑ์วัดระดับความอ่อนไหวของค่าดัชนี (Lenhart et al., 2002) มาใช้ในการตรวจสอบระดับความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์

วัตถุประสงค์การวิจัย

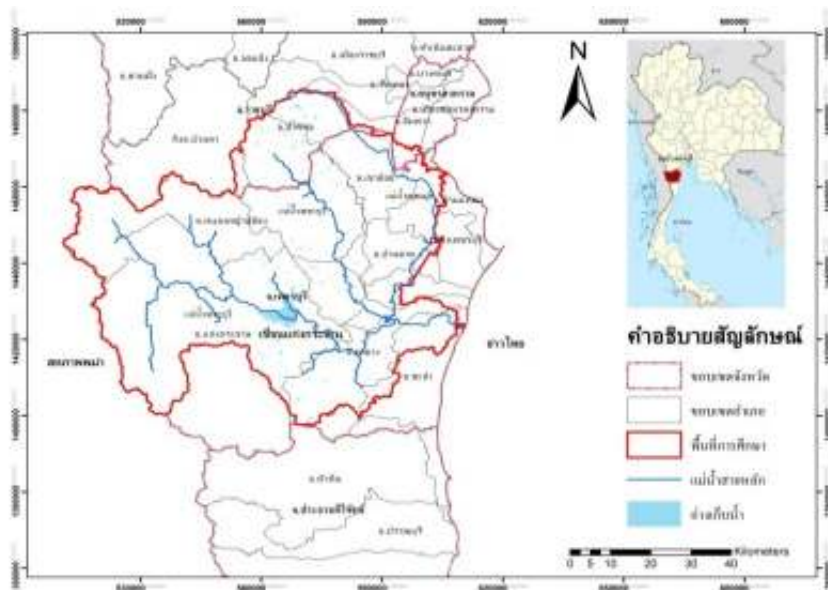
เพื่อประเมินค่าความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลอง SWAT ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำท่า และปริมาณน้ำใต้ดิน กรณีศึกษาพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี ทั้งนี้เพื่อนำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการปรับเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองให้ได้ผลของปริมาณน้ำท่า ในพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น

ระเบียบวิธีวิจัย

1. สภาพทางกายภาพของพื้นที่การศึกษา

ลุ่มน้ำเพชรบุรีมีพื้นที่ลุ่มน้ำประมาณ 5,213.11 ตร.กม. มีทิศเหนือติดกับลุ่มน้ำแม่กลอง ทิศตะวันออกติดกับ อ่าวไทย ถูกแบ่งเป็น 3 ลุ่มน้ำย่อยได้แก่ ลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำเพชรบุรีตอนบน มีความลาดชันมากกว่า 35% ความสูงพื้นที่โดยเฉลี่ย 700 ม. มีพื้นที่ประมาณ 3,508 ตารางกิโลเมตร 2) ลุ่มน้ำสาขาแม่น้ำเพชรบุรีตอนล่าง มีพื้นที่ประมาณ 1,593 ตร.กม. เป็นเขตที่ราบลุ่ม

และ 3) ลุ่มน้ำสาขาห้วยแม่ประจันต์ ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ลาดเชิงเขา มีความลาดชันสูงบริเวณตอนบน และตอนล่างเป็นพื้นที่ราบ มีพื้นที่ประมาณ 1,152 ตร.กม. ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยพื้นที่ส่วนใหญ่ของลุ่มน้ำเพชรบุรีเป็นพื้นที่ป่าไม้ 3,199.18 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 61.37 ของพื้นที่ทั้งลุ่มน้ำ



ภาพที่ 1 ที่ตั้งและสภาพภูมิประเทศของลุ่มน้ำเพชรบุรี

2. แบบจำลอง SWAT

แบบจำลอง SWAT ใช้ข้อมูลที่สำคัญประกอบด้วยข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (landuse data) ข้อมูลดิน (soil data) และข้อมูลสภาพภูมิอากาศ (climate data) ของลุ่มน้ำเพชรบุรี โดยแบบจำลองจะทำการคำนวณปริมาณการไหลจากหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic Response Units: HRUs) ของแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยตามลำดับ ซึ่งใช้สมการสมดุลน้ำมาพิจารณากระบวนการทางอุทกวิทยา ดังสมการที่ (1) (Neitsch et al., 2005)

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

โดยที่ SW_t คือ ปริมาณน้ำในดินสุดท้าย (มม.), SW_0 คือ ปริมาณน้ำในดินเริ่มต้นในวันที่ i (มม.), t คือ เวลา (วัน), Q_{surf} คือ ปริมาณน้ำผิวดินในวันที่ i (มม.), E_a คือ ปริมาณการคายระเหยในวันที่ i (มม.), W_{seep} คือ ปริมาณน้ำไหลซึมลงสู่ชั้นใต้ดินในวันที่ i (มม.), Q_{gw} คือ ปริมาณน้ำใต้ดินที่ไหลกลับสู่ลำน้ำในวันที่ i (มม.) และ R_{day} คือ ปริมาณฝนในวันที่ i (มม.)

