



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองอุทกวิทยา KW-GIUH และ BTOPMC ในการจำลองน้ำท่าในลุ่มน้ำยมตอนบน

Performance Assessment of the Hydrological Models KW-GIUH and BTOPMC for River Runoff Simulation in Upper Yom River Basin

ชาญชัย เพชรพงศ์พันธุ์¹ ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์^{1*} ดวงฤดี โฆษิตกิตติวงศ์¹ Kwan Tun Lee²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

² National Taiwan Ocean University

Chanchai Petpongpan¹ Chaiwat Ekkawatpanit^{1*} Duangrudee Kositgittiwong¹ Kwan Tun Lee²

¹ Civil Engineering Department, King Mongkut's University of Technology Thonburi

² National Taiwan Ocean University

* Corresponding author.

126 แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

E-mail: chaiwat.ekk@kmutt.ac.th; Telephone: 0 2470 9302

บทคัดย่อ

แบบจำลองทางอุทกวิทยาได้รับการพัฒนาขึ้นโดยประยุกต์ใช้หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวกับอุทกวิทยาร่วมกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ ซึ่งในปัจจุบันแบบจำลองทางอุทกวิทยามีอยู่หลายชนิด อีกทั้งยังมีบทบาทสำคัญอย่างมากในการศึกษาวิจัยรวมถึงงานทางด้านวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองทางด้านอุทกวิทยาชนิด Semi-distributed ในการจำลองสภาพน้ำท่าที่บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนบน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่อยู่ทางตอนเหนือของประเทศไทย และประสบกับปัญหาอุทกภัยอยู่เป็นประจำ โดยได้พิจารณาเลือกใช้แบบจำลอง KW-GIUH และ BTOPMC ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลทางด้านธรณีวิทยาในการกำหนดลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ลุ่มน้ำร่วมกับปริมาณฝนที่เกิดขึ้นจากพายุฝนในการจำลองสภาพน้ำท่า โดยในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง ผลการจำลองจะได้รับการประเมินในขั้นตอนการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์ด้วยการเปรียบเทียบกับข้อมูลอัตราการไหลที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีตรวจวัดของกรมชลประทาน และใช้ค่าสัมประสิทธิ์ Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพ จากนั้นนำค่าประสิทธิภาพระหว่างสองแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับกันเพื่อที่จะสามารถนำแบบจำลองไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมกับสถานการณ์และมีความแม่นยำในการจำลองสูงสุด ซึ่งผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองทั้งสองชนิดสามารถประเมินน้ำท่ารายชั่วโมงในพื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนบนได้เป็นอย่างดี โดยมีค่า NSE มากกว่า 0.75 ขึ้นไป แต่แบบจำลอง KW-GIUH มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบจำลอง BTOPMC เล็กน้อย

คำสำคัญ

แบบจำลองอุทกวิทยา KW-GIUH BTOPMC ลุ่มน้ำยมตอนบน การประเมินประสิทธิภาพ

Abstract

The hydrological models have been invented by using principle of hydrology and mathematical model. Currently, there are several types of hydrological model. The hydrological models are important equipment for research and working in water resources engineering. The objective of this study to assess a performance of semi-distributed model for runoff simulation in Upper Yom River basin, which located in north of Thailand and suffer frequent floods. The hydrological models included in the study are KW-GIUH and BTOPMC model, which are semi-distributed model that use geological

data to define the physical characteristics of sub-watershed and rainfall from storm event for runoff simulation. For assessing the model performance, the results of the calibration and validation method of the two models were investigated by comparing with the discharge data from observation stations and using the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient to assess the model performance. Then, the performances of both models are compared in order to identify the appropriate hydrological model for the situation with high precision. The results revealed that both model can be simulated hourly runoff in Upper Yom River basin satisfactory. The NSE are higher than 0.75, but KW-GIUH has a slightly better performance than BTOPMC.

Keywords

hydrological model; KW-GIUH; BTOPMC; upper Yom river basin; performance assessment

1. บทนำ

แบบจำลองทางด้านอุทกวิทยาถูกคิดค้นขึ้นมาเมื่อประมาณกลางศตวรรษที่ 19 เพื่อใช้ในงานทางด้านวิศวกรรม โดยการนำหลักการและทฤษฎีทางด้านอุทกวิทยามาประยุกต์ใช้ร่วมกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาให้แบบจำลองสามารถใช้งานได้หลากหลายและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาหรือแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งแบบจำลองทางด้านอุทกวิทยาสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทได้แก่ Empirical Conceptual และ Physically-based โดยแบบจำลองประเภท conceptual จะมีด้วยกันทั้งหมด 3 ชนิดแบ่งตามรูปแบบของการประมวลผลเชิงพื้นที่ คือ รวมตัวแปร กึ่งกระจายตัวแปร และกระจายตัวแปร ซึ่งแบบจำลองชนิดกระจายตัวแปร มีการวิเคราะห์กระบวนการทางอุทกวิทยาตามทฤษฎีและหลักการทางฟิสิกส์อย่างง่าย มีการระบุลักษณะทางด้านกายภาพของพื้นที่จากข้อมูลที่ได้มาจากการตรวจวัดทำให้มีความใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง อีกทั้งมีการแบ่งพื้นที่ทั้งหมดออกเป็นพื้นที่ย่อย และสามารถเพิ่มเติมตัวแปรตัวหรือปัจจัยต่าง ๆ ได้หลากหลาย จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานและการศึกษาวิจัยทางด้านอุทกวิทยา ยกตัวอย่างเช่น TOPMODEL KW-GIUH และ SWAT [1]

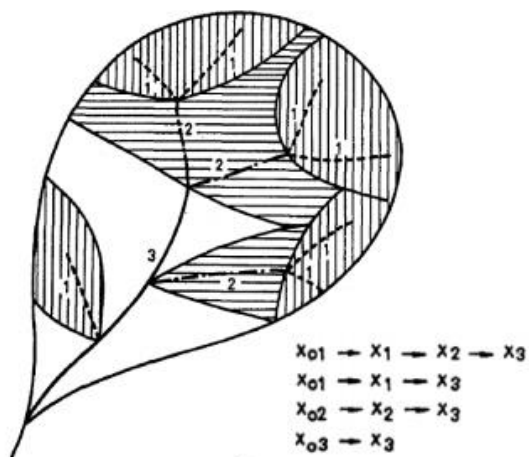
ในพื้นที่บริเวณตอนบนของกลุ่มน้ำยมถือเป็นหนึ่งในพื้นที่ที่ประสบกับปัญหาอุทกภัยและดินโคลนถล่มเป็นประจำทุกปี เพราะลักษณะภูมิประเทศเป็นพื้นที่ราบที่มีความลาดชันค่อนข้างมาก อีกทั้งประชาชนส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ประกอบกับการขยายตัวของชุมชนเมืองตลอดช่วงระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาทำให้เมื่อเกิดอุทกภัยจะมีความเสียหายเกิดขึ้นค่อนข้างรุนแรง ซึ่งในปัจจุบันหน่วยงานต่าง ๆ

