

การเปรียบเทียบประสิทธิผลของแบบจำลอง SENSWAT-URBS และ FLEXL ในการประเมินน้ำท่า

Comparison the effectiveness of SENSWAT-URBS and FLEXL models in runoff estimation

สุนันท์ พุกเที่ยง^{1*} และ นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์²

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร

E-mail address: g5714501900@ku.ac.th

บทคัดย่อ

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการสนับสนุนการจำลองแบบของระบบการจัดการทรัพยากรน้ำทั้งในสภาพอดีตรวมทั้งสถานการณ์ในอนาคต อย่างไรก็ตาม แบบจำลองส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ที่ให้ผลการประเมินน้ำท่าเฉพาะตำแหน่งที่สถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลองซึ่งเป็นการจำกัดประโยชน์การใช้งานของผลการประเมินน้ำท่า ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลอง URBS ซึ่งเป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ประเภทกึ่งกระจายตัวซึ่งจะให้ผลการประเมินน้ำท่าทุกตำแหน่งที่ต้องการในลุ่มน้ำที่พิจารณา ในการศึกษาครั้งนี้ ได้นำแบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่ถูกเขียนขึ้นใหม่โดยโปรแกรม MATLAB และถูกพัฒนาเพิ่มเติมให้สามารถสอบเทียบแบบจำลองได้โดยอัตโนมัติโดยนักวิจัยภายใต้ศูนย์วิจัย SENSWAT มาใช้ประเมินน้ำท่าที่สถานีตรวจวัดในลุ่มน้ำชีที่สถานี E.21 ซึ่งมีพื้นที่รับน้ำ 8,340 ตารางกิโลเมตร ผลการสอบเทียบเหตุการณ์น้ำท่าในช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ. 2546-2556 พบว่า ค่า NSE เท่ากับ 0.81 นอกจากนั้นแล้ว แบบจำลอง SENSWAT-URBS ยังให้ผลการประเมินน้ำท่าสำหรับทุกลุ่มน้ำสาขาของ E.21 รวมทั้งที่ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23 และ E.6C โดยเมื่อมาเปรียบเทียบกับข้อมูลตรวจวัดพบว่า ค่า NSE เท่ากับ 0.68, 0.77, 0.82 และ 0.56 ตามลำดับ จากนั้นจึงนำแบบจำลอง FLEX_L ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ที่สามารถสอบเทียบแบบจำลองได้โดยอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม MOSCEM มาทำการสอบเทียบที่สถานี E.21 รวมทั้งอีก 4 สถานี ที่เป็นลุ่มน้ำสาขาของ E.21 ดังกล่าว พบว่า ค่า NSE เท่ากับ 0.86, 0.82, 0.85, 0.80 และ 0.71 ตามลำดับ ผลการศึกษาแสดงความมีประสิทธิภาพของแบบจำลอง SENSWAT-URBS โดยให้ค่า NSE ที่ต่ำกว่าค่า NSE ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง FLEX_L เท่ากับ 0.83%, 10.53%, 3.50%, 15.13% และ 20.44% ตามลำดับ ซึ่งนับว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้

คำสำคัญ: แบบจำลองแบบลัมพ์, แบบจำลองแบบกึ่งกระจายตัว, URBS, FLEX_L, SENSWAT-URBS

Abstract

Rainfall-runoff model is a useful tool to simulate the past and future scenarios of water resources management system. However, most of models are categorized as lumped models which provide runoff only at a calibrated gauging station, which limits the usage of runoff estimates. Therefore, URBS - a semi-distributed model - was developed to provide runoff estimates for any sub-catchments within a calibrated station. In this study, SENSWAT-URBS - which was rewritten using MATLAB and further developed for an automatic calibration by the researchers under the SENSWAT research center - was tested by calibrating the model at E.21 gauging station covering a catchment area of 8,340 square kilometers. The calibration results of runoff estimates between 2003 and 2013 provide the NSE of 0.81. In addition, SENSWAT-URBS also provides runoff estimates for all sub-catchments of E.21, including at E.5, E.23, E.32A and E.6 gauging stations. By comparing runoff estimates at these stations to the observed data, the NSE are shown to be 0.77, 0.82, 0.68 and 0.56, respectively. These results were later compared to the NSE provided by model calibration evaluated at E.21 and at the other 4 stations using the FLEX_L model, which is a lumped model and can be automatically calibrated using MOSCEM. The NSE are shown to be 0.86, 0.82, 0.85, 0.80 and 0.71, respectively. The results reveal the effectiveness of SENSWAT-URBS by providing the NSE values at those stations lower than those of provided by FLEX_L around 10.53%, 3.50%, 15.13% and 20.44%, respectively, which are accepted.

Keywords: Lumped model, Semi-distributed model, URBS, FLEX_L, SENSWAT-URBS

1. คำนำ

ปริมาณน้ำทำเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากในระบบอุทกวิทยา เนื่องจากในกรณีที่มีมากเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาอุทกภัยและถ้ามีน้อยเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาภัยแล้ง ดังนั้น การตรวจวัดปริมาณน้ำทำโดยหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบด้านการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำจึงเป็นภาระกิจที่สำคัญของหน่วยงาน อย่างไรก็ตาม การตรวจวัดข้อมูลน้ำทำไม่สามารถดำเนินการได้อย่างทั่วถึงเนื่องจากต้องใช้งบประมาณและทรัพยากรบุคคลจำนวนมาก ดังนั้น จึงได้มีการสร้างแบบจำลองน้ำฝน-น้ำทำ ขึ้นมาอย่างมากมาย อาทิเช่น แบบจำลอง SCS [1], TANK [2], NAM [3] และ FLEX_L [4] เป็นต้น เพื่อนำมาใช้ประเมินน้ำทำในสภาพอนาคตเพื่อประกอบการวางแผนพัฒนาทรัพยากรน้ำ หรือในสภาพปัจจุบันที่พื้นที่ลุ่มน้ำกำลังได้รับผลกระทบจากปัญหาอุทกภัยหรือภัยแล้ง รวมทั้งการนำผลการประเมินน้ำทำที่สถานีตรวจวัด (Gauged catchment) มาประยุกต์ใช้เพื่อประเมินน้ำทำ ณ ตำแหน่งที่ไม่มีสถานีตรวจวัด (Ungauged catchment) โดยการสร้างความสัมพันธ์ต่าง ๆ อาทิเช่น ความสัมพันธ์แบบลุ่มน้ำรวมระหว่างพารามิเตอร์ของแบบจำลอง NAM และลักษณะเฉพาะของลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำปึงตอนบน ซึ่งดำเนินการศึกษาโดย [5] ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลองน้ำฝน-น้ำทำ ส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ (Lumped model) ที่ให้ผลการประเมินเฉพาะจุดที่มีการตรวจวัดน้ำทำ เพื่อนำไปใช้ประกอบการสอบเทียบแบบจำลองจึงต้องใช้วิธีทางอ้อมในการประเมินน้ำทำ ณ ตำแหน่งที่ต้องการแต่ไม่มีการติดตั้งสถานีตรวจวัด ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัว (Semi-distributed model) ขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ทั้งนี้ แบบจำลอง URBS ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย Queensland Department of Natural Resources and Mines เป็นหนึ่งในแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัวที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายและถูกนำมาใช้เป็นแบบจำลองหลักเพื่อการจำลองสภาวะน้ำท่วมแบบตามเวลาจริง (Real time flood modelling) ในประเทศออสเตรเลีย [6] อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง URBS มีลักษณะแบบ Black box และไม่สามารถทำการสอบเทียบแบบจำลองได้โดยอัตโนมัติ ดังนั้น ศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management, SENSWAT) จึงได้ทำการนำเอาทฤษฎีของแบบจำลอง URBS มาสร้างเป็นโปรแกรมขึ้นมาใหม่โดยใช้ MATLAB และเพิ่มความสามารถในการสอบเทียบแบบจำลองได้โดยอัตโนมัติโดยการเชื่อมต่อกับโปรแกรม MOSCEM ที่ทำหน้าที่ในการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด โดยแบบจำลองดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า แบบจำลอง SENSWAT-URBS

ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำแบบจำลอง SENSWAT-URBS มาใช้เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการประเมินน้ำทำสำหรับสถานีวัดน้ำทำ E.21 ซึ่งตั้งอยู่ในลุ่มน้ำชี นอกจากนี้แล้ว แบบจำลอง SENSWAT-URBS สามารถให้ผลการประเมินปริมาณน้ำทำทุกตำแหน่งที่ต้องการในพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำทำ E.21 ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำผลการประเมินน้ำทำที่สถานีวัดน้ำทำ E.32A, E.5, E.23 และ E.6C เพื่อมาเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำทำที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำทำเหล่านี้ เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของผลการประเมินน้ำทำ

จากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำทำที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง URBS โดยตรงที่ 4 สถานี ดังกล่าว อย่างไรก็ตาม เพื่อแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของผลการประเมินน้ำทำของแบบจำลอง SENSWAT-URBS ให้ชัดเจนมากขึ้น จึงได้นำแบบจำลอง FLEX_L ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ที่สามารถประเมินพารามิเตอร์ของแบบจำลองได้โดยอัตโนมัติที่ดำเนินการโดยโปรแกรม MOSCEM เช่นกัน มาใช้เพื่อการประเมินน้ำทำของสถานีวัดน้ำทำทั้ง 5 สถานี ดังกล่าว เพื่อนำผลของความถูกต้องในการประเมินน้ำทำของสถานีเหล่านี้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลอง SENSWAT-URBS เพื่อแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของแบบจำลอง SENSWAT-URBS ได้อย่างชัดเจนมากขึ้น เพื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้ประกอบการพัฒนาแบบจำลองเหล่านี้ ก่อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการประเมินน้ำทำในลุ่มน้ำอื่น ๆ ของประเทศต่อไป

2. พื้นที่ศึกษา

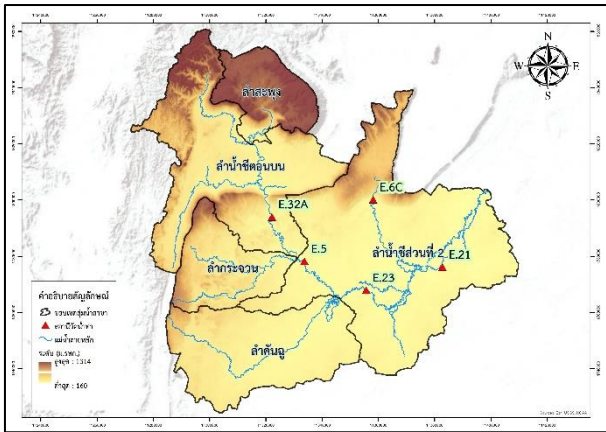
ลุ่มน้ำชี ตั้งอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยมีขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำเท่ากับ 49,130 ตารางกิโลเมตร ลุ่มน้ำชีตั้งอยู่ระหว่างเส้นรุ้งที่ 15° 30' เหนือถึงเส้นรุ้งที่ 17° 30' เหนือ และเส้นแวงที่ 101° 30' ตะวันออก ถึงเส้นแวงที่ 104° 30' ตะวันออก ทิศเหนือติดกับลุ่มน้ำโขงทิศใต้ติดกับลุ่มน้ำมูล ทิศตะวันออกติดกับลุ่มน้ำโขงและลุ่มน้ำมูล และทิศตะวันตกติดกับลุ่มน้ำป่าสัก พื้นที่ส่วนใหญ่ของลุ่มน้ำชีอยู่ในเขต 14 จังหวัด ซึ่งประกอบด้วย จังหวัดชัยภูมิ ขอนแก่น หนองบัวลำภู อุดรธานี มหาสารคาม นครราชสีมา เลย เพชรบูรณ์ กาฬสินธุ์ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี ศรีสะเกษ และ มุกดาหาร ลุ่มน้ำชีมีแม่น้ำชีเป็นลำน้ำสายหลักที่มีต้นกำเนิดมาจากยอดเขาในแนวเทือกเขาเพชรบูรณ์ในเขตอำเภอเกษตรสมบูรณ์ จังหวัดชัยภูมิ และมีความยาวประมาณ 830 กิโลเมตร ลุ่มน้ำชีอยู่ในเขตอากาศแบบทุ่งหญ้าเขตอบอุ่นในเขตร้อนสภาพภูมิอากาศโดยทั่วไปอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และในบางครั้งมีลมดีเปรสชันพัดมาจากทะเลจีนใต้ทำให้มีฝนตกหนักในช่วงฤดูฝน จากอิทธิพลของลมมรสุมทั้งสองนี้ ทำให้เกิดฤดูกาล 3 ฤดู คือ ฤดูฝน ฤดูหนาว และฤดูร้อนลุ่มน้ำชีประกอบด้วย 20 ลุ่มน้ำสาขา อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการศึกษาเฉพาะลุ่มน้ำสาขาสำน้ำชีตอนบนสำน้ำชีส่วนที่ 2 ลำสะพุง ลำกระจวน และ ลำคันฉู โดยรูปที่ 1 ได้แสดงสถานีวัดน้ำทำที่ใช้ในการศึกษาจำนวน 5 สถานี ซึ่งประกอบด้วย สถานีวัดน้ำทำ E.32A, E.5, E.23, E.6C และ E.21

3. ข้อมูลประกอบการศึกษา

3.1 ข้อมูลฝน

ในการศึกษานี้ได้นำข้อมูลฝนที่ได้จากผลิตภัณฑ์ฝน SENSWAT-GGR ซึ่งเป็นข้อมูลฝนแบบกริด (Gridded Gauged Rainfall, GGR) โดยการเฉลี่ยเชิงพื้นที่ด้วยวิธี Inverse Distance Square (IDS) [7] มาใช้เป็นข้อมูลด้านเข้าของแบบจำลอง ซึ่งผลิตภัณฑ์ฝน SENSWAT-GGR มีความละเอียดเชิงพื้นที่เท่ากับ 0.01 องศา หรือประมาณ 1 กิโลเมตร โดยผลิตภัณฑ์ฝนดังกล่าวถูกสร้างขึ้นโดยนักวิจัยภายใต้ศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Remote Sensing Research Center for Water Resources

Management, SENSWAT) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลฝนที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ เป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ฝน SENSWAT-GGR ที่ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.21 ในช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ. 2546-2556



รูปที่ 1 สถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ศึกษาซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของลุ่มน้ำชี

3.2 ข้อมูลน้ำท่า

ข้อมูลน้ำท่าที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ คือข้อมูลน้ำท่าแบบรายวันที่อยู่ในช่วงปี พ.ศ. 2546-2556 จำนวน 5 สถานี ซึ่งประกอบด้วย สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23, E.6C และ E.21 ทั้งนี้ สถานีวัดน้ำท่าดังกล่าวมีพื้นที่รับน้ำฝนเท่ากับ 2,877, 4,207, 6,711, 381 และ 8,340 ตารางกิโลเมตร ตามลำดับ โดยสถานีวัดน้ำท่า E.32A ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำสาขาลำน้ำชีตอนบน และสถานีวัดน้ำท่า E.5, E.23, E.6C และ E.21 ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำสาขาลำน้ำชีส่วนที่ 2

4. ทฤษฎี

4.1 แบบจำลอง FLEXL

แบบจำลอง FLEXL ย่อมาจาก Flux Exchange [4] ซึ่งเป็นแบบจำลองเชิงแนวคิด (Conceptual Model) โดยเลียนแบบกระบวนการทางอุทกวิทยาที่เกิดขึ้นในลุ่มน้ำ ที่มีการแจกแจงทั่วลุ่มน้ำ (Lumped Model) ซึ่งแนวคิดของแบบจำลองจะแบ่งปริมาณการเก็บของพื้นที่ลุ่มน้ำออกเป็น 5 ชั้นเก็บกัก ซึ่งประกอบด้วย 1) การเก็บกักในชั้นหิมะ (Snow reservoir) 2) การเก็บกักโดยกระบวนการ Interception (Interception reservoir) 3) การเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil reservoir) 4) การเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Fast respond reservoir) และ 5) การเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า (Slow reacting reservoir) แต่เนื่องจากประเทศไทยไม่มีการเกิดหิมะจึงจะกล่าวรายละเอียดของปริมาณการเก็บกักของพื้นที่ลุ่มน้ำเพียง 4 ชั้นเก็บกัก ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยไม่มีรายละเอียดของการเก็บกักในชั้นหิมะ (Snow reservoir) ซึ่งแสดงรายละเอียดของแต่ละชั้นเก็บกักดังต่อไปนี้