การคำนวณปริมาณของน้ำที่ผิวดิน ของแบบจำลอง SWAT วิธีที่นิยมกันใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทย (Pongpetch & Pongpetch, 2013; Suwanlertcharen, 2011) ในการทำนายน้ำที่ผิวดินคือ SCS curve number ดังสมการ (2), (3)

$$Q = \frac{(R - 0.2s)^2}{R + 0.8s}, \quad R > 0.2s \quad (2)$$



$$Q=0.0, \quad R \leq 0.25 \quad (3)$$

เมื่อ Q คือปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายวัน (ลบ.ม./วินาที), R คือปริมาณน้ำฝนรายวัน (มม.), และ S คือปริมาณศักยภาพในการดูดซับน้ำของพื้นที่ (Retention Parameter), ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า CN (Curve number) ดังสมการ (4)

$$S = 254 \cdot \left[\frac{100}{CN} - 1 \right] \quad (4)$$

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่า CN (curve number) คือ คุณสมบัติทางอุทกวิทยาของดิน (hydrologic soil group) สิ่งปกคลุม (land cover) สภาพอุทกวิทยา (hydrologic condition) การจำแนกการใช้ประโยชน์ที่ดิน (land use classification) และเงื่อนไขความชื้นในดินเริ่มต้น (antecedent moisture content: AMC)

3. ข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาจากหน่วยงานต่างๆ

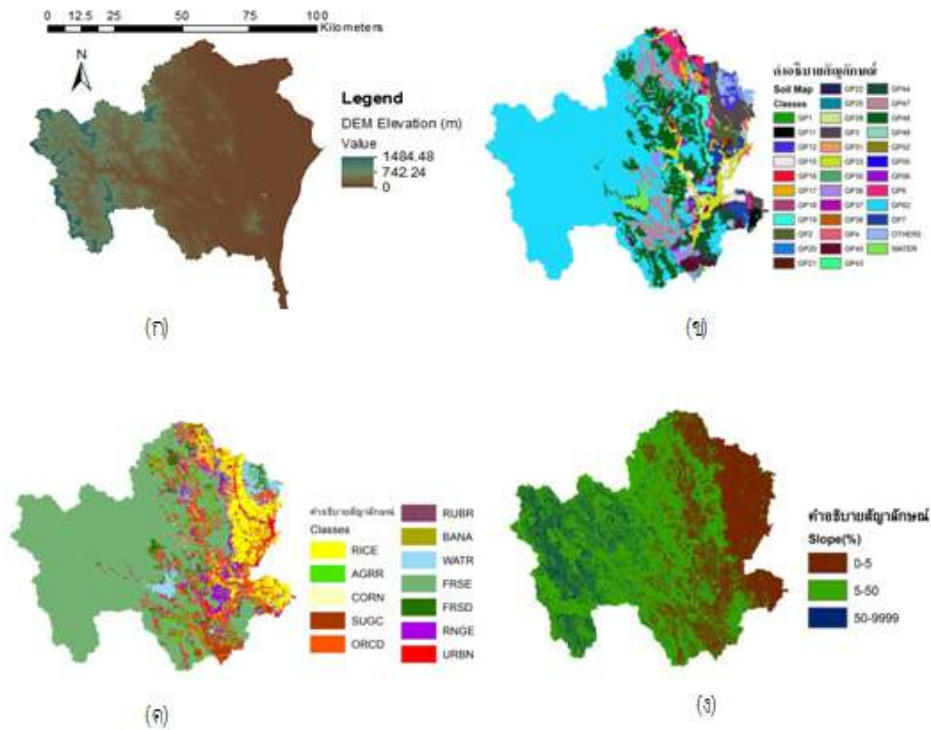
ลำดับ	ข้อมูล	ลักษณะข้อมูล	ที่มา
1	แผนที่ที่ระดับความสูงเชิงตัวเลข	GIS file	กรมแผนที่ทหาร
2	แผนที่กลุ่มชุดดิน	GIS file	กรมพัฒนาที่ดิน
3	แผนที่ใช้ประโยชน์ที่ดิน	GIS file	กรมพัฒนาที่ดิน
4	ตำแหน่งสถานีวัดน้ำฝน	GIS file	กรมอุตุนิยมวิทยา
5	ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า	GIS file	กรมอุตุนิยมวิทยา
6	ตำแหน่งสถานีวัดภูมิอากาศ	GIS file	กรมอุตุนิยมวิทยา
7	ข้อมูลปริมาณน้ำท่า	ข้อมูลตาราง	กรมชลประทาน
8	ข้อมูลปริมาณน้ำฝน	ข้อมูลตาราง	กรมอุตุนิยมวิทยา และกรมชลประทาน

จากตารางที่ 1 ข้อมูลแผนที่ที่ระดับความสูงเชิงตัวเลข (digital elevation model) คือแบบจำลองระดับความสูงเชิงตัวเลขชนิดแรสเตอร์ (raster) แสดงดังภาพที่ 2 (ก) ซึ่งเป็นข้อมูลที่แสดงถึงลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ลุ่มน้ำ และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับใช้สร้างแบบจำลอง SWAT โดยใช้ในการจำลองสภาพทางกายภาพโดยทั่วไปของพื้นที่ลุ่มน้ำจากแบบจำลอง เช่น ความลาดชันของพื้นที่ ขอบเขตสันปันน้ำเพื่อกำหนดพื้นที่รับน้ำ เป็นต้น ขนาดของพื้นที่ที่กำหนดด้วย pixel ซึ่งมีขนาด 30 เมตร x 30 เมตร ระบบอ้างอิงทางภูมิศาสตร์คือ WGS 1984 UTM Zone 47N