ที่เกี่ยวข้องพยายามศึกษาถึงระบบเตือนภัยน้ำท่วมและวางแผนในการป้องกันเพื่อให้เกิดความเสียหายน้อยที่สุด ด้วยเหตุนี้เองแบบจำลองทางอุทกวิทยาจึงมีบทบาทที่สำคัญอย่างมาก ในการประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์ทางอุทกวิทยา หากแบบจำลองมีประสิทธิภาพและความแม่นยำมากก็จะสามารถช่วยให้การวางแผนเพื่อป้องกัน หรือแก้ไขสถานการณ์วิกฤตต่าง ๆ สามารถทำได้เหมาะสมและทันทั่วทั้งที่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและใช้งานแบบจำลองทางอุทกวิทยานิดกึ่งกระจายตัวแปรได้แก่ KW-GIUH และ BTOPMC เพื่อประเมินน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนบนขณะเกิดอุทกภัย รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการใช้งาน

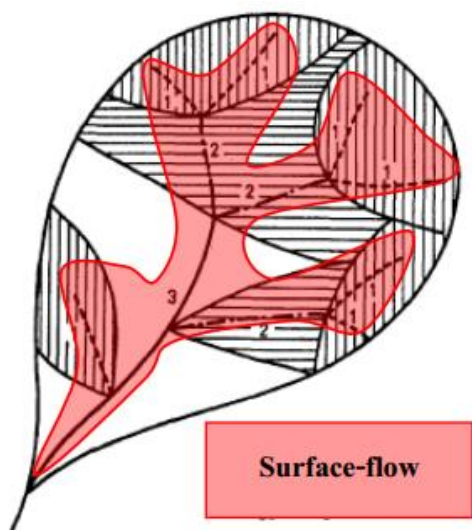
2. แบบจำลอง Kinematic Wave-Geomorphic Instantaneous Unit Hydrograph (KW-GIUH)

KW-GIUH คือแบบจำลองน้ำฝนน้ำท่าชนิด Physically-based model มีรูปแบบการประมวลผลเชิงพื้นที่แบบกึ่งกระจายตัวแปร พัฒนาโดย Kwan Tun Lee และ Ben Chie Yen ซึ่งนำแบบจำลอง GIUH มาพัฒนา เป็นแบบจำลองที่มีการนำหลักการของการสร้างกราฟน้ำท่าหนึ่งหน่วยที่เกิดจากปริมาณฝนที่มีช่วงเวลาการตกที่สั้นมาก ๆ (Instantaneous Unit Hydrograph, IUH) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับข้อมูลทางด้านธรณีสัณฐาน (Geomorphology) เพื่อใช้ในการจำลองสภาพน้ำท่าของกลุ่มน้ำที่เกิดจากปริมาณน้ำฝน โดยใช้วิธีการจัดลำดับโครงข่ายลำน้ำ (Stream order system) ของ Strahler ในการกำหนดเส้นทางการไหลของทั้งน้ำท่าผิวดิน (Surface flow) และน้ำใต้ดิน (Subsurface flow) ดังรูปที่ 1

กำหนดให้ x_{oi} คือลำดับการไหลของน้ำบนพื้นดิน x_i คือลำดับการไหลของน้ำในลำน้ำซึ่งมีลำดับการไหลคือ



รูปที่ 1 เส้นทางการไหลของน้ำท่าจากหลักการของ Strahler [2]



รูปที่ 2 ตัวอย่างขอบเขตของพื้นที่รับน้ำฝนลุ่มน้ำ [2]

$i = 1, 2, 3, \dots, n$ และ ω คือเส้นทางการไหลเฉพาะของน้ำท่าจาก $x_{oi} \rightarrow x_i \rightarrow \dots \rightarrow x_n$ ดังนั้นจะได้สมการความน่าจะเป็นของการลดลงของปริมาณฝนคือ

$$P(\omega) = R_{PCA} [P_{OA_i} P_{x_{oi}} \dots P_{x_i x_j} \dots P_{x_k x_n}] \quad (1)$$

โดยที่ R_{PCA} คือ อัตราส่วนของขอบเขตพื้นที่ที่ดินมีความอึดตัวต่อขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมดดังรูปที่ 2 มีค่าระหว่าง $0-1$ P_{OA_i} คือ อัตราส่วนของพื้นที่รับน้ำของลำน้ำ i ต่อพื้นที่ทั้งหมดของลุ่มน้ำ $P_{x_{oi}}$ คือความน่าจะเป็นของการลดลงของปริมาณน้ำฝนเนื่องมาจากการเปลี่ยนผ่านการไหลจากพื้นที่ต้นน้ำลำน้ำ i และ

$P_{x_i x_j}$ คือความน่าจะเป็นของการลดลงของปริมาณน้ำฝนเนื่องมาจากการเปลี่ยนผ่านการไหลจากลำน้ำ i ไปยังลำน้ำ j

ในส่วนของเวลาการไหลรวมตัวกำหนดให้ $T_{x_{oi}}$ คือช่วงเวลาการไหลของน้ำฝนตั้งแต่ตกลงสู่พื้นดินจนกระทั่งไหลลงสู่ลำน้ำ i และ T_{x_i} คือเวลาที่ใช้ในการไหลตลอดความยาวของลำน้ำ i ไปสู่ลำน้ำลำดับถัดไปหรือทางออกดังนั้นช่วงเวลาของการไหลที่ใช้ทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$T_\omega = T_{x_{oi}} + T_{x_i} + T_{x_j} + T_{x_n} \quad (2)$$

เมื่อกำหนดให้ $f(t)$ คือฟังก์ชันความน่าจะเป็นของเวลาการไหลรวมตัวและจากหลักการของการสร้าง Instantaneous Unit Hydrograph (IUH) จะทำให้สามารถสร้างกราฟน้ำท่าที่จุดทางออกได้จากสมการ

$$U(t) = \sum_{\omega=W} [f_{x_{oi}}(t) * \dots * f_{x_n}(t)] \cdot P(\omega) \quad (3)$$

โดยที่ $*$ คือกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้หาผลรวมของอนุกรมเวลาเรียกว่า Convolution integral

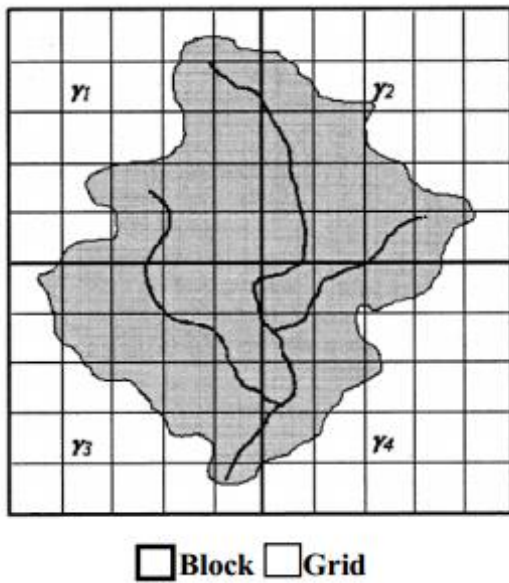
แต่เนื่องจากแบบจำลอง GIUH ยังมีปัญหาเกี่ยวกับเรื่องช่วงเวลาของการไหลรวมตัว (Travel Time) ดังนั้น Lee และ Yen จึงได้ทำการนำทฤษฎีคลื่นจลนศาสตร์ (Kinematic-wave) กับหลักการวิเคราะห์พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยของ Wooding มาประยุกต์ใช้จึงกลายมาเป็นแบบจำลอง Kinematic Wave - Geomorphic Instantaneous Unit Hydrograph (KW-GIUH) มีสมการสำหรับคำนวณหาเวลาการไหลรวมตัวดังนี้

$$T_{x_{oi}} = \left[\frac{n_o \bar{L}_{o_i}}{\bar{s}_{o_i}^{-1/2} \bar{L}_e^{m-1}} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

$$T_{x_{oi}} = \frac{B_i}{2i_e \bar{L}_{o_i}} \left[h_{co_i}^m + \frac{2i_e n_c \bar{L}_{o_i} \bar{L}_{c_i}}{B_i \bar{s}_{c_i}^{-1/2}} \right] - h_{co_i} \quad (5)$$

$$h_{co_i} = \left[\frac{i_e n_c (N_i \bar{A}_i - A P_{oA_i})}{N_i B_i \bar{s}_{c_i}^{-1/2}} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (6)$$