1) การเก็บกักโดยกระบวนการ Interception (Interception reservoir)

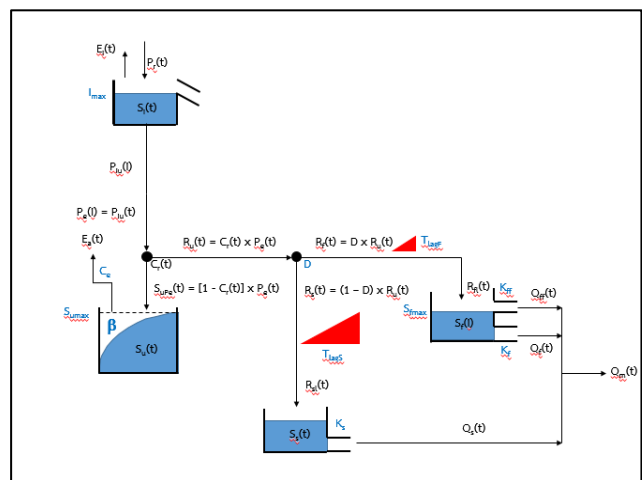
ปริมาณการเก็บกักโดยกระบวนการ Interception ($S_{i(t)}$) เกิดขึ้นจากปริมาณการเก็บกักโดยกระบวนการ Interception ที่เวลาก่อนหน้า ($S_{i(t-1)}$) รวมกับปริมาณฝนที่ตกลงมา ($P_{r(t)}$) และหากผลรวมดังกล่าวมีค่าเกินจากปริมาณการเก็บกักสูงสุดของชั้น Interception (I_{max}) จะกลายเป็นปริมาณฝนส่วนเกิน ($P_{e(t)}$) ดังแสดงในสมการที่ (1) แต่เนื่องจากประเทศไทยไม่มีการเกิดหิมะจึงทำให้ปริมาณฝนส่วนเกินมีค่าเท่ากับปริมาณฝนส่วนเกินจากการสูญเสียโดยกระบวนการ Interception ($P_{iu(t)}$) โดยฝนส่วนเกินจะไหลลงสู่การเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil reservoir) จากนั้นเมื่อสิ้นสุดวัน การเก็บกักโดยกระบวนการ Interception ($S_{i(t)}$) จะระเหยกลับคืนสู่บรรยากาศ โดยปริมาณการระเหยคำนวณจากค่าต่ำสุดระหว่าง 3 ตัวแปรควบคุม คือ ปริมาณการเก็บกักโดยกระบวนการ Interception เมื่อสิ้นสุดวัน ($S_{i(t)}$), ปริมาณการเก็บกักสูงสุดในชั้น Interception (I_{max}) และศักยภาพการคายระเหย (E_p) ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$P_{e(t)} = \begin{cases} P_{r(t)} + S_{i(t-1)} - I_{max}, & P_{r(t)} + S_{i(t-1)} > I_{max} \\ 0, & P_{r(t)} + S_{i(t-1)} \leq I_{max} \end{cases} \quad (1)$$

โดยที่ ($P_{e(t)}$) คือ ฝนส่วนเกิน (Effective rainfall) จากการสูญเสียโดยกระบวนการ Interception (มิลลิเมตร), $P_{r(t)}$ คือ ปริมาณฝนที่ตก ณ วันที่พิจารณา (มิลลิเมตร), $S_{i(t)}$ คือ ปริมาณการเก็บกักโดยกระบวนการ Interception ณ เวลาที่พิจารณา (มิลลิเมตร)

$$E_i = \min(P, E_p, I_{max}) \quad (2)$$

โดยที่ $E_i(t)$ คือ ปริมาณการระเหยจากการเก็บกักของกระบวนการ Interception (มิลลิเมตร), $P_{r(t)}$ คือ ปริมาณฝนที่ตก ณ วันที่พิจารณา (มิลลิเมตร), I_{max} คือ ปริมาณการเก็บกักสูงสุดของชั้น Interception (มิลลิเมตร), $E_p(t)$ คือ ศักยภาพการคายระเหย (มิลลิเมตร)



รูปที่ 2 โครงสร้างแบบจำลอง FLEXL ที่ไม่มีการเก็บกักในชั้นหิมะ (Snow reservoir)

สมมูลน้ำในส่วนของการเก็บกักโดยกระบวนการ Interception คำนวณได้ดังในสมการที่ (3)

$$\frac{ds_i}{dt} = P - E_i - P_e \quad (3)$$

2) การเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil reservoir)

ปริมาณฝนส่วนเกิน ($P_{e(t)}$) ที่ไหลลงสู่การเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil reservoir) จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่า (Runoff coefficient, C_r) ที่คำนวณได้โดยสมการที่ (4) ซึ่งส่วนหนึ่งจะถูกเก็บไว้ในดินในรูปของความชื้นในดิน (Soil moisture) และส่วนที่เหลือจะไหลออกนอกถึงเก็บกัก จากสมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่าแสดงให้ว่า สัมประสิทธิ์น้ำท่าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างปริมาณการเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ณ เวลาก่อนหน้า ($S_{u(t-1)}$) กับความจุเก็บกักสูงสุดของชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ($S_{u\max}$) รวมทั้งค่าคงที่ β ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่มีค่าแนะนำระหว่าง 0.1 ถึง 3 และสำหรับ $S_{u\max}$ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองเช่นกันมีค่าแนะนำระหว่าง 20 ถึง 800 มิลลิเมตร

$$C_r = 1 - \left(1 - \frac{S_{u(t-1)}}{S_{u\max}}\right)^\beta \quad (4)$$

ปริมาณการเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (S_{upe}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) โดยเมื่อปริมาณการเก็บกักดังกล่าวรวมกับปริมาณการเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ณ เวลาก่อนหน้า ($S_{u(t-1)}$) จะได้เป็นปริมาณการเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ณ เวลาที่พิจารณา ($S_{u(t)}$) โดยน้ำบางส่วนจะสูญเสียไปโดยกระบวนการระเหยรวมการคายน้ำ ดังนั้น $S_{u(t)}$ สุทธิที่ผ่านทุกกระบวนการแล้วคือ $S_{u(t)}$ ที่คำนวณได้จากขั้นตอนดังกล่าวด้วย E_a ที่คำนวณได้จากสมการที่ (6) ซึ่งจะกลายเป็นค่า $S_{u(t-1)}$ ที่จะนำไปใช้ในการคำนวณในช่วงเวลาถัดไป

$$S_{upe} = P_{e(t)}(1 - C_r) \quad (5)$$

$$E_a = \min((E_p - E_i), \frac{S_{u,t}}{C_e S_{u\max}} (E_p - E_i)) \quad (6)$$

ปริมาณฝนส่วนเกิน ($P_{e(t)}$) ที่เหลือจากปริมาณการเก็บกักในชั้นดินที่ยังไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (S_{upe}) จะไหลออกจากชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ กลายเป็นปริมาณน้ำท่า (Generated flow, R_u) ซึ่งมีเงื่อนไขการคำนวณ 2 เงื่อนไข คือ 1) ปริมาณการเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ($S_{u(t)}$) มีค่ามากกว่าเท่ากับความจุเก็บกักสูงสุดของชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ($S_{u\max}$) และ 2) ปริมาณการเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ($S_{u(t)}$) มีค่าน้อยกว่าความจุเก็บกักสูงสุดของชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ($S_{u\max}$) ดังแสดงแนวทางคำนวณในสมการที่ (7)

$$\frac{R}{P_e} = 1 - \left(1 - \frac{S_u}{(1+\beta)S_{u\max}}\right)^\beta \quad (7)$$

จากนั้น ปริมาณน้ำท่า (R_u) จะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ 1) ปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Flow into fast respond, R_f) และ 2) ปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า (Groundwater recharge, R_s) ทั้งนี้ ปริมาณน้ำท่าทั้ง 2 ส่วนจะถูกแบ่งโดยค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Splitter coefficient, D) ซึ่งมีค่าที่แนะนำระหว่าง 0.1 ถึง 0.9 และปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้าจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตอบสนองอย่างเชื่องช้า ($1 - D$)

3) การเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Fast respond reservoir)

ปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Flow into fast respond, R_f) เกิดขึ้นจากผลคูณระหว่างปริมาณน้ำท่า R_u ที่เหลือจากการเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำคูณกับค่าสัมประสิทธิ์ของการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Splitter coefficient, D) ดังแสดงในสมการที่ (8)

$$R_f = R_u \quad (8)$$

ปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (R_f) ที่ถูกหน่วงเวลา เพื่อให้การไหลเกิดช้ากว่าปริมาณฝนโดยเป็นไปตามฟังก์ชันหน่วงเวลา (Lag function) คือ ปริมาณน้ำท่าที่เกิดจากการตอบสนองอย่างรวดเร็วที่เป็นผลจากการหน่วงเวลา ณ วันที่พิจารณา ซึ่งฟังก์ชันหน่วงเวลา ให้ค่าถ่วงน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามเวลาแบบเส้นตรง (Linearly increase weight) ดังแสดงในสมการที่ (9) และการคำนวณปริมาณน้ำท่าที่เกิดจากการตอบสนองอย่างรวดเร็วที่เป็นผลจากการหน่วงเวลาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10)

$$C(i) = \frac{i}{\sum_{u=1}^{T_{lag}} u} \quad (9)$$

โดยที่ C_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของ R_f ในวันที่ $(t - i + 1)$ ในเมื่อ i มีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง T_{lag} , T_{lag} คือ จำนวนวันที่น้ำท่ามีการหน่วงตามเวลา โดยเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่มีค่าแนะนำระหว่าง 0.8 ถึง 3 วัน

$$R_{fl}(t) = \sum_{i=1}^{T_{lag}} C(i) \cdot R_f(t - i + 1) \quad (10)$$

เมื่อ $R_{fl}(t)$ คือ ปริมาณน้ำท่าที่เกิดจากการตอบสนองอย่างรวดเร็วที่เป็นผลจากการหน่วงเวลา ณ วันที่พิจารณา ($t = 1, 2, 3, \dots$)

จากนั้น ปริมาณน้ำท่าที่เกิดจากการตอบสนองอย่างรวดเร็วที่เป็นผลจากการหน่วงเวลา ณ วันที่พิจารณา ($R_{fl}(t)$) จะไหลมารวมกับปริมาณการเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาก่อนหน้า ($S_{f(t-1)}$) รวมเป็นปริมาณการเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ณ เวลาที่พิจารณา ($S_{f(t)}$) ซึ่งหากปริมาณการเก็บกักดังกล่าวมีค่าเกินความจุเก็บกักสูงสุดของชั้นน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ($S_{f\max}$) จะทำให้เกิดการไหลเหนือผิวดิน ซึ่งคำนวณได้

จากสมการที่ (11) ทั้งนี้ อัตราการไหลเหนือผิวดิน ($Q_{ff(t)}$) ที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับค่าคงที่ K_{ff}

$$Q_{ff(t)} = \max\left(0, \frac{S_f(t) - S_{fmax}}{K_{ff}}\right) * \Delta t \quad (11)$$

โดยที่ $Q_{ff(t)}$ คือ อัตราการไหลเหนือผิวดินที่เกิดจากการเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (มิลลิเมตร), K_{ff} คือ Residence time ของการไหลเหนือผิวดินซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่มีค่าแนะนำระหว่าง 1 ถึง 20 วัน

ส่วนปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในชั้นเก็บกักที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ($S_f(t)$) จะมีการไหลใต้ผิวดินโดยคำนวณได้จากสมการที่ (12) ทั้งนี้ อัตราการไหลใต้ผิวดินที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับค่าคงที่ K_f

$$Q_{f,t} = \frac{S_{f,t}}{K_f} * \Delta t \quad (12)$$

โดยที่ $Q_f(t)$ คือ อัตราการไหลใต้ผิวดินที่เกิดจากการเก็บกักในชั้นที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (มิลลิเมตร), $S_f(t)$ คือ ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในชั้นเก็บกักที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ณ วันที่พิจารณา (มิลลิเมตร), K_f คือ Residence time ของการไหลใต้ผิวดินซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่มีค่าแนะนำระหว่าง 1 ถึง 20 วัน

สมมูลน้ำของการเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วสามารถคำนวณได้ดังในสมการที่ (13)

$$\frac{dS_f}{dt} = R_{fl} - Q_{ff} - Q_f \quad (13)$$

4) การเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า (Slow reacting reservoir)

ปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า (Groundwater recharge, R_s) เกิดขึ้นจากผลคูณระหว่างปริมาณน้ำท่า R_u ที่เหลือจากการเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำคูณกับค่าสัมประสิทธิ์ของการตอบสนองอย่างเชื่องช้า ($1 - D$) ดังแสดงในสมการที่ (14)

$$R_s = R_u(1 - D) \quad (14)$$

ปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า (R_s) ที่ถูกหน่วงเวลาเพื่อให้การไหลเกิดล่าช้ากว่าการเกิดฝน โดยเป็นไปตามฟังก์ชันหน่วงเวลา (Lag function) ที่ให้ค่าถ่วงน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามเวลาแบบเส้นตรง โดย T_{lags} มีค่าแนะนำระหว่าง 2 ถึง 50 วัน และปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า (R_{sl}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10) โดยเปลี่ยนตัวแปรจาก f เป็น s เท่านั้น ต่อจากนั้น R_{sl} ที่คำนวณได้จะถูกนำมารวมกับปริมาณการเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้าในช่วงเวลาที่ผ่านมา ($S_{s(t-1)}$) กลายเป็น ($S_{s(t)}$) จากนั้นปริมาณการเก็บกักในส่วนนี้จะไหลไปรวมกับน้ำใต้ดินและไหลออกสู่น้ำท่าอย่างช้า ๆ โดยคำนวณได้ดังในสมการที่ (15) ทั้งนี้ อัตราการไหลที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ นี้จะมีลักษณะของการตอบสนองแบบเส้นตรงที่ขึ้นกับค่าคงที่ K_s

$$Q_{s,t} = \frac{S_{s,t}}{K_s} * \Delta t \quad (15)$$

โดยที่ $Q_{s(t)}$ คือ อัตราการไหลของน้ำใต้ดิน (มิลลิเมตร), $S_{s(t)}$ คือ ปริมาณน้ำในชั้นเก็บกักที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า ณ วันที่พิจารณา (มิลลิเมตร), K_s คือ Residence time ของการไหลของน้ำใต้ดินซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่มีค่าแนะนำระหว่าง 10 ถึง 400 วัน

สมมูลน้ำในเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้าคำนวณได้ดังในสมการที่ (16)

$$\frac{dS_s}{dt} = R_{sl} - Q_s \quad (16)$$

1.2 แบบจำลอง URBS

แบบจำลอง URBS ถูกพัฒนาโดย Queensland Department of Natural Resources and Mines ในปี ค.ศ. 1990 เพื่อการพยากรณ์น้ำท่วม โดยมีพื้นฐานแนวความคิดจากแบบจำลอง ROBS [9] นอกจากการพยากรณ์น้ำท่วมแล้ว URBS ยังสามารถจำลองแบบอัตราการไหลและระดับน้ำในลักษณะเหตุการณ์เดียว และเหตุการณ์ต่อเนื่องได้ แบบจำลอง URBS ประกอบด้วยแบบจำลองย่อย 3 แบบจำลอง คือ 1) แบบจำลองการเคลื่อนตัวของปริมาณน้ำท่า (Runoff Routing Models) 2) แบบจำลองการสูญเสียของปริมาณน้ำฝน (Rainfall Loss Models) และ 3) แบบจำลองการประเมินปริมาณการไหลพื้นฐาน (Baseflow Model) [10] โดยแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) แบบจำลองการเคลื่อนตัวของปริมาณน้ำท่า (Runoff Routing Models) แบ่งเป็นแบบจำลองย่อย 2 แบบจำลอง ดังต่อไปนี้