แผนที่กลุ่มชุดดิน ได้รวบรวมข้อมูลจากแผนที่กลุ่มชุดดินของกรมพัฒนาที่ดิน มาตรฐาน 1:50,000 ที่ศึกษาคุณสมบัติของดิน และการกระจายตัวของดินชุดต่าง ๆ ในพื้นที่การศึกษา ซึ่งกรมพัฒนาที่ดินได้จัดทำชุดดินในประเทศไทยออกเป็น 62 กลุ่มดิน (soil group) โดยพบว่าข้อมูลชุดดินพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรีมี 34 กลุ่มชุดดิน แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 2 (ข) และแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินใน ปีพ.ศ. 2552 มาตรฐาน 1:50,000 พบว่ามีประเภทการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมด 10 ประเภท ได้แก่ ข้าว, ข้าวโพด, อ้อย, ไม้ผล, ยางพารา, กล้วย, ป่าไม้, พืชไร่, พื้นที่แหล่งน้ำ และพื้นที่ชุมชนเมือง แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 2 (ค)

ข้อมูลสภาพภูมิอากาศของพื้นที่การศึกษาได้ทำการรวบรวมข้อมูลสถิติภูมิอากาศ จากกรมอุตุนิยมวิทยา และกรมชลประทาน โดยอาศัยข้อมูลจากสถานีตรวจวัดอากาศอัตโนมัติที่กระจายอยู่ในพื้นที่การศึกษา และบริเวณข้างเคียง เป็นข้อมูลที่เก็บบันทึกเป็นตัวเลขชนิดรายวัน (daily) ประกอบด้วย ข้อมูลปริมาณน้ำฝน (precipitation) ได้จากสถานีวัดน้ำฝน 6 สถานี

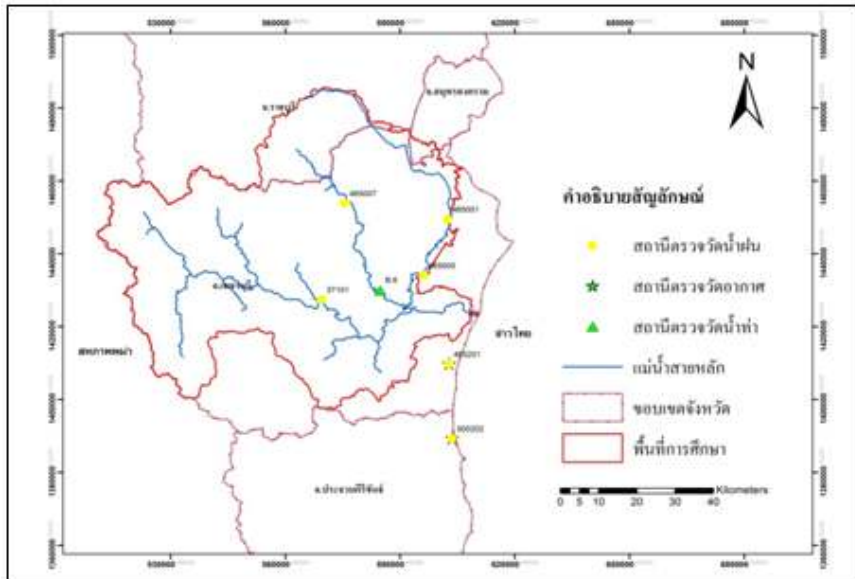
ซึ่งมีรายละเอียดชื่อสถานี รหัสสถานี ตำแหน่งพิกัด X,Y และปีของข้อมูล แสดงดังตารางที่ 2 และข้อมูลอุณหภูมิ (temperature) สูงสุดและต่ำสุด ได้จากสถานีตรวจอากาศ 2 สถานี คือ สถานีตรวจอากาศหัวหิน (500202) และสถานีตรวจอากาศเพชรบุรี (465201) แสดงตำแหน่งที่ตั้งสถานีตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 Digital elevation model (ก), ลักษณะกลุ่มชุดดิน (ข), การใช้ประโยชน์ที่ดิน (ค) และความลาดชัน (ง) ของพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี จากแบบจำลอง SWAT

ตารางที่ 2 รายละเอียดสถานีวัดน้ำฝน บริเวณลุ่มน้ำเพชรบุรี ที่ใช้ข้อมูลในการศึกษา

ชื่อสถานี	รหัสสถานี	พิกัด X,Y	ปีของข้อมูล
สำนักงานเกษตร จ.เพชรบุรี	465001	602391,1449614	1989-2013
สำนักงานเกษตร อ.ท่ายาง	465005	596213,1434208	1989-2013
ที่ว่าการอำเภอหนองหญ้าปล้อง	465007	575520,1454016	1989-2013
สถานีตรวจอากาศเพชรบุรี	465021	602777,1409869	1989-2013
สถานีตรวจอากาศหัวหิน	500202	603590,1389417	1989-2013
ตะเคียนห้าบาท อ.ท่ายาง	37101	568750,1465676	1989-2013