โดยที่ n_o คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของพื้นดิน n_c คือค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของลำน้ำ $\bar{s}_{o_i}$ คือ ค่าความลาดชันเฉลี่ยของพื้นที่รับน้ำ i $\bar{s}_{c_i}$ คือ ค่าความลาดชันเฉลี่ยของลำน้ำ i i_e คือ ค่าความเข้มฝน $\bar{L}_{o_i}$ คือ ค่าความยาวเฉลี่ยของพื้นที่รับน้ำของลำน้ำ i $\bar{L}_{c_i}$ คือ ค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นลำน้ำ i



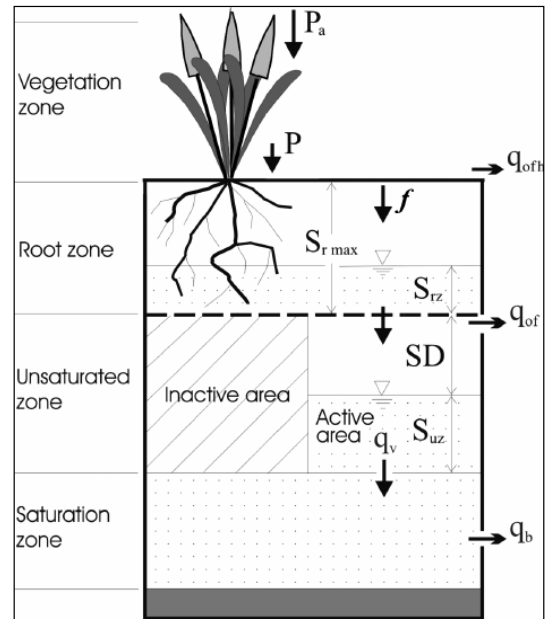
รูปที่ 3 การวิเคราะห์พื้นที่แบบ Block wise ของแบบจำลอง BTOPMC [5]

และ B_i คือ ค่าความกว้างของลำน้ำ i หาได้จากความกว้างที่จุดทางออกของกลุ่มน้ำคูณด้วยอัตราส่วนของความยาวเฉลี่ยของลำน้ำ i ต่อความยาวเฉลี่ยทั้งหมดของทุกลำน้ำ [3]

3. แบบจำลอง Block wise application of TOPMODEL using Muskingum-Cunge routing (BTOPMC)

BTOPMC คือ แบบจำลองน้ำฝนน้ำท่าชนิด Physically-based model มีรูปแบบการประมวลผลเชิงพื้นที่แบบ Semi-distributed model ถูกพัฒนาโดย Yamanashi University แห่งประเทศญี่ปุ่น เพื่อใช้ในการจำลองสภาพน้ำท่าในลุ่มน้ำที่มีขนาดใหญ่ โดยการนำเอาแบบจำลอง TOPMODEL ซึ่งคิดค้นขึ้นโดย Beven และ Kirkby มาประยุกต์ใช้งานโดยใช้การวิเคราะห์เชิงพื้นที่แบบแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมดออกเป็นช่อง (Block) ที่มีขนาดเท่า ๆ กันและในแต่ละช่องจะประกอบไปด้วยกริด (Grid) ดังรูปที่ 3 ทำให้สามารถจำลองสภาพน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีขนาดใหญ่ได้มากขึ้น

หลักการทางอุทกวิทยาแสดงดังรูปที่ 4 โดยปริมาณน้ำทั้งหมดประกอบไปด้วยน้ำท่าผิวดิน (overland flow, q_{of}) กับน้ำใต้ดิน (base flow, q_b) ซึ่งพฤติกรรมการไหลของน้ำในพื้นที่จะถูกควบคุมด้วยค่าความอิ่มตัวของดิน (Saturation



รูปที่ 4 กระบวนการทางอุทกวิทยาจากหลักการของแบบจำลอง BTOPMC [6]

deficit) ของพื้นที่นั้นกำหนดให้ $S(i,t)$ เป็นค่าความอิ่มตัวของดินที่บริเวณตำแหน่งกริด i หาได้จากสมการ

$$S(i,t) = S(t) + (\gamma - m \ln(a/T_0 \tan \beta)) \quad (7)$$

โดยที่ m คือ ค่าการยุบตัวของดินในหน่วยเมตร (decay factor) γ คือ ค่าเฉลี่ยของดัชนีคุณสมบัติทางกายภาพ (soil topographical index) $\ln(a/T_0 \tan \beta)$ คือค่าดัชนีคุณสมบัติทางกายภาพ ซึ่ง a คือ พื้นที่รับน้ำต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเส้นชั้นความสูง β คือ ค่าองศาของความชัน T_0 คือค่าการไหลของน้ำไปยังพื้นที่ด้านข้างในกรณีที่ดินอิ่มตัวและ $S(t)$ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าความอิ่มตัวของดินหาได้จากสมการ

$$S(t) = S(t-1) - q_v(t) + q_b(t) \quad (8)$$

โดยที่ $q_v(t)$ คือ อัตราการไหลของน้ำลงสู่ดินชั้นล่าง จากนั้นจะสามารถหาค่าปริมาณการเก็บกักของน้ำในชั้นดินต่าง ๆ ดังสมการ

$$S_{rz}(i,t) = S_{rz}(i,t-1) + R(i,t) - E(i,t) \quad (9)$$

$$S_{uz}(i,t) = S_{uz}(i,t-1) + [S_{rz}(i,t) - S_{rz\max}(i,t)] \quad (10)$$

โดยที่ $R(i,t)$ คือปริมาณน้ำฝนทั้งหมดที่ตกลงสู่พื้นที่กริด i E คืออัตราการระเหย $S_{rz}(i,t)$ คือปริมาณการเก็บกักของ

น้ำในชั้น root zone และ $S_{uz}(i,t)$ คือ ปริมาณการเก็บกักของน้ำในชั้น Unsaturated zone ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาปริมาณน้ำท่าผิวดิน (q_{of}) กับน้ำใต้ดิน (q_b) ได้จากสมการ

$$q_{of}(i,t) = [S_{uz}(i,t) - S(i,t)] \quad (11)$$

$$q_b(i,t) = T_0 e^{-S(i,t)/m} \tan \beta \quad (12)$$

นอกจากนี้ยังมีการใช้งานค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของดินและภูมิประเทศในพื้นที่ลุ่มน้ำในการกำหนดพฤติกรรมของสภาพน้ำท่าในแต่ละกริด ช่วยให้การจำลองสภาพน้ำท่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น [4]

