

นิพนธ์ต้นฉบับ

การคาดการณ์การตอบสนองทางอุทกวิทยาต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ
บริเวณลุ่มน้ำย่อยน่านตอนบน โดยแบบจำลอง IFAS

**Predicting Hydrologic Response to Climate Change in
Upper Nan Sub-watershed Using IFAS Model**

วิชุดา กันภัย

ปิยพงษ์ ทองดีน็อก*

นฤมล แก้วจำปา

Wichuta Gunphai

Piyapong Tongdeenok*

Naruemol Kaewjampa

คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Faculty of Forestry, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

*Corresponding Author, E-mail: fforppt@ku.ac.th

รับต้นฉบับ 17 มกราคม 2561

รับลงพิมพ์ 20 กุมภาพันธ์ 2561

ABSTRACT

This research aims to predict the hydrological response using Integrated Flood Analysis (IFAS) model in upper Nan sub-watershed. The rainfall amount data for the past 30 years (1986 - 2015) which are classified as normal and La Nina year. Moreover, predicted runoff from climate change scenario (2050 and 2070 yr.) which based on the global climate change forecast model (GCM) under RCP 8.5 of The UN Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) issue 5. Then some hydrological characteristics include a percentage of rainfall runoff ratio, specific yield, total flow and peak flow were analyzed. The results found that the annual average runoff during 1986 - 2015 was 3,446.19 m³/s which is highest in the year of La Nina (2011) as 4,893.24 m³/s. It was found that the IFAS model performs well in predicting runoff compared with measurement data with the NSE ranged 0.81 to 0.83 and the percentage error ranged 1.45 – 24.11%. While, runoff estimation during the climate change scenario was predicted in 2050 and 2070 years. The average annual runoff were 1,736.88 and 1,795.85 m³/s, respectively and lower than normal years as 13.1% and 10.2%, respectively. Beside, some hydrological characteristics in the upper Nan sub-watershed found that percentage of rainfall runoff was 17.29%, specific yield was 10.78 m³/s/km²/year, total flow was 23,989.62 m³/s and peak flow was 367.44 m³/s. It can be implied that IFAS model can perform well to predict streamflow in the upper Nan sub-watershed and less effect a climate change on streamflow.

Keywords: Hydrologic response, Climate change, Integrated Flood Analysis System (IFAS)

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคาดการณ์การตอบสนองทางอุทกวิทยา โดยประยุกต์ใช้แบบจำลอง Integrated Flood Analysis System (IFAS) บริเวณลุ่มน้ำโขงน่านตอนบน จากปริมาณน้ำฝนย้อนหลัง 30 ปี (พ.ศ. 2529-พ.ศ. 2558) จำแนกเป็นปีปกติและปีลานีญา และคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าจากภาพเหตุการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613) จากปริมาณน้ำฝนในรายงานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ฉบับที่ 5 ของ IPCC พร้อมทั้งวิเคราะห์ลักษณะทางอุทกวิทยาบางประการ ได้แก่ สภาพการให้น้ำท่า ร้อยละน้ำท่าต่อน้ำฝน ปริมาณน้ำท่ารวม และปริมาณน้ำท่าสูงสุด ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำท่าช่วงปี พ.ศ. 2529-พ.ศ. 2558 มีค่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 3,446.19 ลบ.ม./วินาที โดยมีค่าสูงสุดในปีลานีญา (พ.ศ. 2554) มีค่าเท่ากับ 4,893.24 ลบ.ม./วินาที ทั้งนี้พบว่า แบบจำลอง IFAS มีประสิทธิภาพดีในการพยากรณ์น้ำท่าเมื่อเทียบกับค่าตรวจวัดจริง โดยมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนระหว่าง 1.45 - 24.11 และค่าดัชนี NSE ระหว่าง 0.81-0.83 ส่วนการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าในช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ พบว่าช่วงที่มีการเพิ่มขึ้นของพลังงาน และความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ ในปี พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613 มีค่าปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 1,736.88 และ 1,795.85 ลบ.ม./วินาที ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณน้ำทาน้อยกว่าปีปกติร้อยละ 13.1 และ 10.2 ตามลำดับ ส่วนลักษณะทางอุทกวิทยาบางประการ บริเวณลุ่มน้ำโขงน่านตอนบน พบว่าร้อยละน้ำท่าต่อน้ำฝน เท่ากับ ร้อยละ 17.29 สภาพการให้น้ำท่าเท่ากับ 10.78 ลบ.ม./วินาที/ตร.กม./ปี ปริมาณน้ำท่ารวมเท่ากับ 23,989.62 ลบ.ม./วินาที และปริมาณน้ำท่าสูงสุดเท่ากับ 367.44 ลบ.ม./วินาที จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า สามารถประยุกต์ใช้แบบจำลอง IFAS ในการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าบริเวณลุ่มน้ำโขงน่านตอนบนได้ดี และพบว่าการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตมีผลต่อปริมาณน้ำท่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