1.1) แบบจำลองพื้นฐาน (Basic model) เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของน้ำท่า โดยปริมาตรการเก็บกักในพื้นที่ลุ่มน้ำและปริมาตรการเก็บกักของลำน้ำจะถูกพิจารณารวมเป็นปริมาตรเก็บกักเดียวกันโดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเก็บกักและอัตราการไหล (S-Q) ของอ่างเก็บน้ำแบบไม่เป็นเส้นตรงแสดงในสมการที่ (17)

$$S = k_c^1 Q^m \quad (17)$$

โดยที่ S คือ ปริมาตรเก็บกักของพื้นที่ลุ่มน้ำและลำน้ำ (ลูกบาศก์เมตร ชั่วโมง ต่อวินาที), k_c^1 คือ ค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนตัวแบบไม่เป็นเส้นตรงของอ่างเก็บน้ำ, Q คือ ปริมาณน้ำไหลออก (ลูกบาศก์เมตร ต่อวินาที), m คือ พารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเส้นตรงของพื้นที่ลุ่มน้ำ (catchment nonlinearity parameter)

1.2) แบบจำลองแยกส่วน (Split model) เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของน้ำท่าโดยปริมาตรเก็บกักของลุ่มน้ำของลุ่มน้ำและลำน้ำจะถูกแยกกันอย่างอิสระซึ่งแบ่งได้ดังต่อไปนี้

1.2.1) การเคลื่อนตัวบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (catchment routing) ใช้หลักการอ่างเก็บน้ำแบบไม่เป็นเส้นตรงเพื่อคำนวณปริมาตรเก็บกักโดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเก็บกักและอัตราการไหลแสดงในสมการที่ (18)

$$S_{catch} = \left\{ \frac{\beta \sqrt{A}(1+F)^2}{(1+U)^2} \right\} Q^m \quad (18)$$

โดยที่ S_{catch} คือ ปริมาตรเก็บกักของลุ่มน้ำ (ลูกบาศก์เมตร ชั่วโมง ต่อ วินาที), β คือ พารามิเตอร์การหน่วงของลุ่มน้ำ (catchment lag parameter), A คือ พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตารางกิโลเมตร), F คือ สัดส่วนพื้นที่ป่าไม้ในพื้นที่ลุ่มน้ำ, m คือ พารามิเตอร์แสดงการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเส้นตรงของลุ่มน้ำ

2) การเคลื่อนตัวในลำน้ำ (channel routing) สำหรับการเคลื่อนตัวในลำน้ำจะใช้พื้นฐานของวิธีมัสคิงัมแบบไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (19)

$$S_{chnl} = \alpha f \frac{nL}{\sqrt{S_c}} (xQ_u + (1-x)Q_d)^{n^1} \quad (19)$$

โดยที่ S_{chnl} คือ ปริมาตรเก็บกักในลำน้ำ (ลูกบาศก์เมตร ชั่วโมง ต่อ วินาที), α คือ พารามิเตอร์ของการเคลื่อนตัวของลำน้ำ, f คือ แฟคเตอร์ของความยาวลำน้ำ, L คือ ความยาวลำน้ำ (กม.), S_c คือ ความลาดชันของทางน้ำ, n คือ สัมประสิทธิ์ความขรุขระของลำน้ำ, Q_u คือ ปริมาณการไหลเข้าด้านเหนือน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที), Q_d คือ ปริมาณการไหลออกด้านท้ายน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที), x คือ พารามิเตอร์การเคลื่อนตัวโดยวิธีมัสคิงัม, n^1 คือ พารามิเตอร์แบบไม่เป็นเส้นตรงของวิธีมัสคิงัม

2) แบบจำลองการสูญเสียปริมาณน้ำฝน

แบบจำลอง URBS มีแนวคิดในการจำลองการสูญเสียปริมาณน้ำฝน 2 วิธี คือ การจำลองการสูญเสียแบบเหตุการณ์เดียว และแบบเหตุการณ์ต่อเนื่อง โดยแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1) การจำลองการสูญเสียแบบเหตุการณ์เดียว ต้องการให้ผู้ใช้กำหนดปริมาณการสูญเสียของปริมาณฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำก่อนที่จะเกิดปริมาณน้ำท่า เรียกว่าการสูญเสียประเภทนี้ว่า การสูญเสียเริ่มต้น (initial loss) โดยจะแยกการจำลองการสูญเสียของปริมาณน้ำฝนสำหรับพื้นที่ที่บ้น้ำและพื้นที่ที่น้ำซึมผ่านได้ออกจากกัน

2.1.1) แบบจำลองการสูญเสียในพื้นที่ที่บ้น้ำ (impervious loss model) จะสมมติว่าไม่มีการสูญเสียเริ่มต้นและปริมาณการไหลออกจากพื้นที่ที่บ้น้ำจะเป็น 100% แต่มีการทำการวิจัยเกี่ยวกับการสูญเสียเริ่มต้นโดยได้แนะนำว่าค่าการสูญเสียเริ่มต้นมีค่าประมาณ 1 ถึง 2 มม. และสัดส่วนของการกลายเป็นปริมาณน้ำท่าควรมีค่าอยู่ระหว่าง 90% ถึง 100%

2.1.2) แบบจำลองการสูญเสียในพื้นที่ที่น้ำซึมผ่านได้ (pervious loss models) มีแบบจำลองย่อย 3 แบบจำลอง คือ

1) แบบจำลองการสูญเสียแบบต่อเนื่อง (continuing loss model) โดยแบบจำลองย่อยนี้มีสมมติฐานว่ามีปริมาณการสูญเสียเริ่มต้น (il : มม.) หลังจากนั้นอัตราการสูญเสียต่อเนื่อง (cl : มม./ชม.) จะถูกประยุกต์กับปริมาณน้ำฝนก่อนที่จะปริมาณน้ำฝนจะกลายเป็นปริมาณน้ำฝนใช้การ

2) แบบจำลองปริมาณน้ำท่าแบบสัดส่วน (proportional runoff model) แบบจำลองย่อยนี้มีสมมติฐานว่ามีปริมาณการสูญเสียเริ่มต้น (il : มม.) หลังจากนั้นสัดส่วนของปริมาณน้ำท่า (pr) จะถูกสมมติขึ้น ก่อนที่ปริมาณน้ำฝนจะกลายเป็นปริมาณน้ำฝนใช้การ

3) แบบจำลองการสูญเสียของ Manley-Phillips แบบจำลองนี้จะทำการสมมติว่า อัตราการสูญเสียมีพื้นฐานมาจากสมการที่ (20)

$$f_t = \frac{1}{2}(2kP)^{1/2}t^{-1/2} + k \quad (20)$$

โดยที่ f_t คือ อัตราการสูญเสียหลังจากเวลา t (มม./ชั่วโมง), t คือ เวลา (ชั่วโมง), P คือ เหนือของน้ำที่ถูกดูดซึม (capillary suction head) (มม.), k คือ อัตราการสูญเสียที่จุดอิ่มตัว (มม./ชั่วโมง)

การวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่ต่อปริมาณการสูญเสีย เมื่อปริมาณน้ำฝนมีการซึมผ่านผิวดินด้วยความลึก x มม. จะมีปริมาณฝนที่เหลืออยู่ที่ทำให้เกิดน้ำท่าที่มีสัดส่วนเท่ากับ f_{eff} ของพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมด โดยใช้หลักการกระจายตัวแบบเส้นตรง เพื่อวิเคราะห์สัดส่วนของลุ่มน้ำที่เกิดน้ำท่า ดังสมการที่ (21)

$$f_{eff} = f_u + \frac{F_t}{F_{max}} \quad (21)$$

โดยที่ f_{eff} คือ สัดส่วนของพื้นที่ที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 1, f_u คือ สัดส่วนของพื้นที่ที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ ณ เวลาเริ่มต้น ก่อนเกิดพายุฝน, F_t คือ ปริมาณการซึมผ่านผิวดินสะสมสำหรับพื้นที่ที่น้ำซึมผ่านได้ (มม.) หลังจากเวลา, F_{max} คือ ความสามารถสูงสุดในการซึมผ่านผิวดินของพื้นที่ลุ่มน้ำ

ความลึกฝนส่วนเกินในแต่ละช่วงเวลาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (22)

$$R_i = f_{eff} C_{imp} R_i^{tot} + (1 - f_{eff}) R_i^{per} \quad (22)$$

โดยที่ R_i^{tot} คือ ความลึกฝนทั้งหมด, C_{imp} คือ สัมประสิทธิ์ปริมาณน้ำท่าสำหรับพื้นที่ที่น้ำซึมผ่านไม่ได้, R_i^{per} คือ ความลึกฝนส่วนเกินสำหรับพื้นที่ที่น้ำซึมผ่านได้ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองการสูญเสียสำหรับพื้นที่ที่น้ำซึมผ่านได้