และกำหนดเส้นทางการไหลของน้ำในลำน้ำโดยใช้ทฤษฎีของ Muskingum-Cunge ดังแสดงในรูปที่ 5 กลายเป็นแบบจำลองที่มีชื่อว่า Block wise application of TOPMODEL using Muskingum-Cunge routing (BTOPMC) ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ลุ่มน้ำที่มีขนาดใหญ่ ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะยังมีปัญหาตรงที่ไม่สามารถพิจารณาการไหลย้อนกลับของน้ำหรือการแผ่กระจายของระดับน้ำเมื่อเกิดการล้นได้ [5]

กำหนดให้ I คือปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและ O คือปริมาณน้ำที่ไหลออกผ่านหน้าตัดลำน้ำที่มีขนาด B_i สามารถคำนวณได้จาก

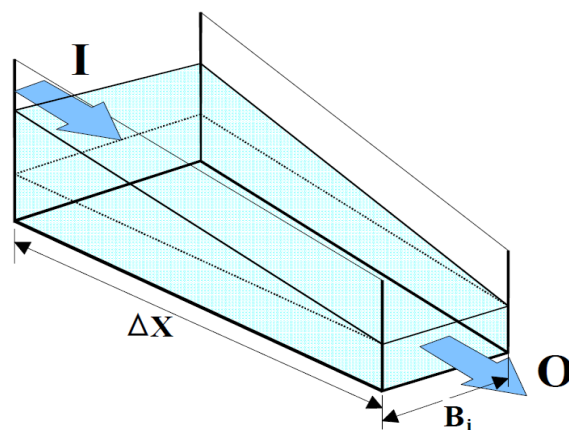
$$O(t+1) = C_1 I(t) + C_2 I(t) + C_3 I(t) \quad (13)$$

$$B_i = \alpha a_i^C \quad (14)$$

เมื่อ a_i คือ ขนาดของพื้นที่รับน้ำในหน่วย ตร.กม. และ α และ C คือ ค่าคงที่

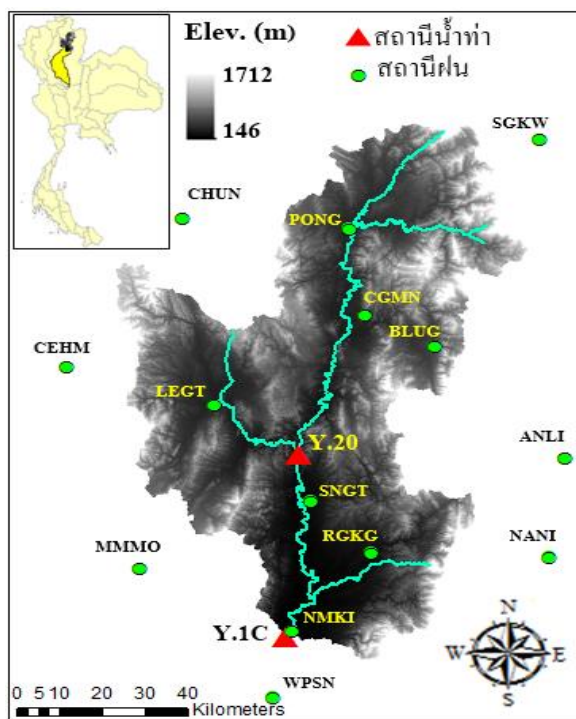
4. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนบนเป็นพื้นที่ลุ่มน้ำที่อยู่ทางตอนเหนือของประเทศไทย ดังรูปที่ 6 มีพื้นที่ครอบคลุมเนื้อที่ 4 จังหวัด ได้แก่ พะเยา น่าน ลำปางและแพร่ มีต้นกำเนิดที่ดอยขุนยวม ตั้งอยู่ในทิวเขาผีปันน้ำ พื้นที่อำเภอปงและอำเภอเชียงม่วน จังหวัดพะเยา ไหลผ่านหุบเขาที่มีความลาดชันมาก บางช่วงของพื้นที่เป็นที่ราบแคบก่อนที่จะไหลเข้าสู่จังหวัดแพร่ ผ่านไปยังอำเภอวังชิ้น เป็นการสิ้นสุดขอบเขตของพื้นที่ช่วงตอนบน



รูปที่ 5 การกำหนดเส้นทางการไหลของน้ำในลำน้ำด้วยวิธีการของ Muskingum-Cunge [7]

ของลุ่มน้ำ พื้นที่ประมาณร้อยละ 50 เป็นพื้นที่ป่าไม้ รองลงมา เป็นพื้นที่ที่ใช้ สำหรับการทำเกษตรกรรมร้อยละ 40 ที่เหลืออีกร้อยละ 10 เป็นที่อยู่อาศัยและชุมชน มีปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีของลุ่มน้ำ 1,160 มิลลิเมตรส่วนใหญ่มาจากพายุฝนที่เกิดขึ้นในช่วงฤดูฝนตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงตุลาคม คิดสัดส่วนเป็นประมาณร้อยละ 88 ของปริมาณน้ำฝนทั้งหมด และที่เหลืออีกร้อยละ 12 มาจากฤดูแล้งช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเมษายน ส่งผลให้มีปริมาณน้ำในแม่น้ำยมเฉพาะ ที่ไหลผ่านจังหวัดแพร่ซึ่งมีความยาวประมาณ 280 กิโลเมตร เป็นปริมาณ 1,538.5 ล้านลูกบาศก์เมตร คิดเป็นร้อยละ 41.85 ของปริมาณน้ำท่าทั้งหมดในพื้นที่ลุ่มน้ำยม โดยปริมาณน้ำส่วนใหญ่กว่าร้อยละ 80 ใช้เพื่อการเกษตร [8] และเนื่องจากพื้นที่ช่วงต้นน้ำมีขนาดความจุของลำน้ำค่อนข้างใหญ่โดยตั้งแต่ต้นน้ำถึงช่วงตอนกลางของลุ่มน้ำบริเวณอำเภอเมืองสุโขทัยมีความจุลำน้ำอยู่ระหว่าง 1,500–3,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีแต่ในช่วงถัดจากนี้ลงไปจนถึงตอนล่างของลุ่มน้ำค่าความจุของลำน้ำจะลดลงเหลือ 300–600 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีเพราะว่าส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เขตเมืองซึ่งมีการปลูกสร้างบ้านเรือนอยู่บริเวณริมแม่น้ำกันเป็นจำนวนมาก ลำน้ำจึงมีลักษณะเป็นคอขวดทำให้สภาพการระบายน้ำไม่ดีเท่าที่ควร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูฝน ประกอบกับลำน้ำยังมีลักษณะคดเคี้ยวไปมา และเป็นแม่น้ำหลักเพียงสายเดียวในลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาที่ไม่มีการก่อสร้างเขื่อนเก็บกักน้ำ ทำให้เกิดปัญหาอุทกภัยน้ำท่วมซ้ำซากขึ้นเมื่อน้ำไหลบ่าอย่างรุนแรงและปัญหาการขาดแคลนน้ำในฤดูแล้งเป็นประจำทุกปี ซึ่งปัญหาในเรื่องของน้ำท่วมที่เกิดขึ้นในพื้นที่ลุ่มน้ำยมนั้น