คำสำคัญ: การตอบสนองทางอุทกวิทยา การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ แบบจำลอง IFAS

คำนำ

อุทกภัยเป็นภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นในประเทศไทยเป็นประจำทุกปี ซึ่งนับวันยิ่งทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก โดยเฉพาะในปีที่เกิดปรากฏการณ์ลานีญา (La Nina phenomena) ซึ่งส่งผลให้ปริมาณน้ำฝนมีปริมาณมากขึ้นจากปกติ (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2546) นอกจากนี้ ระดับความรุนแรงของอุทกภัยยังขึ้นอยู่กับรูปแบบการตอบสนองตามลักษณะเฉพาะของโครงสร้างระบบนิเวศลุ่มน้ำนั้นๆ โดยเฉพาะบริเวณลุ่มน้ำที่มีพื้นที่ราบติดกับภูเขาสูง (กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย, 2551) ลุ่มน้ำที่ประสบปัญหาดังกล่าวอยู่เป็นประจำคือ ลุ่มน้ำโขงน่านตอนบน ซึ่งเป็นลุ่มน้ำที่อยู่ทางตอนบนของลุ่มน้ำน่าน เนื่องจากสภาพภูมิศาสตร์ของจังหวัดน่านที่มีทิวเขาหลวงพระบาง

และทิวเขาผีปันน้ำทอดยาวทั่วทั้งจังหวัดในทิศเหนือใต้ ซึ่งตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของพายุหมุนเขตร้อน และแนวของร่องมรสุม ประกอบกับพื้นที่ลุ่มน้ำโขงน่านตอนบน โดยทั่วไปมีสภาพส่วนใหญ่เป็นภูเขาลาดชัน ส่งผลให้ง่ายต่อการเกิดน้ำท่วมฉับพลัน จากรายงานสถิติการเกิดอุทกภัยของกรมอุตุนิยมวิทยา (2553) รายงานว่ามีอุทกภัยเกิดขึ้นกระจายอยู่ในบริเวณลุ่มน้ำโขงน่านตอนบนในช่วง พ.ศ. 2542 – พ.ศ. 2552 ทั้งหมด 24 ครั้ง โดยพบว่ามีความถี่สูงในช่วง 5 ปีหลัง เนื่องจากมีความผันผวนของลักษณะอากาศสูง

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้แบบจำลองในการประเมินปริมาณน้ำท่าอย่างแพร่หลาย โดยแบบจำลอง Integrated Flood Analysis System (IFAS) เป็นแบบจำลองอุทกวิทยาที่มีประสิทธิภาพสูงในการศึกษา

ปริมาณน้ำท่าและประยุคต์ใช้ในการศึกษาอุทกภัย เนื่องจากข้อมูลที่วิเคราะห์สามารถเตรียมได้ทั้งจากภาคสนามและข้อมูลระยะไกล มีขั้นตอนการวิเคราะห์แบบกระจายทั้งพื้นที่จึงแสดงผลลัพธ์ได้ทุกตำแหน่งที่สนใจ และสามารถแสดงผลลัพธ์ได้หลากหลายรูปแบบทั้งในเชิงปริมาณและเชิงพื้นที่ ทำให้ง่ายต่อการวางแผนบริหารจัดการน้ำในแต่ละพื้นที่ การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้แบบจำลอง IFAS ในการประเมินปริมาณน้ำท่า ในปีปกติ (normal year) ปีลานีญา (La Nina) และปีที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (climate change) และเปรียบเทียบลักษณะทางอุทกวิทยาบางประการในแต่ละปี บริเวณลุ่มน้ำย้อยน่านตอนบน ทั้งนี้ ผลการศึกษาที่ได้สามารถเป็นฐานข้อมูลใช้ในการตัดสินใจเพื่อเตรียมการป้องกัน และลดความเสียหายจากอุทกภัย ภายใต้ง่อนไขปริมาณน้ำฝนสภาวะต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในอนาคต

อุปกรณ์ และวิธีการ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้แบบจำลอง IFAS ซึ่งเป็นแบบจำลองทางอุทกวิทยาเพื่อประมาณปริมาณน้ำท่าในปีปกติ และปีที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ รวมไปถึงการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าในอนาคต พร้อมทั้งวิเคราะห์การตอบสนองทางอุทกวิทยาของพื้นที่ลุ่มน้ำต่อปริมาณน้ำฝนแต่ละเหตุการณ์ บริเวณลุ่มน้ำย้อยน่านตอนบน ซึ่งมีวิธีการศึกษาดังนี้

การรวบรวม และเตรียมข้อมูล

รวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการนำเข้าแบบจำลอง IFAS ได้แก่ (1) ขอบเขตลุ่มน้ำน่านตอนบน จากฐานข้อมูลของกรมทรัพยากรน้ำในรูปแบบ shape file (.shp) (2) รวบรวมข้อมูลสถานีตรวจวัดน้ำฝน และปริมาณน้ำฝนรายวัน ย้อนหลัง 30 ปี (พ.ศ. 2529 – พ.ศ. 2558) จากสถานีตรวจวัดน้ำฝนของกรมอุตุฯ และกรมชลประทาน แล้วจำแนกปีที่เป็นปีปกติ (normal

year) และปีลานีญา (La Nina) โดยพิจารณาตามสถิติการเกิดปรากฏการณ์เอลนีโญ และลานีญา จากตารางดัชนี Oceanic Nino Index (ONI) ของ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) ซึ่งปีปกติ หมายถึง ปีที่ไม่เกิดปรากฏการณ์เอลนีโญ และลานีญา ได้แก่ ปี พ.ศ. 2533 พ.ศ. 2536 และ พ.ศ. 2556 และปีลานีญา หมายถึง ปีที่เกิดปรากฏการณ์ลานีญารุนแรง ได้แก่ ปี พ.ศ. 2543 พ.ศ. 2553 และ พ.ศ. 2554 (3) ข้อมูลเชิงพื้นที่จาก ISCGM ได้แก่ แบบจำลองความสูงเชิงเลข และแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินเชิงเลข พ.ศ. 2552 บริเวณลุ่มน้ำย้อยน่านตอนบน ความละเอียด 1 ตารางกิโลเมตร ดาวนัโพลฟรีจาก International Steering Committee for Global Mapping (ISCGM) ด้วยแบบจำลอง IFAS และรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ได้แก่ ข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายวัน ย้อนหลัง 30 ปี (พ.ศ. 2529 – พ.ศ. 2558) จากกรมชลประทาน

การประมาณปริมาณน้ำท่าโดยแบบจำลอง IFAS

การประมาณปริมาณน้ำท่าโดยแบบจำลอง IFAS กำหนดขนาดกริด (cell size) ขนาด 1 ตารางกิโลเมตร และรอบเวลาในการคำนวณเป็นแบบรายวัน โดยกำหนดให้บริเวณสถานีตรวจวัดน้ำท่าที่สถานี N.1 ของกรมชลประทาน เป็นจุดน้ำออก (outlet) ขั้นตอนการวิเคราะห์ปริมาณน้ำท่าของแบบจำลอง IFAS มีหลักการคำนวณแบบ tank model จากข้อมูลความสูงของพื้นที่ และการใช้ประโยชน์ที่ดินแบบเชิงเลข ร่วมกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวันแบบแผนที่เรสเตอร์ โดยแปลงข้อมูลปริมาณน้ำฝนแบบจุดเป็นเรสเตอร์ด้วยวิธีการประมาณค่า (interpolation) ข้อมูลน้ำฝน ด้วยเทคนิค Inverse Distance Weighted Method (IDW) ในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) ซึ่งเป็นการประมาณค่าปริมาณน้ำฝนให้พื้นที่ทุกกริดในตำแหน่งที่ไม่ทราบค่า โดยอาศัยการกระจายข้อมูลจากจุดที่ทราบค่าตามระยะทาง (ทิศธรรม, 2556) จากนั้นทำการประมวลผลปริมาณน้ำท่าด้วยค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นที่กำหนดในแบบจำลอง IFAS และ

แสดงผลลัพธ์ปริมาณน้ำทำเป็นตารางในรูปแบบ csv file โดยเลือกคำสั่ง Time Series Table

การปรับแก้และการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง (model calibration and validation)