ภาพที่ 3 ตำแหน่งสถานีวิัดน้ำฝนและสถานีวิัดน้ำท่าที่กระจายอยู่บริเวณลุ่มน้ำเพชรบุรี จากแบบจำลอง SWAT

ข้อมูลปริมาณน้ำท่า (observed runoff) จากสถานีวิัดน้ำท่าที่กระจายอยู่ในพื้นที่การศึกษา มีความความจำกัอย่างมาก เนื่องจากการเก็บรวบรวมข้อมูลแบบรายวัน และต่อเนื่องแบบอนุกรมเวลา (time series) มีอย่างจำกัด รายละเอียดช่วงสถิติข้อมูล ของสถานีวิัดน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา แสดงข้อมูลดังตารางที่ 3 และแสดงตำแหน่งที่ตั้งดังภาพที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดช่วงสถิติข้อมูล ของสถานีวิัดน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา

ชื่อสถานี	รหัสสถานี	พิกัด X,Y	ปีของข้อมูล
สะพานรยยนต์ (HuaiMea Prachan at Highway Bridge)	B.6	584774,1429958	1989-1997 2000-2004 2006-2009

โดยจากข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษา จะเริ่มจากการนำข้อมูลลักษณะทางกายภาพของลุ่มน้ำในแบบจำลอง SWAT จากนั้นทำการกำหนดพื้นที่ลุ่มน้ำ ตามข้อมูลแผนที่ที่ระดับความสูงเชิงตัวเลข แล้วทำการนำเข้าข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน กลุ่มชุดดิน และกำหนดเกณฑ์ความลาดชันของพื้นที่ โดยกำหนดและปรับค่าขึ้นความลาดชันจากกรมพัฒนาที่ดิน (2545) ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ระดับขึ้นความลาดชัน ได้แก่ 1) ร้อยละ 0-5 (ราบเรียบถึงลาดชันเล็กน้อย) 2) ร้อยละ 5-50 (ลาดชันเล็กน้อยถึงสูงชัน) 3) มากกว่าร้อยละ 50 (สูงชันมากถึงมากที่สุด) แสดงดังภาพที่ 2 (ง) จากนั้นทำการกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic Response Unit) ซึ่งจะถูกแบ่งตามกลุ่มพื้นที่ย่อยที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดิน, กลุ่มชุดดิน และความลาดชันของพื้นที่ที่คล้ายคลึงกัน ขั้นตอนสุดท้ายคือการนำข้อมูลอุตุนิยมวิทยา เช่น ข้อมูลปริมาณน้ำฝน และข้อมูลสภาพภูมิอากาศอื่นๆ ตามลำดับ (Suwanlertcharen, 2011)

4. วิเคราะห์ความอ่อนไหว (Sensitivity Analysis) ของค่าพารามิเตอร์ต่อปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดิน

การวิเคราะห์ความอ่อนไหวค่าพารามิเตอร์ (Sensitivity Analysis) เป็นขั้นตอนหลังจากมีการนำเข้าข้อมูลและคำนวณปริมาณน้ำท่าเสร็จสิ้นแล้ว แบบจำลอง SWAT มีค่าพารามิเตอร์จำนวนมาก การศึกษาจึงได้เลือกพารามิเตอร์

ทั้งหมด 8 ตัวประกอบด้วย Initial curve number (II) value (Cn2), Available water capacity (Sol_Awc), Soil evaporation compensation factor (Esco), Thershold water depth in the shallow aquifer for flow (Gwqmn), Groundwater 'revap' cofficient (Gw_Revap), Saturated hydraulic conductivity (Soil_K), Groundwater delay (Gw_Delay) และBaseflow alpha factor (Alpha_Bf) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4 โดยการเลือกพารามิเตอร์แต่ละตัวได้ศึกษาจากคู่มือพื้นฐานของแบบจำลอง SWAT และเป็นพารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวต่อการคำนวณปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำ (Suwanlertcharen, 2011) โดยหลังจากวิเคราะห์ความอ่อนไหว จะทำให้ทราบว่าควรปรับค่าพารามิเตอร์ตัวใดบ้างเพื่อให้แบบจำลองทำการคำนวณปริมาณน้ำท่าให้ได้ค่าใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงมากที่สุด

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ใน SWAT

อันดับ	พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ชนิดไฟล์
1	Cn2	ค่าสัมประสิทธิ์ในลำน้ำที่ความชันในดินระดับที่สอง (Initial curve number (II) value)	.Mgt
2	Sol_Awc	ค่าปริมาณน้ำที่ดินสามารถเก็บไว้ได้ Available water capacity [(mm water) (mmsoil)-1]	.Soil
3	Esco	ค่าชดเชยจากการระเหยของน้ำในดิน (Soil evaporation compensation factor)	.hru
4	Gwqmn	ค่าระดับความลึกเริ่มต้นในการไหลของชั้นให้น้ำใต้ดินระดับตื้น (Thershold water depth in the shallow aquifer for flow [mm])	.gw
5	Gw_Revap	ค่าสัมประสิทธิ์น้ำใต้ดินที่ไหลออกจากชั้น shallow aquifer ไปสู่ชั้นเขตรากพืช (Groundwater 'revap' coefficient)	.gw
6	Soil_K	ค่าความสามารถนำน้ำของดิน (Saturated hydraulic conductivity [mmh-1])	.soil
7	Gw_Delay	ค่าการหน่วงเวลาการไหลของน้ำใต้ดิน Groundwater delay [days]	.gw
8	Alpha_Bf	ค่าตัวแปรที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงการไหลพื้นฐานในชั้นให้น้ำใต้ดิน Baseflow alpha factor [days]	.gw