ดินมีความสามารถในการคืนสภาพต่อการรับน้ำฝน ดังนั้น ปริมาณการซึมผ่านผิวดินสะสม ณ เวลา t คำนวณจากสมการที่ (23) โดยผลรวมการคืนสภาพของปริมาณการสูญเสียกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณการซึมผ่านผิวดิน ซึ่งสัมประสิทธิ์การคืนสภาพ $k_{\delta T}$ มีค่าน้อยกว่า 1 dF การเปลี่ยนแปลงปริมาณการไหลซึมผ่านผิวดิน

$$F_t = k_{\delta T} F_{t-1} + dF \quad (23)$$

2.2) การจำลองการสูญเสียแบบเหตุการณ์ต่อเนื่อง คำนวณได้จากแบบจำลองการคืนสภาพของปริมาณการสูญเสียเริ่มต้น (Recovering Initial Loss Models, RILM) โดยผู้ใช้งานต้องกำหนดการสูญเสียเริ่มต้นถ้าไม่กำหนด แบบจำลองจะใช้ค่าความลึกฝนของเหตุการณ์แรกหลังจากสภาพดินแห้งมาก ทั้งนี้ แบบจำลอง RILM ประกอบด้วย 2 แบบจำลองย่อย คือ

2.2.1) แบบจำลองการสูญเสียแบบต่อเนื่อง (continuing loss model) แบบจำลองนี้ถูกพัฒนาเพื่อยอมให้การสูญเสียเริ่มต้นสามารถคืนสภาพได้โดยการสูญเสียเริ่มต้นจะถูกคำนวณใหม่ทุกช่วงเวลา ดังสมการที่ (24)

$$\begin{aligned}
 IL_{(i+1)} &= IL_i, & R_i > clr_i \cdot \delta t \\
 IL_{(i+1)} &= IL_i + f \cdot (clr_i \delta t - R_i), & R_i \leq clr_i \cdot \delta t \\
 IL_{(i+1)} &= IL_{max}
 \end{aligned} \quad (24)$$

โดยที่ R_i คือ อนุกรมของปริมาณน้ำฝน, clr_i คือ อนุกรมของอัตราการสูญเสียแบบต่อเนื่อง, δt คือ ช่วงเวลา, f คือ พารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง (0.1-0.5)

2.2.2) แบบจำลองปริมาณการสูญเสียแบบเป็นสัดส่วน (proportional loss model) แบบจำลองนี้ถูกพัฒนาเพื่อให้การสูญเสียเริ่มต้นสามารถคืนสภาพได้ โดยการสูญเสียเริ่มต้นจะถูกคำนวณใหม่ทุกช่วงเวลา ดังสมการที่ (25)

$$\begin{aligned}
 IL_{(i+1)} &= IL_i, & prR_i > rlr_i \cdot \delta t \\
 IL_{(i+1)} &= IL_i + rlr_i \delta t - R_i, & R_i \leq rlr_i \cdot \delta t \\
 IL_{(i+1)} &= IL_{max}
 \end{aligned} \quad (25)$$

โดยที่ R_i คือ อนุกรมของปริมาณน้ำฝน, pr คือ สัมประสิทธิ์ปริมาณน้ำท่าแบบเป็นสัดส่วน, rlr คือ อัตราการคืนสภาพของอัตราการสูญเสีย ซึ่งได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยเกิดขึ้นเมื่อฝนน้อยกว่าอัตราการคืนสภาพที่กำหนด

3) แบบจำลองปริมาณการไหลพื้นฐาน (baseflow model) สามารถประเมินปริมาณการไหลพื้นฐานได้ทั้งแบบคงที่และแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยค่าเริ่มต้นของปริมาณการไหลพื้นฐานสามารถกำหนดให้มีค่าเท่ากับค่าแรกของข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่กำหนดใน gauging station files (Q_0) สำหรับการประเมินการไหลพื้นฐานแบบคงที่ จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ Q_0 ตลอดช่วงเวลาที่ทำการศึกษา ในขณะที่ปริมาณการไหลพื้นฐานแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ (26)

$$Qb_i = BR(Qb_{i-1}) + BC(Qr)^{BM} \quad (26)$$

โดยที่ Qb_i และ Qb_{i-1} คือ ปริมาณการไหลพื้นฐานสำหรับช่วงเวลา i และ $i-1$ ตามลำดับ, BR คือ แฟกเตอร์ถดถอยของปริมาณการไหลพื้นฐานรายวัน, BC คือ ค่าคงที่ของการไหลพื้นฐาน, BM คือ ค่าเลขกำลังการไหลพื้นฐาน

5. วิธีการศึกษา

งานวิจัยเรื่องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง SENSWAT-URBS และ FLEXL ในการประเมินน้ำท่า มีขั้นตอนในการดำเนินงานดังต่อไปนี้

- 1) รวบรวมข้อมูลน้ำฝนและข้อมูลน้ำท่าที่อยู่ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.21 ในช่วงเวลาระหว่าง ปี พ.ศ. 2546-2556
- 2) แบ่งพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.21 เป็นลุ่มน้ำย่อยโดยแบ่งจากสถานีวัดน้ำท่าที่อยู่ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.21 และตามขอบเขตลุ่มน้ำสาขาที่ทำการจัดแบ่งโดยกรมทรัพยากรน้ำ
- 3) หาขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ความยาวลำน้ำจากตำแหน่งด้านเหนือสุดบนทางน้ำถึงจุดใกล้ศูนย์ถ่วงบนทางน้ำของแต่ละลุ่มน้ำย่อย และจากจุดใกล้

ศูนย์ถ่วงบนทางน้ำของแต่ละลุ่มน้ำย่อยถึงตำแหน่งด้านท้ายน้ำสุดบนทางน้ำของแต่ละลุ่มน้ำย่อย

4) สอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า E.21 โดยผลการสอบเทียบแบบจำลองจะได้ปริมาณน้ำท่าที่ 4 สถานีวัดน้ำท่า ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า E.21 ซึ่งประกอบด้วยผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23 และ E.6C จากนั้นจึงนำข้อมูลน้ำท่าที่ประเมินได้ที่ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าดังกล่าวมาตรวจสอบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าของแบบจำลองโดยนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำท่าที่ได้จากสถานีตรวจวัดเหล่านั้น

5) สอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23 และ E.6C และตรวจสอบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าของแบบจำลองโดยนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำท่าที่ได้จากสถานีตรวจวัดเหล่านั้น

6) เปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าระหว่างผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23 และ E.6C ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า E.21 และผลจากการสอบเทียบแบบจำลองที่แต่ละสถานีโดยตรง

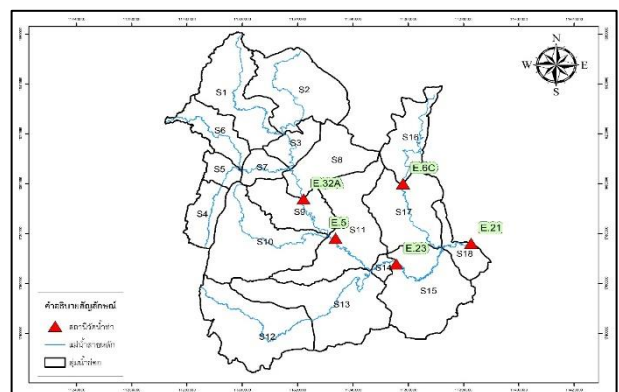
7) สอบเทียบแบบจำลอง FLEXL ที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23, E.6C และ E.21 และตรวจสอบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าของแบบจำลองโดยนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำท่าที่ได้จากสถานีตรวจวัดเหล่านั้น

8) เปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าระหว่างผลการประเมินน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL ที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23 และ E.6C กับผลจากการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่แต่ละสถานีโดยตรง

6. ผลการศึกษา

6.1 ผลการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย

ผลการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่า E.21 โดยแบ่งตามขอบเขตลุ่มน้ำสาขาของกรมทรัพยากรน้ำ และตามสถานีวัดน้ำท่าที่อยู่ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.21 พบว่า สามารถแบ่งลุ่มน้ำย่อยออกเป็น 18 ลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยมีขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยเปลี่ยนแปลงจาก 57 ถึง 894 ตารางกิโลเมตร และมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยเท่ากับ 489 ตารางกิโลเมตร