แบบจำลอง IFAS เป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยประเทศญี่ปุ่น การประมาณปริมาณน้ำทำโดยค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นที่กำหนดจากแบบจำลองเชิงอวกไม่สะท้อนถึงลักษณะภูมิประเทศ และลักษณะทางอุทกวิทยาที่แท้จริงของกลุ่มน้ำย่อยน่านตอนบน จึงจำเป็นต้องปรับค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อลักษณะทางอุทกวิทยา จากนั้นตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในปีปกติโดยนำข้อมูลปริมาณน้ำทำปี พ.ศ. 2533 และ พ.ศ. 2536 ที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำทำจากการตรวจวัดจริง ของกรมชลประทาน และใช้ข้อมูลปริมาณน้ำทำปี พ.ศ. 2543 และ พ.ศ. 2553 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองในปีลานีญา โดยใช้ดัชนี Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) จากสูตรของ Nash and Sutcliffe (1970) ดังสมการที่ 1 และร้อยละความคลาดเคลื่อน (Relative Error) จากสูตรของ Abramowitz and Stegun (1972) ดังสมการที่ 2 ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองและทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองในการทำน่านน้ำในช่วงเวลาที่อยู่นอกเหนือจากการสอบเทียบแบบจำลอง ได้แก่ ปี พ.ศ. 2536 ในปีปกติ และ พ.ศ. 2554 ในปีลานีญา

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

$$\text{Percentage Error} = \frac{|\hat{Y} - Y|}{Y} \quad (2)$$

เมื่อ Y คือ ปริมาณน้ำทำที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานี N.1

$\hat{Y}$ คือ ปริมาณน้ำทำที่คำนวณได้จากแบบจำลอง และ

$\bar{Y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำทำจากการตรวจวัดที่สถานี N.1

การสร้างภาพจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

สร้างภาพจำลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำทำจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกในอนาคต ได้แก่ พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613 โดยดาวินโฮลด ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือนที่ได้จากการคาดการณ์สภาพภูมิอากาศด้วยแบบจำลองภูมิอากาศโลก (GCM) ในรายงานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ฉบับที่ 5 จาก The UN Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ซึ่งแสดงใน www.worldclim.org โดยใช้ข้อมูลจากภาพเหตุการณ์ที่ค่าพลังงานในบรรยากาศเพิ่มขึ้นเป็น 8.5 วัดต่อตารางเมตรจากยุคอุตสาหกรรม และความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกมากกว่า 1,370 ส่วนในล้านส่วน หลังปี พ.ศ. 2543 หรือ Representative Concentration Pathways 8.5 (RCP 8.5) ซึ่งเป็นภาพเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกที่มีการสะสมค่าพลังงานความร้อนในบรรยากาศมากที่สุด เสนอในรายงานฉบับนี้

การวิเคราะห์ลักษณะทางอุทกวิทยาบางประการ

การประยุกต์ใช้ข้อมูลอุทกวิทยาจากแบบจำลอง IFAS เพื่อศึกษาลักษณะทางอุทกวิทยาบางประการในปีปกติปีลานีญาและภาพเหตุการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ บริเวณกลุ่มน้ำย่อยน่านตอนบน โดยศึกษาในประเด็นต่างๆ ได้แก่ (1) วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำทำต่อปริมาณน้ำฝน หรือร้อยละน้ำทำต่อน้ำฝน (percentage of rainfall runoff ratio) โดยการหาสัดส่วนระหว่างปริมาณน้ำทำต่อปริมาณน้ำฝน ในช่วงเวลาเดียวกัน (2) วิเคราะห์ปริมาณน้ำทำต่อพื้นที่ลุ่มน้ำ หรือสภาพการให้น้ำทำ (specific yield) โดยการหาสัดส่วนระหว่างปริมาณน้ำทำต่อพื้นที่ลุ่มน้ำ (3) วิเคราะห์ความแตกต่างของน้ำทำรวม (total flow) รายเดือน และความแตกต่างของน้ำทำสูงสุด (peak flow) ระหว่างปีปกติกับปีลานีญาและปีที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ โดยการทดสอบความแตกต่างของ

ปริมาณน้ำท่าแต่ละเหตุการณ์ โดยใช้สถิติ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลและวิจารณ์

การประมาณปริมาณน้ำท่าโดยแบบจำลอง IFAS

การประมาณปริมาณน้ำท่าช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม – ตุลาคม) จำแนกเป็นปีที่มีปริมาณน้ำฝนปกติ (พ.ศ. 2533 พ.ศ. 2536 และ พ.ศ. 2556) และปีลานีญา (พ.ศ. 2543 พ.ศ. 2553 และ พ.ศ. 2554) พบว่า ปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ยของปีปกติ และปีลานีญา มีค่าเท่ากับ 3,455.8 และ 6,372.09 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยสามารถแยกอธิบายปริมาณน้ำท่าในแต่ละปี