รูปที่ 6 ขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนบน

ถือเป็นปัญหาที่รุนแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ตอนบนของกลุ่มน้ำที่มีความลาดชันมากทำให้เกิดปัญหาดินโคลนถล่มตามมาส่งผลกระทบต่อผู้คนในพื้นที่อย่างมากทั้งในด้านทรัพย์สินและชีวิต [9]

5. วิธีการศึกษา

5.1 การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสภาพน้ำท่าที่บริเวณลุ่มน้ำยมตอนบน แบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ข้อมูลทางธรณีวิทยาและการใช้ประโยชน์ที่ดิน ประกอบด้วยแบบจำลองระดับชั้นความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model, DEM) ซึ่งใช้ในการกำหนดลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา มีผลต่อเส้นทางและเวลาการเดินทางของน้ำตั้งแต่ต้นน้ำลงสู่ลำน้ำไปยังจุดทางออก อีกทั้งยังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณน้ำที่จำลองได้ ดังนั้นในจำลองสภาพน้ำท่าที่ลุ่มน้ำยมตอนบนนี้จึงได้พิจารณาใช้ SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM ที่จัดทำขึ้นโดย NASA ที่มีการใช้ระบบคลื่นเรดาร์ในการสำรวจและจัดเก็บข้อมูลกว่าร้อยละ 80 ของพื้นผิวโลก ข้อมูลมีความละเอียด 90 เมตร ซึ่งเป็นข้อมูล

ทางด้านภูมิศาสตร์ที่นิยมนำมาใช้ในการวิจัยกันอย่างแพร่หลาย ส่วนข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นข้อมูลที่บ่งบอกลักษณะการใช้ที่ดินประเภทต่าง ๆ รวมถึงข้อมูลแผนที่จุดดินที่ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของดินในแต่ละพื้นที่ ซึ่งจะส่งผลต่อเส้นทางและเวลาที่ใช้ในการไหลของน้ำเช่นเดียวกัน โดยข้อมูลที่น่ามาใช้ในการจำลองเป็นข้อมูลที่ได้มาจาก กรมพัฒนาที่ดิน และส่วนที่สอง ข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยาในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนสะสมรายชั่วโมงจากสถานีตรวจวัดน้ำฝนของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (Hydro and Agro Informatics Institute) จำนวน 8 สถานี ส่วนข้อมูลน้ำท่าได้แก่ ระบายน้ำรายชั่วโมงกับตารางความสัมพันธ์ของระดับน้ำกับอัตราการไหล (Rating table) เป็นข้อมูลจากสถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.1C บ้านน้ำโค้ง ต.ป่าแมต อ.เมือง จ.แพร่ และ Y.20 บ้านห้วยสัก ต.เตาปูน อ.สอง จ.แพร่ของศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคเหนือตอนบน กรมชลประทาน

5.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะภูมิประเทศของทั้งแบบจำลอง KW-GIUH และ BTOPMC สามารถทำการวิเคราะห์ได้จากข้อมูลแบบจำลองระดับชั้นความสูงเชิงตัวเลข (DEM) แต่แบบจำลอง BTOPMC จะมีการนำข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินกับคุณสมบัติของดินมาประยุกต์ใช้ร่วมด้วย แบบจำลอง BTOPMC สามารถวิเคราะห์ทั้งตัวแปรทางด้านลักษณะภูมิประเทศและตัวแปรเชิงอุทกวิทยาได้ แต่สำหรับแบบจำลอง KW-GIUH ต้องทำการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดก่อนที่จะนำเข้า โดยการวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะภูมิประเทศจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การวิเคราะห์ลำดับการไหลของลำน้ำ (Stream order) และพื้นที่รับน้ำย่อย (Sub-watershed) ด้วยวิธีของ Strahler ซึ่งใช้เส้นโครงข่ายลำน้ำ (Stream network) และทิศทางการไหลของน้ำ (Flow direction) ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูล DEM และการวิเคราะห์ค่าความลาดชันเฉลี่ย (Slope) ของพื้นที่รับน้ำย่อยและลำน้ำ โดยการใช้ข้อมูล DEM ในการวิเคราะห์และหาค่าความลาดชันเฉลี่ยของแต่ละพื้นที่รับน้ำย่อย ส่วนค่าความลาดชันเฉลี่ยของลำน้ำหาได้จากอัตราส่วนระหว่างผลต่างของระยะในแนวตั้งต่อผลต่างของระยะในแนวราบของเส้นลำน้ำ และนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละลำดับการไหล

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง KW-GIUH และ BTOPMC

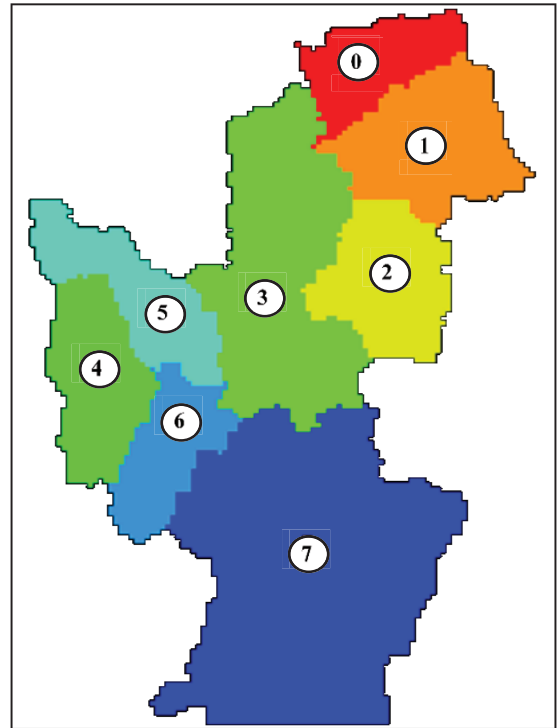
Model	Parameter	Value
KW-GIUH	Overland flow roughness coefficient (n_o)	0.1-0.8
	Channel flow roughness coefficient (n_c)	0.01-0.2
	Ratio of the surface-flow region to the total area of watershed (R_{PCA})	0.1-1.0
BTOPMC	The saturated transmissivity of soil (T_o)	0.1-100 (m^2/h)
	The decay factor of T_o (m)	0.01-0.3 m
	The capability of root zone storage (S_{rmax})	0.001-0.02 m
	The initial saturation deficit of soil (S_{bar0})	0.05-0.8 m
	The manning roughness coefficient (n)	0.01-0.2

ขณะที่ตัวแปรเชิงอุทกวิทยา ประกอบด้วย ปริมาณน้ำฝนที่จะนำมาใช้ในการจำลองสภาพน้ำท่า ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นฝนทั้งหมดที่ตกลงสู่พื้นที่รับน้ำจากข้อมูลฝนมากกว่าสามสถานีขึ้นไปได้ด้วยวิธีการประมาณค่าเชิงพื้นที่ชนิด Trend Surface Analysis ที่เรียกว่า Thiessen Polygon และค่าอัตราการไหลของน้ำท่ารายชั่วโมงที่จะนำมาใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง สามารถหาได้จากการเทียบค่าระดับน้ำรายชั่วโมงกับตารางความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำกับอัตราการไหล (Rating table) ที่แต่ละสถานีตรวจวัดน้ำท่า