การศึกษานี้ได้ใช้วิธีประเมินความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลอง SWAT ต่อปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดิน โดยใช้ดัชนีความอ่อนไหว (The relative sensitivity index) ดังสมการที่ 5 เป็นตัวกำหนดความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ (Khanal & Parajuli, 2014) และได้ใช้เกณฑ์วัดระดับความอ่อนไหวของค่าดัชนีดังตารางที่ 5

$$S_r = \frac{P_b}{R_b} \cdot \left(\frac{R - R_b}{P - P_b} \right) \quad (5)$$

โดย S_r คือ ดัชนีความอ่อนไหว (Relative sensitivity index)
 R คือ ผลปริมาณน้ำท่า/ปริมาณน้ำใต้ดิน
 P คือ ค่าพารามิเตอร์
 b คือ ค่าพื้นฐาน



ตารางที่ 5 อธิบายช่วงระดับความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ (Sensitivity class)

ลำดับ	ค่าดัชนีความอ่อนไหว (S _i)	ระดับความอ่อนไหว
1	0.00-0.05	ไม่มี
2	0.05-0.20	ต่ำ
3	0.20-1.00	ปานกลาง
4	>1.00	สูง

ที่มา: Lenhart et al. (2002)

5. การปรับเทียบ (Calibration) และตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Validation)

เมื่อคำนวณปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลองแล้ว ต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยการนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำท่าที่วัดได้จริงจากสถานีตรวจวัด เพื่อให้กราฟน้ำท่าที่คำนวณได้มีความสัมพันธ์หรือเข้ากันได้มากที่สุดกับกราฟน้ำท่าที่ได้จากข้อมูลของสถานีตรวจวัด (Neitsch et al., 2005) โดยการตรวจสอบความมั่นใจในแบบจำลองมีหลายหนทางด้วยกัน โดยหลักการช่วงแรกๆ ซึ่งอย่างน้อยประมาณ 3-5 ปี (Thangtham, 2004) ในการศึกษาจะตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R²) และค่า Nash-Sutcliffe Efficiency (E_{ns}) ดังสมการที่ (6) และ (7) โดยใช้ข้อมูลการน้ำท่าที่สถานีตรวจวัด B.6 ในช่วงปี 2544-2546 ในการปรับเทียบแบบจำลอง และใช้ข้อมูลน้ำท่าปี 2549 ในการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

$$R^2 = \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{avg}) \sum_{i=1}^n (P_i - P_{avg})}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{avg})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_{avg})^2 \right]^{0.5}} \right)^2}{(6)}$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{avg})^2} \quad (7)$$

โดยที่ i เท่ากับ ลำดับที่ของข้อมูล, n เท่ากับ จำนวนข้อมูลทั้งหมด, Q คือ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด, Q_{avg} คือ ค่าเฉลี่ยข้อมูลจากการตรวจวัด, P_i ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง, P_{avg} ค่าเฉลี่ยข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง

ผลการวิจัย

1. ผลการกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำ

การกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRU Definition) ของพื้นที่ลุ่มน้ำ เป็นการกำหนดรายละเอียดของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยสามารถมีลักษณะทางอุทกวิทยาของพื้นที่ที่มีความหลากหลายตามชนิดดิน ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน และความลาดชันของพื้นที่ลุ่มน้ำ โดยการศึกษาในครั้งนี้ได้กำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRU Definition) ในแต่ละลุ่มน้ำย่อยให้มี HRUs สอดคล้องกันตามสัดส่วนการใช้ประโยชน์ที่ดิน ชนิดดิน และความลาดชัน โดยได้กำหนดร้อยละการใช้ประโยชน์ของที่ดิน (land use percentage over subbasin area) เท่ากับร้อยละ 5 กำหนดร้อยละข้อมูลชนิดของดิน (soil class percentage over subbasin area) เท่ากับร้อยละ 20 และกำหนดร้อยละความลาดชันของพื้นที่ (slope class percentage over subbasin area) เท่ากับร้อยละ 20, (Suwanlertcharen, 2011) ผลจากการกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา ทำให้ได้หน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำเพชรบุรี ทั้งหมดจำนวน 108 HRUs

2. ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง

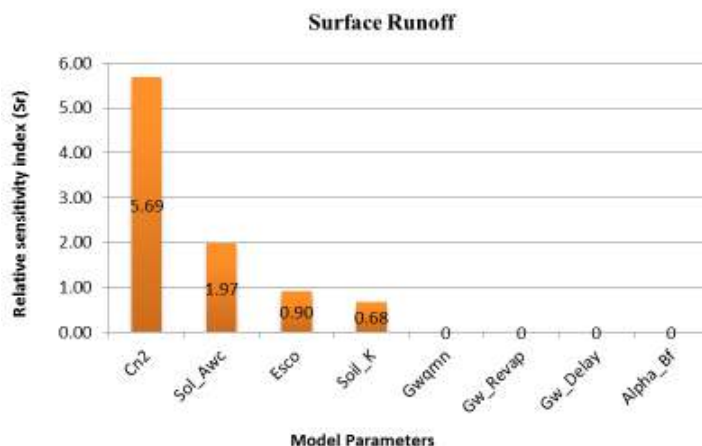
การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง ทั้งในส่วนของพารามิเตอร์ที่สำคัญของปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดิน แสดงค่าพารามิเตอร์และช่วงที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 6 โดยค่าที่นำไปใช้ได้จากการปรับค่าพารามิเตอร์ทีละตัว เริ่มจากการปรับเพิ่มและปรับลดค่าพารามิเตอร์ตามช่วงที่กำหนดไว้ได้ (Suwanlertcharen, 2011) โดยที่ตัวพารามิเตอร์อื่นๆ คงที่ จากนั้นทำการคำนวณแบบจำลองเพื่อดูผลปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดินที่เกิดขึ้น ทำไปจนกระทั่งครบทั้ง 8 พารามิเตอร์ที่ศึกษา ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมสุดท้ายจะถูกนำมาใช้ในการกระบวนการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองต่อไป

ตารางที่ 6 ช่วงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความอ่อนไหว สำหรับปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดิน

ลำดับ	พารามิเตอร์	ค่าเริ่มต้น	ช่วงที่กำหนดได้	ค่าที่นำไปใช้
1	Cn2	V	±25%	-25%
2	Sol_Awc	V	±25%	-6%
3	Esco	0.95	0-1	0.807
4	Gwqmn	1000	0-5000	1.347
5	Gw_Revap	0.02	0.02-0.2	0.119
6	Soil_K	V	±25%	-23%
7	Gw_Delay	31	0-500	305.739
8	Alpha_Bf	0.01	0-1	0.456

หมายเหตุ: V = ค่าพารามิเตอร์แปรผันไปตามปัจจัยแต่ละชนิดในแบบจำลอง

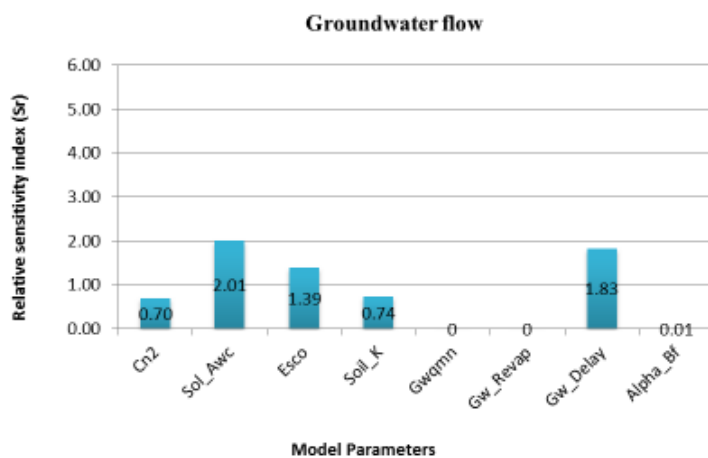
การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ ที่สำคัญต่อปริมาณน้ำท่า และปริมาณน้ำใต้ดิน โดยใช้ดัชนีความอ่อนไหว (the relative sensitivity index) ดังสมการที่ 5 แสดงผลดังภาพที่ 4 และ ภาพที่ 5 ตามลำดับ



ภาพที่ 4 กราฟแสดงความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ ที่สำคัญต่อปริมาณน้ำท่า โดยใช้ความสัมพันธ์ดัชนีความอ่อนไหว



จากภาพที่ 4 พบว่า พารามิเตอร์ที่มีค่าดัชนีความอ่อนไหว สำหรับปริมาณน้ำท่ามากที่สุด ได้แก่ ค่า curve number (Cn2) เท่ากับ 5.69 เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์ในลำน้ำโดยตรง จึงส่งผลต่อปริมาณน้ำท่ามากที่สุด และพารามิเตอร์ที่มีค่าดัชนีความอ่อนไหวต่อปริมาณน้ำท่ารองลงมา ได้แก่ ค่าปริมาณน้ำที่ดินสามารถเก็บไว้ได้ (Sol_Awc) เท่ากับ 1.97, ปัจจัยชดเชยการระเหยจากผิวดิน (Esco) เท่ากับ 0.90 และค่าความสามารถการนำน้ำของดิน (Soil_K) เท่ากับ 0.68 ตามลำดับ และพารามิเตอร์ที่ไม่ส่งผลหรือส่งผลน้อยมากต่อปริมาณน้ำท่าได้แก่ ค่าระดับความลึกเริ่มต้นในการไหลของชั้นให้น้ำใต้ดินระดับตื้น (Gwqmn), ค่าสัมประสิทธิ์น้ำใต้ดินที่ไหลออกจากชั้น shallow aquifer ไปสู่ชั้นเขตรากพืช (Gw_Revap), การหน่วงเวลาการไหลของน้ำใต้ดิน (Gw_Delay) และค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงการไหลพื้นฐานในชั้นให้น้ำใต้ดิน (Alpha_Bf) เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวไม่มีผลต่อการคำนวณปริมาณน้ำท่าในแบบจำลอง SWAT