ได้ดัง Table 1 ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำท่ารายเดือนเฉลี่ยในปีที่เกิดปรากฏการณ์ลานีญามีปริมาณเพิ่มขึ้น 2,916.29 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที คิดเป็นร้อยละ 84.4 ของปริมาณน้ำท่าในปีปกติ เนื่องจากลานีญาเป็นปรากฏการณ์ที่ลมสินค้า (trade wind) มีกำลังแรงมากกว่าปกติ จึงพัดพาผิวน้ำทะเลที่อุ่นจากตะวันออกของแปซิฟิกเขตศูนย์สูตรไปสะสมอยู่ทางตะวันตกมากขึ้น ทำให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิผิวน้ำทะเลสูงขึ้น (มันทนา, 2531) ส่งผลให้มีการลอยตัวขึ้นของไอน้ำ และกลั่นตัวเป็นเมฆและฝน (Glantz, 2001) ทำให้ปริมาณน้ำฝนในฤดูฝนที่เกิดปรากฏการณ์ลานีญาขนาดปานกลางถึงรุนแรงส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าปกติ (มันทนา และสุดาพร, 2542)

Table 1 Streamflow from IFAS simulated model and observed data in a normal and La Nina years.

month	year	normal year		year	La Nina year	
		Simulated	Observed		Simulated	Observed
May	1990	1,634.74	693.30	2000	2,078.74	1,900.46
June		2,310.71	1,666.90		4,316.52	2,869.85
July		4,816.13	5,121.70		7,743.79	9,021.45
August		3,998.43	5,754.30		5,701.72	6,302.85
September		2,894.21	4,877.50		4,829.61	8,885.40
October		1,684.78	2,330.70		2,187.55	3,377.40
May	1993	1,684.78	2330.70	2010	1,350.09	487.80
June		1,485.63	698.50		1,382.00	551.10
July		7,567.11	7,597.81		6,539.85	5,185.75
August		3,918.38	4,517.40		17,054.25	17,534.15
September		3,601.19	3,594.90		10,526.80	12,927.00
October		1,773.42	2,320.30		3,159.55	3,302.00
May	2013	1,085.91	544.18	2011	1,564.16	2,785.67
June		1,907.17	862.43		7,247.65	7,932.70
July		3,687.78	4,782.89		11,326.94	13,697.05
August		9,365.62	9,696.42		12,751.47	18,725.25
September		6,127.47	6,641.07		10,918.57	14,280.45
October		2,661.05	2,673.37		4,018.45	5,599.95
average		3,455.80	3,705.80		6,372.09	7,520.35

การคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าจากภาพเหตุการณ์ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ปี พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613 ด้วยข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากรายงานการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ ที่ระดับ RCP 8.5 พบว่าปี พ.ศ. 2593 ปริมาณน้ำท่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,789.77 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยมีค่าสูงสุดในเดือนสิงหาคม เท่ากับ 6,303.24 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และต่ำสุดในเดือน พฤษภาคม เท่ากับ 599.18 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ส่วน ในปี พ.ศ. 2613 พบว่า มีปริมาณน้ำท่าสูงกว่า พ.ศ. 2593 โดยมีค่าเฉลี่ยรายเดือนเท่ากับ 2,855.79 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดเท่ากับ 6,126.13 และ 644.66 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษา พบว่า พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613 มีปริมาณน้ำท่าลดลงจากปีปกติ 666.03 และ 600.01 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที คิดเป็นร้อยละ 19.3 และ 17.4 ของปริมาณน้ำท่าในปีปกติ ตามลำดับ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (RCP 8.5) ส่งผลให้ปริมาณฝนรายปีบริเวณภาคเหนือมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย (ศูนย์ภูมิอากาศ, 2559) ทำให้ปริมาณน้ำท่ามีแนวโน้มลดลงด้วย (สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย, 2551) อย่างไรก็ตาม พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613 มีปริมาณน้ำฝนแตกต่างจากปีปกติเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ปริมาณน้ำท่าแตกต่างกันเล็กน้อย

การปรับแก้ความถูกต้องของการพยากรณ์ปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง IFAS