5.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ คือ ค่าที่แสดงถึงปัจจัยทางด้านกายภาพที่มีผลต่อการจำลองสภาพน้ำท่า โดยส่วนใหญ่มักพิจารณาจากข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน และค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน ซึ่งแบบจำลอง KW-GIUH และ BTOPMC มีค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1

จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดรวมถึงค่าพารามิเตอร์มาจัดเรียงตามรูปแบบที่แบบจำลองกำหนด ก่อนที่จะทำการนำเข้าข้อมูลกำหนดค่าเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ใช้ในการประมวลผลของแบบจำลอง

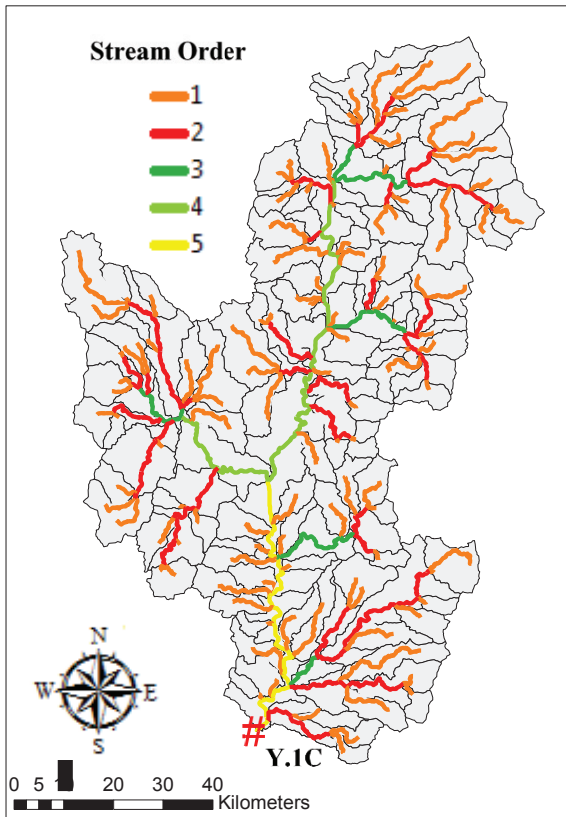


รูปที่ 7 เส้นลำดับชั้นการไหลลำน้ำและพื้นที่รับน้ำย่อย

เช่น ช่วงระยะเวลาที่ทำการจำลอง เป็นต้น แล้วจึงประมวลผลด้วยแบบจำลอง

5.4 การสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง

ในการจำลองสภาพน้ำท่าที่พื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนบนนี้ได้ทำการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง โดยการเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการจำลองกับค่าที่ตรวจวัดได้ที่สถานีตรวจวัดน้ำท่า Y.1C โดยใช้ผลการจำลองในช่วงระหว่างวันที่ 9-14 สิงหาคม กับ 30 สิงหาคม-4 กันยายน พ.ศ. 2556 ในการสอบเทียบแบบจำลอง และตรวจพิสูจน์แบบจำลองในช่วงระหว่างวันที่ 30 สิงหาคม-6 กันยายน พ.ศ. 2557 ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่าปริมาณความชื้นฝนและอัตราการไหลสูงสุดในแต่ละปี อีกทั้งยังมีอุทกภัยเกิดขึ้นในพื้นที่ โดยใช้ค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพแบบจำลอง Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) ในการตรวจสอบความสอดคล้องของผลการจำลองกับข้อมูลตรวจวัด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (15) โดยดัชนี NSE จะมีค่า 0-1 หากผลการจำลองมีความใกล้เคียงค่าที่ได้จากการตรวจวัด ดัชนี NSE จะมีค่าเข้าใกล้ 1



รูปที่ 8 พื้นที่รับน้ำย่อย จากแบบจำลอง BTOPMC

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i' - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (15)$$

โดยที่ Y_i คือ ค่าที่ได้จากการตรวจวัด Y_i' คือ ค่าที่ได้จากการจำลอง และ $\bar{Y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของ Y_i

5.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

เปรียบเทียบผลการจำลองน้ำท่าในบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำยมตอนบนของทั้งสองแบบจำลองจากผลการจำลองที่ผ่านการสอบเทียบและตรวจพิสูจน์แบบจำลอง โดยพิจารณาจากกราฟน้ำท่าที่นำมาพลอตเพื่อเปรียบเทียบกับ ค่าสัมประสิทธิ์ NSE ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง รวมไปถึงข้อมูลที่ใช้ในการนำเข้าและลักษณะการประมวลผลเชิงพื้นที่ ซึ่งจะทำได้สามารถทราบถึงขีดจำกัดและความสามารถของแบบจำลองเพื่อที่จะนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ด้านการใช้ประโยชน์ที่ดินของแบบจำลอง BTOPMC

Landuse Type	S_{rmax} (m.)
นาข้าว	0.004
ป่าไม้	0.004
พืชไร่ พืชสวน	0.01
ชุมชนเมือง	0.01
แหล่งน้ำ	0.03
อื่น ๆ	0.03

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์แบบจำลอง BTOPMC

Subbasin	m (m.)	n_0	S_{bar}^0 (m.)
0	0.01	0.001	0.01
1	0.01	0.001	0.01
2	0.01	0.001	0.01
3	0.1	0.005	0.1
4	0.06	0.02	0.2
5	0.06	0.02	0.2
6	0.1	0.005	0.2
7	0.007	0.017	0.2

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ชุดดินของแบบจำลอง BTOPMC

Soil Type	T_0 (m ² /h)
Clay	10
Sand	40
Slit	60

6. ผลการศึกษา

6.1 การประมวลผลเชิงพื้นที่

แบบจำลอง KW-GIUH ใช้รูปแบบการประมวลผลเชิงพื้นที่ โดยการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งหมดออกเป็นพื้นที่ย่อยตามขอบเขตพื้นที่รับน้ำของแต่ละเส้นการไหลของลำน้ำ (Stream Order) ที่ได้จากโปรแกรม ArcGIS ตามรูปที่ 7 และค่าที่บ่งบอกถึงลักษณะทางกายภาพต่าง ๆ จะถูกกำหนดโดยการเฉลี่ยเป็นค่าเดียวต่อพื้นที่รับน้ำย่อยของแต่ละเส้นลำดับชั้นการไหล แต่สำหรับค่าพารามิเตอร์ได้แก่ค่า n_o n_c และ R_{PCA} จะใช้เป็นค่าเดียวต่อทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำ และสามารถทราบผลการจำลอง

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์แบบจำลอง KW-GIUH

Parameter	Value
n_o	0.70
n_c	0.20
R_{PCA}	0.23

ตารางที่ 6 ค่า NSE ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง

สอบเทียบ (Calibration)	แบบจำลอง	NSE
9-14 สิงหาคม พ.ศ. 2556	KW-GIUH	0.945
	BTOPMC	0.927
30 สิงหาคม-4 กันยายน พ.ศ. 2556	KW-GIUH	0.969
	BTOPMC	0.933
ตรวจพิสูจน์ (Validation)	แบบจำลอง	NSE
30 สิงหาคม-6 กันยายน พ.ศ. 2557	KW-GIUH	0.843
	BTOPMC	0.788