ภาพที่ 5 กราฟแสดงความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ ที่สำคัญต่อปริมาณน้ำใต้ดิน โดยใช้ความสัมพันธ์ดัชนีความอ่อนไหว

จากภาพที่ 5 พบว่า พารามิเตอร์ที่มีค่าดัชนีความอ่อนไหวสำหรับปริมาณน้ำใต้ดินมากที่สุด ได้แก่ ค่าปริมาณน้ำที่ดินสามารถเก็บไว้ได้ (Sol_Awc) เท่ากับ 2.01, เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำที่ดินสามารถเก็บไว้ได้ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำใต้ดิน และพารามิเตอร์ที่มีค่าดัชนีความอ่อนไหวต่อปริมาณน้ำใต้ดินรองลงมา ได้แก่ ความล่าช้าของปริมาณน้ำใต้ดิน (Gw_Delay) เท่ากับ 1.83, ปัจจัยชดเชยการระเหยจากผิวดิน (Esco) เท่ากับ 1.39, ค่าความสามารถการนำน้ำของดิน (Soil_K) เท่ากับ 0.74 และค่า curve number (Cn2) เท่ากับ 0.70 ตามลำดับ และพารามิเตอร์ค่าระดับความลึกเริ่มต้นในการไหลของชั้นให้น้ำใต้ดินระดับตื้น (Gwqmn) ไม่ส่งผลต่อการคำนวณปริมาณน้ำใต้ดิน เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับน้ำใต้ดินในระดับตื้นเท่านั้น, ค่าสัมประสิทธิ์น้ำใต้ดินที่ไหลออกจากชั้น shallow aquifer ไปสู่ชั้นเขตรากพืช (Gw_Revap) และค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงการไหลพื้นฐานในชั้นให้น้ำใต้ดิน (Alpha_Bf) ไม่ส่งผลหรือส่งผลน้อยมากต่อการคำนวณปริมาณน้ำใต้ดินในแบบจำลอง เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวมีช่วงความถี่ในการปรับน้อยจึงทำให้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำใต้ดินน้อยมาก

3. ผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง SWAT

การเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าแบบจำลอง SWAT ในการศึกษาใช้ข้อมูลการตรวจวัดน้ำท่าที่สถานีตรวจวัด สะพานรถยนต์ (HuaiMea Prachan at Highway Bridge); B.6 ช่วงปี 2544-2546 ในการปรับเทียบแบบจำลอง (Calibration) และใช้ข้อมูลตรวจวัดน้ำท่าปี 2549 ในการตรวจพิสูจน์แบบจำลอง (Validation) ผลการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

จากการคำนวณแบบจำลองซ้ำหลายครั้ง โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ จากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำท่า จนได้ชุดพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด 1 ชุด แสดงผลการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองของปริมาณน้ำท่าค่า Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (E_{ns}) อยู่ระหว่าง 0.468-0.499 ถือได้ว่าการคาดการณ์อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ (Satisfactory prediction), (Suwanlertcharen, 2011) แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ผลการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลองของปริมาณน้ำท่า

ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง	เกณฑ์การวัด	
	R^2	Nash
ปี 2544-2546 (Calibration)	0.511	0.492
ปี 2549 (Validation)	0.595	0.468

อภิปรายผล

จากการศึกษาครั้งนี้ ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลอง SWAT ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดิน กรณีศึกษาลุ่มน้ำเพชรบุรี สามารถสรุประดับความอ่อนไหวของพารามิเตอร์จากเกณฑ์วัดระดับความอ่อนไหวดังตารางที่ 2 ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ระดับความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ต่อปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดิน

ลำดับ	พารามิเตอร์	ระดับความอ่อนไหว	
		ปริมาณน้ำท่า	ปริมาณน้ำใต้ดิน
1	Cn2	สูง	ปานกลาง
2	Sol_Awc	สูง	สูง
3	Esco	ปานกลาง	สูง
4	Soil_K	ปานกลาง	ปานกลาง
5	Gwqmn	ไม่มี	ไม่มี
6	Gw_Revap	ไม่มี	ไม่มี
7	Gw_Delay	ไม่มี	สูง
8	Alpha_Bf	ไม่มี	ไม่มี

จากตารางที่ 8 พบว่า พารามิเตอร์ที่มีระดับความอ่อนไหวต่อปริมาณน้ำท่าสูง ได้แก่ 1) Cn2 เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ Cn2 เป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การไหลในลำน้ำ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการคำนวณปริมาณน้ำท่า และ 2) Sol_Awc เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ Sol_Awc เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณน้ำที่ดินสามารถเก็บไว้ได้ ซึ่งหากกำหนดค่า Sol_Awc น้อยก็จะส่งผลให้ปริมาณน้ำท่าเพิ่มมากขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับชนิดดินหรือการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่บริเวณนั้นๆ (Thangtham, 2004)

พารามิเตอร์ที่มีระดับความอ่อนไหวต่อปริมาณน้ำท่าในช่วงระดับปานกลางถึงระดับสูง ได้แก่ Cn2, Sol_Awc, Esco และ Soil_K ทั้งนี้เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์ในลำน้ำและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำในดินจึงส่งผลต่อกระบวนการเกิดปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำได้โดยตรง