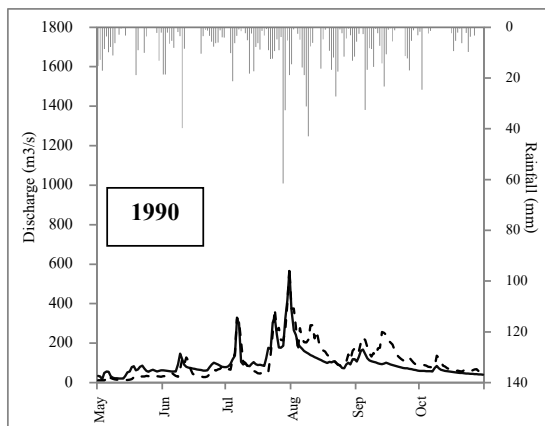
การปรับแก้ความถูกต้องของการพยากรณ์ปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง IFAS โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดน้ำท่า ได้แก่ ปริมาณน้ำใต้ดินแรกเริ่ม (AUD) สัมประสิทธิ์สัดส่วนของน้ำใต้ดินที่สามารถไหลออกจากชั้นหินอุ้มน้ำและกลายเป็นน้ำผิวดิน (AGD) การซึมผ่านของดิน (SKF) และสัมประสิทธิ์น้ำใต้ดินที่จะกลายเป็นน้ำท่า (FALFX) แล้วสอบเทียบแบบจำลองโดยพิจารณาจากความคลาด

คลึงกันระหว่างกราฟน้ำท่าจากแบบจำลอง และจากการตรวจวัดของกรมชลประทาน (Figure 1) และพิจารณา ค่าดัชนี NSE และร้อยละความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ในทางสถิติ พบว่า ในปีปกติมีลักษณะความผันแปรของกราฟน้ำท่าจากแบบจำลองและจากสถานีตรวจวัดใกล้เคียงกัน โดยมีร้อยละความคลาดเคลื่อน 9.96 และมีค่า NSE เท่ากับ 0.81 อยู่ในระดับดี ส่วนในปีลานีญามีลักษณะความผันแปรของกราฟน้ำท่าจากแบบจำลองและจากสถานีตรวจวัดคล้ายกัน แต่มีปริมาณการไหลสูงสุด (peak flow) บางช่วงไม่ตรงกัน โดยมีร้อยละความคลาดเคลื่อน 7.57 และมีค่า NSE เท่ากับ 0.83 อยู่ในระดับดี จึงถือว่าแบบจำลอง IFAS มีความสามารถในการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำย่อยน่านตอนบนได้ดี และเมื่อทดสอบแบบจำลองในการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่า ปี พ.ศ. 2556 (ปีปกติ) และ พ.ศ. 2554 (ปีลานีญา) (Figure 2) พบว่า ในปีปกติมีลักษณะความผันแปรของกราฟน้ำท่าจากแบบจำลองและจากสถานีตรวจวัดใกล้เคียงกัน โดยมีร้อยละความคลาดเคลื่อน 1.45 และมีค่า NSE เท่ากับ 0.82 ซึ่งอยู่ในระดับดี ส่วนในปีลานีญามีลักษณะความผันแปรของกราฟน้ำท่าจากแบบจำลองและจากสถานีตรวจวัดใกล้เคียงกัน ยกเว้นปริมาณน้ำท่าสูงสุด (peak flow) ในช่วงเดือนกรกฎาคม ซึ่งกราฟน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลองมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณน้ำท่าจากการตรวจวัดค่อนข้างมาก เนื่องจากยอดน้ำในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นยอดน้ำที่เกิดขึ้นหลังยอดน้ำสูงสุดในช่วงปลายเดือนมิถุนายน น้ำท่าที่ตรวจวัดได้ในเดือนกรกฎาคมจึงอาจได้รับอิทธิพลจากฝนที่ตกลงมาก่อนหน้า (Antecedent Precipitation Index; API) ร่วมด้วย ดังที่ พงษ์ศักดิ์ และคณะ (2554) กล่าวว่า ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมาก่อนหน้ามีผลต่อปริมาณน้ำท่าในลำธารร้อยละ 77.59 ซึ่งผลจากการสอบเทียบ พบว่ามีร้อยละความคลาดเคลื่อน 24.11 และมีค่า NSE เท่ากับ 0.77 อยู่ในระดับดี แบบจำลอง IFAS จึงมีประสิทธิภาพในการคาดการณ์ปริมาณน้ำท่า