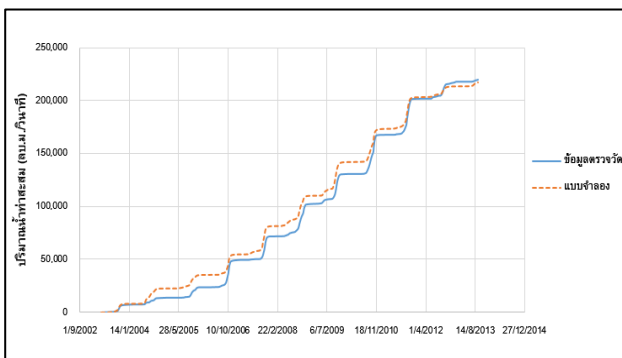


รูปที่ 3 ลุ่มน้ำย่อยและตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่าที่อยู่ในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า E.21

6.2 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS

ผลการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS ในช่วงปี พ.ศ. 2546-2556 แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ 1) ผลการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า E.21 รวมทั้งที่ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23 และ E.6C ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า E.21 และ 2) ผลการสอบเทียบโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23 และ E.6C โดยแสดงรายละเอียดของผลการสอบเทียบในแต่ละกรณีดังต่อไปนี้

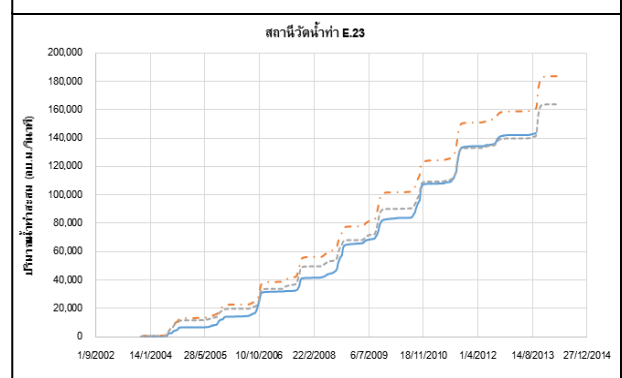
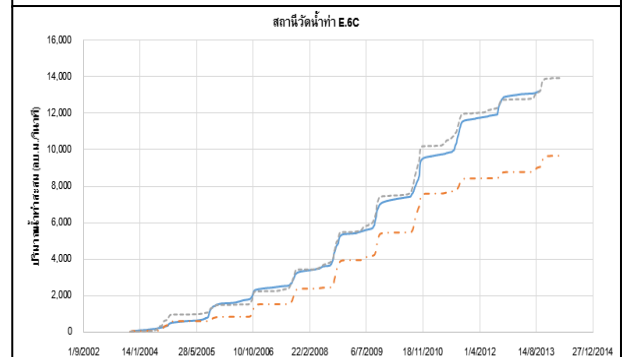
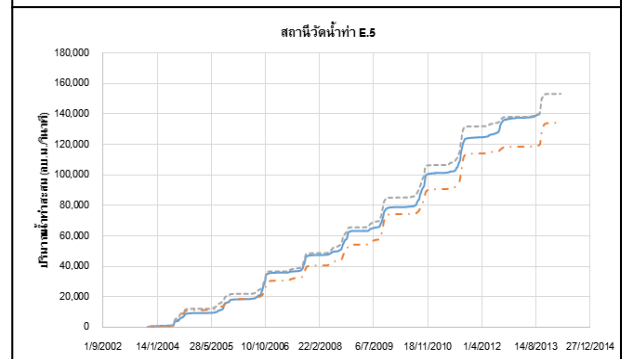
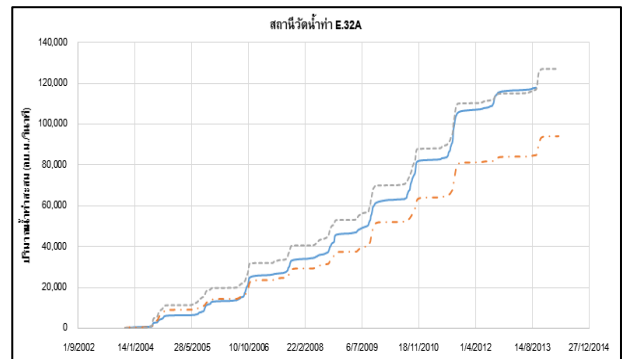
กรณีที่ 1 ผลการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า E.21 ในช่วงปี พ.ศ. 2546-2556 แสดงดังในรูปที่ 4 โดยรูปดังกล่าวได้แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณน้ำท่าสะสมที่ได้จากแบบจำลอง SENSWAT-URBS และที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำท่า E.21 ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์ค่าดัชนี NSE พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.81 นอกจากนั้นแล้ว ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23 และ E.6C ที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า E.21 พบว่า NSE มีค่าเท่ากับ 0.68, 0.77, 0.82 และ 0.56 ตามลำดับ



รูปที่ 4 ปริมาณน้ำท่าสะสมที่ได้จากแบบจำลอง SENSWAT-URBS และที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำท่า E.21

กรณีที่ 2 ผลการสอบเทียบโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23 และ E.6C พบว่าดัชนี NSE มีค่าเท่ากับ 0.84, 0.87, 0.81 และ 0.69 ตามลำดับ

ในการศึกษานี้ได้นำผลการประเมินน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS ของกรณีที่ 1 มาเปรียบเทียบกับกรณีที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยในรูปดังกล่าวได้แสดงการเปรียบเทียบระหว่างกราฟปริมาณน้ำท่าสะสมที่ได้จากแบบจำลอง SENSWAT-URBS ของกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 และที่ได้จากสถานีตรวจวัด ทั้งนี้ ผลการเปรียบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23 และ E.6C พบว่า NSE ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองในกรณีที่ 1 ให้ค่าต่ำกว่ากรณีที่ 2 เท่ากับ 19.05%, 11.49%, 1.20%, และ 18.14% ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าผลการประเมินกราฟน้ำท่าที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า E.21 มีความถูกต้องน้อยกว่าในกรณีที่ทำการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่าต่าง ๆ โดยตรงอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับพื้นที่รับน้ำฝนน้อย ๆ



โดยที่

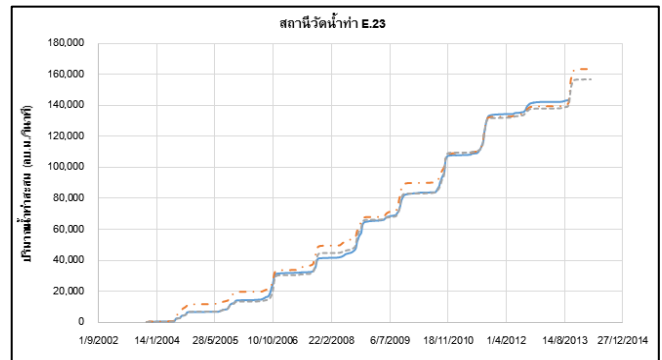
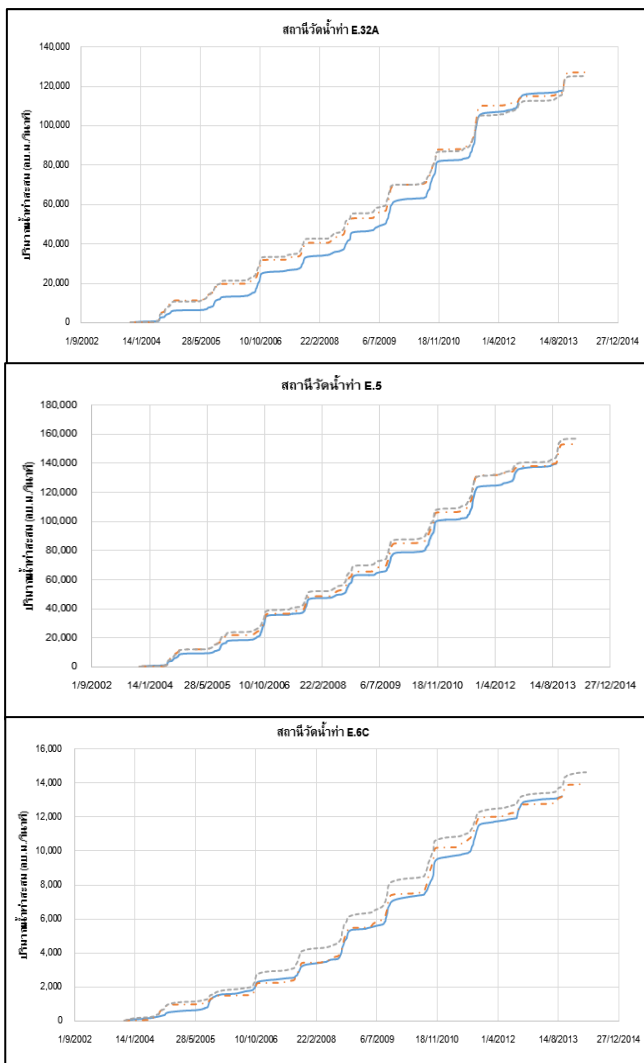
- ข้อมูลตรวจวัด
- - - กรณีที่ 1: ผลพลอยได้จาก SENSWAT-URBS
- - - กรณีที่ 2: ผลการสอบเทียบโดยตรงในแต่ละสถานี