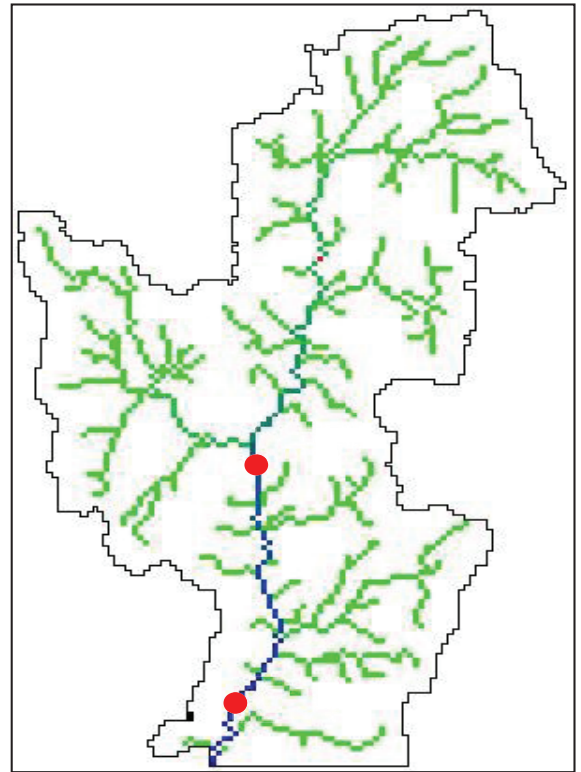
น้ำท่าได้เฉพาะที่ตำแหน่งทางออกของกลุ่มน้ำ (Outlet) ได้เพียงตำแหน่งเดียว

แต่สำหรับแบบจำลอง BTOPMC มีรูปแบบการประมวลผลเชิงพื้นที่โดยการแบ่งพื้นที่กลุ่มน้ำทั้งหมดออกเป็นพื้นที่รับน้ำย่อยคล้ายกับแบบจำลอง KW-GIUH แต่มีขนาดพื้นที่ใหญ่กว่าดังแสดงในรูปที่ 8 เนื่องจากการแบ่งพื้นที่รับน้ำย่อยแบบจำลอง BTOPMC ไม่ได้อ้างอิงตามลำดับชั้นการไหลของลำน้ำเหมือนแบบจำลอง KW-GIUH แต่ขึ้นอยู่กับกำหนดยุทธศาสตร์ของพื้นที่รับน้ำย่อยโดยผู้ใช้ ในแต่ละพื้นที่ย่อยจะทำการประมวลผลแบบเป็นกริด และประเมินเส้นทางไหลของลำน้ำได้ดังรูปที่ 9 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพสามารถวิเคราะห์ได้โดยฟังก์ชันที่อยู่ในแบบจำลอง และมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์เป็นหนึ่งค่าต่อพื้นที่รับน้ำย่อย

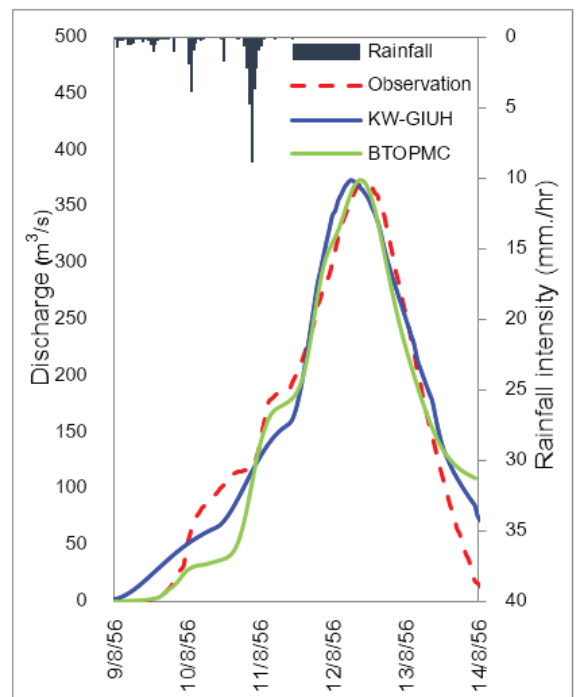
6.2 การจำลองสภาพน้ำท่าในกลุ่มน้ำยมตอนบน

ชุดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง BTOPMC และ KW-GIUH ที่ได้จากการสอบเทียบผลการจำลองน้ำท่าในพื้นที่กลุ่มน้ำยมตอนบนแสดงดังตารางที่ 2 ถึง 5

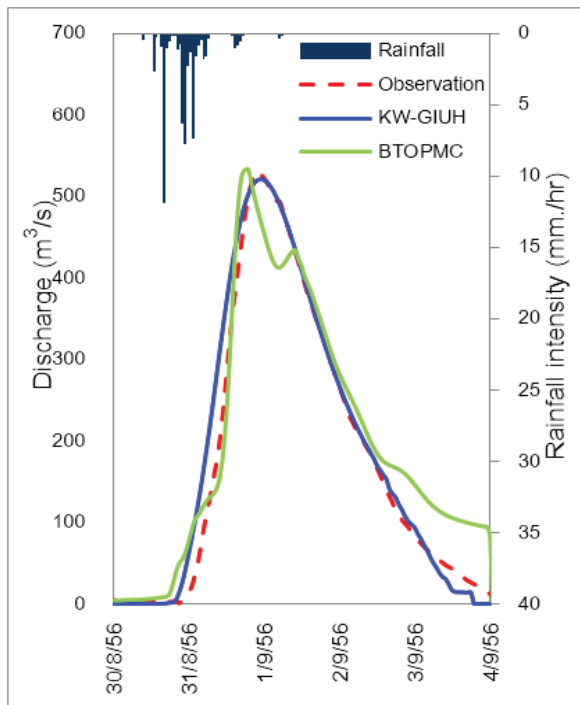
ผลการสอบเทียบแบบจำลอง KW-GIUH และ BTOPMC ในช่วงเวลาระหว่างวันที่ 9-14 สิงหาคม และ 30 สิงหาคม-4 กันยายน พ.ศ. 2556 รวมถึงผลการตรวจพิสูจน์แบบจำลองในช่วงวันที่ 30 สิงหาคม-6 กันยายน พ.ศ. 2557 แสดงใน



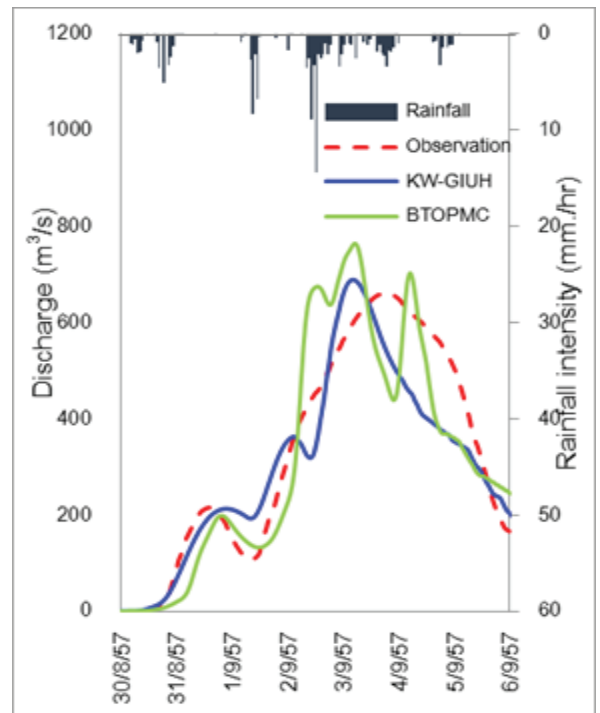
รูปที่ 9 เส้นลำน้ำ จากแบบจำลอง BTOPMC



รูปที่ 10 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่าและความเข้มฝนกับช่วงระยะเวลาที่ฝนตกยาวต่อเนื่องที่สถานี Y.1C ในระหว่างวันที่ 9-14 สิงหาคม พ.ศ. 2556