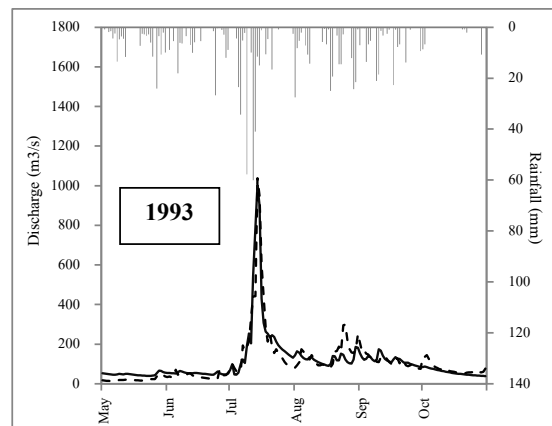
ในกลุ่มน้ำข่อยน่านตอนบนได้ในช่วงเวลาอื่นนอกเหนือจากข้อมูลที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองได้ในระดับดี

จากการพิจารณารูปน้ำท่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง พบว่า ปริมาณการไหลของน้ำท่ามีความถูกต้องใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดจริงในช่วงที่ปริมาณการไหลเพิ่มสูงขึ้นหลังจากที่ฝนตก (rising

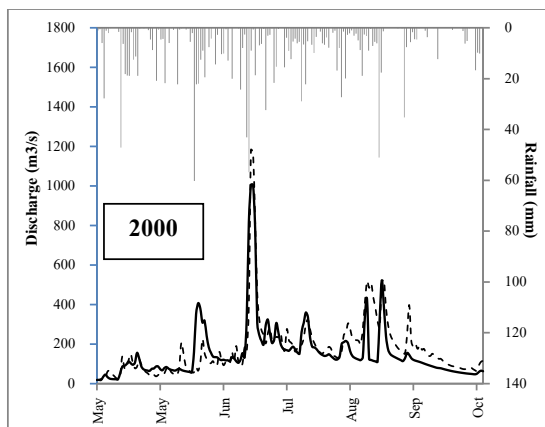
limb of hydrograph) รวมถึงช่วงที่ปริมาณการไหลของน้ำท่าขึ้นสูงสุดของฝนแต่ละครั้ง (peak flow) แต่ในช่วงน้ำลดหลังจากฝนผ่านไปแล้ว (falling limb of hydrograph) จะมีค่าต่ำกว่าข้อมูลตรวจวัดจริง สอดคล้องกับผลการศึกษาของ ทิพนกรณ์ (2558) ซึ่งให้เหตุผลว่าความผิดพลาดของการทำนายปริมาณน้ำท่าในช่วงน้ำลด



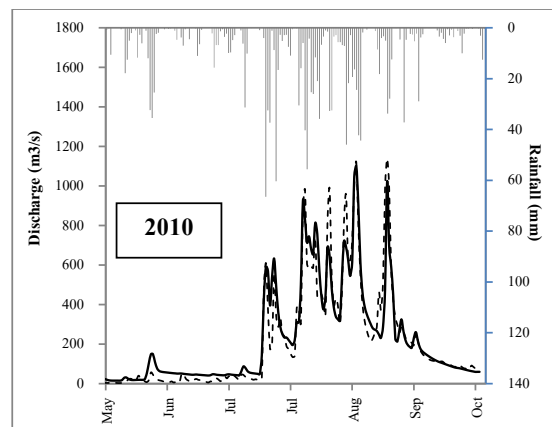
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 1 Model calibration in a normal year (a and b) and La Nina phenomena (c and d).