รูปที่ 5 ปริมาณน้ำท่าสะสมที่ได้จากแบบจำลอง SENSWAT-URBS ทั้ง 2 กรณี และที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23 และ E.6C

6.3 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEX_L

ผลการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23, E.6C และ E.21 ในช่วงปี พ.ศ. 2546-2556 พบว่า NSE มีค่าเท่ากับ 0.80, 0.86, 0.85, 0.71 และ 0.82 ตามลำดับ

ในการศึกษาได้นำผลการประเมินน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23 และ E.6C มาเปรียบเทียบกับผลการประเมินน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลอง FLEX_L ที่สถานีวัดน้ำท่าเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำท่าสะสมที่ได้จากแบบจำลอง SENSWAT-URBS มีความถูกต้องใกล้เคียงกับปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดมากกว่าที่ได้จากแบบจำลอง FLEX_L ใน 2 สถานี คือ ที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A และ E.5 โดยแบบจำลอง SENSWAT-URBS ให้ค่า NSE มากกว่าในกรณีของแบบจำลอง FLEX_L เท่ากับ 4.76% และ 1.15% ตามลำดับ ในขณะที่แบบจำลอง FLEX_L ให้ค่า NSE มากกว่าแบบจำลอง SENSWAT-URBS ใน 2 สถานี คือ ที่สถานีวัดน้ำท่า E.23 และ E.6C โดยให้ค่า NSE ที่มากกว่า 2.41% และ 2.90% ตามลำดับ



โดยที่

- ข้อมูลตรวจวัด
- - - SENSWAT-URBS
- - - FLEX_L

รูปที่ 6 ปริมาณน้ำท่าสะสมที่ได้จากแบบจำลอง SENSWAT-URBS และแบบจำลอง FLEX_L และที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23 และ E.6C

7. สรุปผลการศึกษา

แบบจำลอง SENSWAT-URBS ได้รับการพัฒนาในการศึกษานี้ภายใต้การดำเนินงานของศูนย์วิจัย SENSWAT โดยแบบจำลอง SENSWAT-URBS เป็นแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัว (Semi-distributed model) ที่สามารถประเมินน้ำท่าได้ที่สถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลองรวมทั้งในลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่าที่สอบเทียบแบบจำลองหรือลุ่มน้ำที่ไม่มีสถานีวัดน้ำท่าตั้งอยู่ ทั้งนี้แบบจำลอง SENSWAT-URBS ได้รับการพัฒนาจากแบบจำลอง URBS เพื่อให้สามารถสอบเทียบแบบจำลองได้โดยอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม MOSCEM ซึ่งเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Function) ผลการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า E.21 ซึ่งเป็นสถานีวัดน้ำท่าในลุ่มน้ำชีและมีพื้นที่รับน้ำเท่ากับ 8,340 ตารางกิโลเมตรพบว่า ให้ค่า NSE เท่ากับ 0.81 ในขณะที่การสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีเดียวกันโดยแบบจำลอง FLEX_L ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทลิมฟ์พบว่า ให้ค่า NSE เท่ากับ 0.82 ซึ่งนับว่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจากการสอบเทียบแบบจำลอง SENSWAT-URBS ที่สถานีวัดน้ำท่า E.21 สามารถให้ผลพลอยได้ของการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A, E.5, E.23 และ E.6C ในขณะที่แบบจำลอง FLEX_L ต้องทำการสอบเทียบในแต่ละสถานีวัดน้ำท่า ทั้งนี้ การสอบเทียบแบบจำลองโดยตรงด้วยแบบจำลอง FLEX_L ที่สถานีวัดน้ำท่าย่อมมีความเป็นไปได้สูงที่จะให้ผลการประเมินน้ำท่าที่ถูกต้องกว่าในกรณีของผลการประเมินน้ำท่าที่เป็นผลพลอยได้จากแบบจำลอง SENSWAT-URBS อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษากลับพบว่า ผลการประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง SENSWAT-URBS ใน 2 สถานี คือ ที่สถานีวัดน้ำท่า E.32A และ E.5 ให้ผลที่ถูกต้องกว่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองโดยตรงด้วยแบบจำลอง FLEX_L ในขณะที่ผลการประเมินน้ำท่าในอีก 2 สถานี คือ ที่สถานีวัดน้ำท่า E.23 และ E.6C ให้ผลในทางตรงกันข้าม ซึ่งผลการศึกษาที่ได้นับว่าเป็นการแสดงให้เห็นศักยภาพของแบบจำลอง

SENSWAT-URBS ที่สามารถประเมินน้ำท่าสำหรับพื้นที่ที่ไม่มีสถานีตรวจวัดได้ใกล้เคียงกับปริมาณน้ำท่าที่ควรจะเป็น อย่างไรก็ตาม จากการใช้แบบจำลอง SENSWAT-URBS ในการศึกษาได้พบประเด็นที่สามารถนำไปพัฒนาความสามารถของแบบจำลองเพื่อเพิ่มความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าให้มากขึ้นก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำของประเทศไทยต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยเพื่อการดำเนินงานของศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management; SENSWAT) รวมทั้งกรมชลประทาน และกรมอุตุฯ ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลต่าง ๆ เพื่อการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] K.D. Sharma and S. Singh, "Runoff estimation using Landsat Thematic Mapper data and the SCS model," Hydrological Sciences Journal, vol. 37, no. 1, pp. 39-52, 1992/02/01 1992.
- [2] Sugawara, M. (1974). Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune. Research Notes of the National Research Center for Disaster Prevention, 11, pp.1-64.
- [3] Gan, T.Y., Dlamini, E.M., Biftu, G.F., 1997. Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions on hydrologic modeling. Journal of Hydrology. 192, 81-103.
- [4] F. Fenicia, H. H. G. Savenije, P. Matgen, and L. Pfister, "Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement," Water Resources Research, vol. 44, no. 1, 2008/01/01 2008.
- [5] สุพรรณษา บำรุงพงศ์, นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์, สุรัชย์ ลิปิวัฒนาการ, 2550. ความสัมพันธ์แบบลุ่มน้ำรวมระหว่างพารามิเตอร์ของแบบจำลอง NAM และลักษณะเฉพาะทางกายภาพของลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำบึงตอนบน. การประชุมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12 โรงแรมมรินทร์ลากูน, จ.พิษณุโลก. 24 พฤษภาคม.
- [6] T. Malone, "Using URBS for Real Time Flood Modeling," presented at the 2nd international Conference on Water Resources & Environment Research, Brisbane, Qld. 1999.
- [7] R. P. De Silva, N. D. K. Dayawansa, and M. D. Ratnasiri, "A comparison of methods used in estimating missing rainfall data," Journal of Agricultural Sciences-Sri Lanka, vol. 3(2), pp. 101-108, 2007.
- [9] E.M. Laurenson and R.G. Mein, Version 4 Runoff Routing Program User Manual: Dept of Civil Engineering, Monash University. Australia, 1990. [Online]. Available

- [10] นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์, อุทกวิทยาขั้นสูง (ADVANCED HYDROLOGY). ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 651 หน้า, 2556.