รูปที่ 11 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่าและความเข้มฝนกับช่วงระยะเวลาที่ฝนตกرایชั่วโมงที่สถานี Y.1C ในระหว่างวันที่ 30 สิงหาคม–4 กันยายน พ.ศ. 2556



รูปที่ 12 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่าและความเข้มฝนกับช่วงระยะเวลาที่ฝนตกرایชั่วโมงที่สถานี Y.1C ในระหว่างวันที่ 30 สิงหาคม–6 กันยายน พ.ศ. 2557

รูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่าและความเข้มฝนกับช่วงระยะเวลาที่ฝนตกرایชั่วโมงที่ตำแหน่งสถานีตรวจวัด Y.1C ดังรูปที่ 10 ถึง 12 โดย เมื่อพิจารณาจากค่าดัชนี NSE ของแต่ละเหตุการณ์ที่ระบุไว้ในตารางที่ 6 จะเห็นว่าทั้งสองแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการจำลองสภาพน้ำท่าที่บริเวณลุ่มน้ำยมตอนบนอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ($NSE > 0.75$) [10] โดยแบบจำลอง KW-GIUH มีผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดมากกว่าแบบจำลอง BTOPMC เพียงเล็กน้อย สังเกตได้จากค่าของดัชนี NSE ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าประมาณ 0.02–0.05 และเมื่อพิจารณาจากกราฟ พบว่าลักษณะของกราฟและปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการจำลองของทั้งสองแบบจำลองก็มีความใกล้เคียงกัน โดยในช่วงเริ่มต้นจนถึงเวลาที่อัตราการไหลมีค่าสูงสุด (Peak flow) แบบจำลอง BTOPMC มีผลการจำลองน้ำท่าที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการตรวจวัดมากกว่าแบบจำลอง KW-GIUH แต่หลังจากนั้นในช่วงที่อัตราการไหลมีค่าลดลงผลการจำลองจากแบบจำลอง KW-GIUH จะมีผลการจำลองที่ดีกว่าแบบ BTOPMC

ดังนั้นหากพิจารณาโดยรวมทั้งจากค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง NSE และลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่าและความเข้มฝนกับช่วงระยะเวลาที่ฝนตกرایชั่วโมงที่ตำแหน่งสถานีตรวจวัด Y.1C พบว่าผลการจำลองที่ได้จากแบบจำลอง KW-GIUH จะใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากกว่าแบบจำลอง BTOPMC เล็กน้อย

7. สรุป

แบบจำลอง KW-GIUH และ BTOPMC สามารถจำลองสภาพน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำยมได้เป็นอย่างดี รวมถึงมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาจากค่าดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ NSE ที่มีความใกล้เคียงกัน โดยแบบจำลอง KW-GIUH มีการใช้งานที่ซับซ้อนน้อยกว่าเหมาะสำหรับใช้งานในช่วงที่มีพายุฝนตกหนักหรือเกิดอุทกภัยแบบเฉียบพลันและนำไปประยุกต์ใช้ในการเตือนภัยน้ำท่วม เนื่องจากสามารถใช้งานได้เฉพาะในการจำลองปริมาณน้ำท่ารายชั่วโมงเท่านั้น อีกทั้งหากใช้งานในพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีขนาดใหญ่มากเกินไปผลการ

จำลองที่ได้อาจมีความแม่นยำลดลง ส่วนแบบจำลอง BTOPMC ถึงแม้ว่าจะมีการใช้งานที่ซับซ้อนมากกว่า แต่สามารถใช้งานเพื่อประเมินได้ทั้งปริมาณน้ำท่ารายชั่วโมงและรายวัน รวมถึงปริมาณน้ำใต้ดินได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้งานในพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีขนาดใหญ่ได้เนื่องจากการประมวลผลเชิงพื้นที่แบบกริด จึงเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อวางแผนหรือเตรียมการรับมือในระยะยาว เช่น การประเมินและจัดทำแผนที่เสี่ยงภัยต่าง ๆ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผอช.สมคิด สะเภาคำ ศูนย์อุทกวิทยาชลประทานภาคเหนือตอนบน สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา กรมชลประทาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลอัตราการไหลของน้ำในลุ่มน้ำยม กรมพัฒนาที่ดิน ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินและข้อมูลชุดดิน สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลฝนรายชั่วโมง และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Arnold JG, Srinivasan R, Murriah RS, Williams JR. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *J American Water Resour Assoc.* 1998; 34(1): 73–89.
- [2] Lee KT, Yen BC. Geomorphology and Kinematic Wave Based Hydrograph Derivation. *J Hydraul Eng ASCE.* 1997; 2(1): 73–80.
- [3] Lee KT. Generating Design hydrographs by DEM assisted geomorphic runoff simulation: A case study. *J American Water Resour Assoc.* 1998; 34(2): 375–384.
- [4] Ao TQ. Development of a distributed hydrological model for large river basins and its application to Southeast Asian rivers. *Ph.D. Dissertation. University of Yamanashi.* 2000.
- [5] Nawarathna NMNS B. Method to delineate blocks in BTOPMC model for large scale watersheds. *J Hydraul Eng ASCE.* 2000; 48(1): 61–66.
- [6] Wang G, et al. Grid-based distribution model for simulating runoff and soil erosion from a large-scale river basin. *Hydrological Processes.* 2009; 24(5): 641–653.
- [7] Nawarathna NMNSB, Ao T, Kazama S, Sawamoto M, Takeuchi K. Influence of human activities on the BTOPMC model Runoff Simulations in Large scale Watersheds. In: *XXIX IAHR Congress Proceedings, Theme A.* 2001. p. 93–99.
- [8] สำนักชลประทานที่ 4. การบริหารจัดการน้ำแม่ข่าย. เข้าถึงได้จาก: irrigation.rid.go.th/rid4/jone_water/data/2552/pland/25-06-52/ES01.doc [เข้าถึงเมื่อ 19 ตุลาคม 2559].
- [9] หน่วยงานราชการจังหวัดแพร่. โครงการพัฒนาลุ่มน้ำยม จังหวัดแพร่. เข้าถึงได้จาก: www.phrae.go.th/plan_yom.html [เข้าถึงเมื่อ 19 ตุลาคม 2559].
- [10] Lian Y, Chan I-C, Singh J, Demissie M, Knapp V, Xie H. Coupling of hydrologic and hydraulic models for the Illinois River Basin. *Journal of Hydrology.* 2007; 34(4): 210–222.