และจากตารางที่ 8 พบว่าพารามิเตอร์ที่มีระดับความอ่อนไหวต่อปริมาณน้ำใต้ดินสูงได้แก่ 1) Sol_Awc เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ Sol_Awc เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณน้ำที่ดินสามารถเก็บไว้ได้ ซึ่งหากกำหนดค่า Sol_Awc มากก็จะมีโอกาสส่งผลให้ปริมาณน้ำใต้ดินมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของดินในพื้นที่บริเวณนั้นๆ (Thangtham, 2004) 2) Esco เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ Esco แสดงถึงค่าดเชยจากการระเหยของน้ำในดิน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการเกิดปริมาณน้ำใต้ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำ และ 3) Gw_Delay เนื่องจากเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหน่วงเวลาการไหลของน้ำใต้ดิน จึงส่งผลโดยตรงต่อการคำนวณปริมาณน้ำใต้ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำ

พารามิเตอร์ที่มีระดับความอ่อนไหวปริมาณน้ำใต้ดินในช่วงระดับปานกลางถึงระดับสูง ได้แก่ Cn2, Sol_Awc, Esco, Soil_K และ Gw_Delay ทั้งนี้เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์ในลำน้ำปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำในดิน และเวลาหน่วงของการเดินทางของน้ำใต้ดิน จึงส่งผลกระทบต่อตรงต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณน้ำใต้ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำ

ดังนั้น จาก 8 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาความอ่อนไหวต่อปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดิน พบว่าพารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวสูงต่อการปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดินทั้งสองส่วน ได้แก่ Sol_Awc ทั้งนี้เนื่องจากค่าดังกล่าวเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำในดิน ซึ่งเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับกระบวนการเกิดปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดินได้ทั้งสองส่วน

สรุป

จากผลการศึกษาความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง SWAT ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดิน ซึ่งประกอบไปด้วย Cn2, Sol_Awc, Esco, Gw_Delay, Soil_K, Gwqmn, Gw_Revap และ Alpha_Bf พบว่าค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวมีความอ่อนไหวในระดับที่แตกต่างกันไป โดยจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์แต่ละชนิดว่าเป็นค่าที่สำคัญต่อการคำนวณกระบวนการเกิดปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดินมากน้อยเพียงใดและพบว่าการกำหนดค่าพารามิเตอร์ Sol_Awc ในแบบจำลองส่งผลต่อการคำนวณทั้งปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดิน อย่างมีนัยสำคัญ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นในการคำนวณปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดินก็ไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองเพียงอย่างเดียว ยังขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ การใช้ประโยชน์ที่ดิน คุณสมบัติทางอุทกวิทยาของดิน การกำหนดหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (HRUs) และปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการกระบวนการเกิดปริมาณน้ำท่าและปริมาณน้ำใต้ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำอีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

การศึกษาความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลอง SWAT จากผลที่ได้จากการศึกษาเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่าสำหรับพื้นที่กรณีศึกษา (ลุ่มน้ำเพชรบุรี) เท่านั้น หากต้องการต้องการนำผลศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้กับลุ่มน้ำอื่นๆ ควรพิจารณาลุ่มน้ำที่มีสภาพทางกายภาพของพื้นที่ลุ่มน้ำใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากพารามิเตอร์แต่ละพื้นที่ที่ศึกษามีความแตกต่างกันออกไปจากสภาพทางกายภาพที่แตกต่างกัน

รายการอ้างอิง (Reference)

- Arnold, J.G. & Fohrer, N. (2005). SWAT2000: Current Capabilities and Research Opportunities in Applied Watershed Modeling. *Hydrological Processes*, 19(3), 563-572.
- Baumgartner, A. & Reichel, E. (1976). Climate and energy exchange in the Gulf of Aqaba (Eilat). *Monthly Weather Review*, 104(1), 381-358



- Khanal, S. & Parajuli, P.B. (2014). Sensitivity Analysis and Evaluation of Forest Biomass Production Potential Using SWAT Model. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 4(1), 136-147.
- Lenhart, T., Eckhardt, K., Fohrer, N., & Frede, H.G. (2002). Comparison of Two Different Approaches of Sensitivity Analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27(9), 645-654.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry J.R. & Williams, J.R. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation (Version 2005)*. Retrieved January 20, 2012, from :<http://swatmodel.tamu.edu/media/1292/SWAT2005theory.pdf>
- Pongpetch, N. & Pongpetch, S. (2013). Simulation of Stream Flow for Upper Lam Takongsub-Watershed Using SWAT Model. *International Journal of Environmental Science and Development*, 4(3), 261-263
- Thangtham, N. (2004). *Hydrographic soil*. Bangkok, Thailand: Kasetsart University.
- Suwanlertcharen, T. (2011). *Application of the SWAT Model to Evaluate Runoff and Suspended Sediment from a Small Watershed: A Case Study of Mae Phun Subwatershed, Laplae District, Uttaradit Province*. Master's thesis. Kasetsart University. (in Thai).
- White, K.L. & Chaubey, I. (2005). Sensitivity Analysis, Calibration, and Validations for a Multisite and Multivariable SWAT Model. *Journal of the American Water Resources Association*, 5(1), 1077-1089.