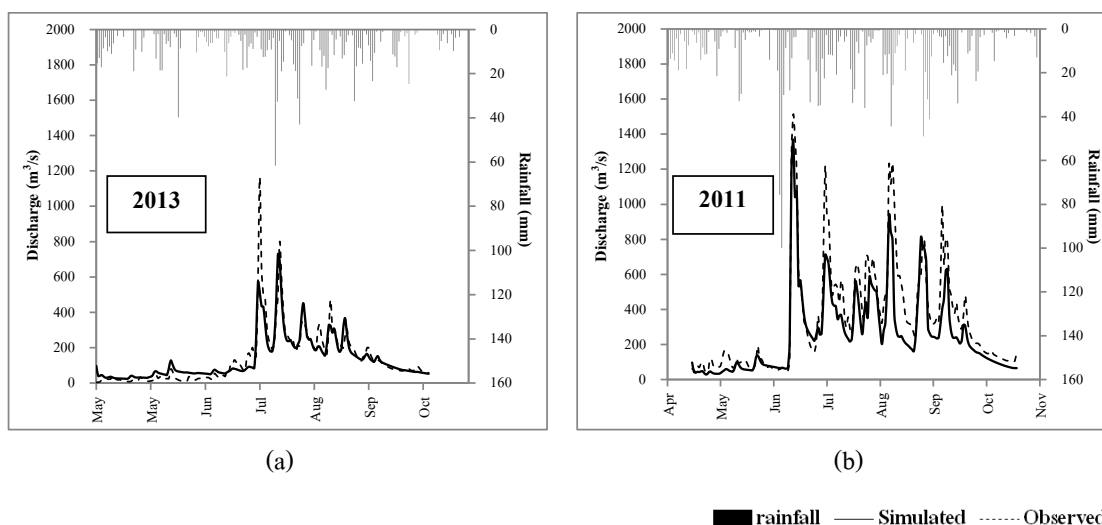


Figure 2 Model validation in a normal year (a) and La Nina phenomena (b).

หลังจากฝนผ่านไปเกิดจากความคลาดเคลื่อนจากการตรวจวัดข้อมูลในช่วงเวลาที่น้ำท่ามีปริมาณน้อยเนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดไม่สามารถวัดความเร็วของกระแสน้ำได้หากมีระดับน้ำในแม่น้ำต่ำเกินไปกรมชลประทานจึงใช้วิธีคำนวณปริมาณการไหลของน้ำท่าจากการอ่านค่าจากความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำและปริมาณการไหลของน้ำ (rating curve) ซึ่งข้อมูลดังกล่าวอาจคลาดเคลื่อนจากข้อมูลจริง อย่างไรก็ตามการคาดการณ์น้ำท่ามุ่งเน้นการทำนายปริมาณน้ำท่าในช่วงน้ำมากเป็นหลัก ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในช่วงน้ำน้อยจึงไม่มีความสำคัญมากนัก

ลักษณะทางอุทกวิทยาบางประการ

การศึกษาลักษณะทางอุทกวิทยาบางประการในปีปกติปีลานีญาและภาพเหตุการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศสามารถอธิบายแต่ละประเด็น ได้ดังนี้ (Table 2)

ร้อยละน้ำท่าต่อน้ำฝน (percentage of rainfall runoff ratio)

จากการศึกษาร้อยละของการเกิดปริมาณน้ำท่ารายเดือนต่อปริมาณน้ำฝน พบว่า ร้อยละน้ำท่าต่อน้ำฝน

มีค่าสูงสุดในปีลานีญา มีค่าร้อยละ 31.32 รองลงมาคือปีปกติปี พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613 มีค่าร้อยละ 17.29, 19.56 และ 17.54 ตามลำดับ ซึ่งร้อยละน้ำท่าต่อน้ำฝนมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเดือนกรกฎาคม-สิงหาคม เนื่องจากเป็นช่วงที่มีร่องความกดอากาศต่ำจากทางตอนใต้ของประเทศจีนพัดผ่านบริเวณประเทศไทย ทำให้มีฝนชุกต่อเนื่องและมีปริมาณฝนเพิ่มขึ้นในช่วงเดือนกรกฎาคม (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2537) และมีร้อยละของน้ำท่าต่อน้ำฝนต่ำสุดในช่วงเดือนกุมภาพันธ์และเมื่อเปรียบเทียบร้อยละน้ำท่าต่อน้ำฝนของกลุ่มน้ำย่อยน่านตอนบนกับพื้นที่ป่าต้นน้ำธรรมชาติทั่วไปที่มีปริมาณน้ำฝนใกล้เคียงกัน พบว่ากลุ่มน้ำย่อยน่านตอนบนมีความสามารถในการให้น้ำท่าเมื่อเทียบกับน้ำฝนที่ตกลงมาได้น้อยกว่าพื้นที่ป่าต้นน้ำธรรมชาติ ซึ่งให้น้ำไหลในลำธารเฉลี่ยร้อยละ 23.30 ของปริมาณน้ำฝน (พงษ์ศักดิ์ และคณะ, 2554)

สภาพการให้น้ำท่า (specific yield)

จากการศึกษาอัตราการเกิดน้ำท่าต่อพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยน่านตอนบน ที่มีพื้นที่ลุ่มน้ำขนาด 2,224.77 ตารางกิโลเมตร พบว่า สภาพการให้น้ำท่า มีปริมาณมากที่สุดในปีลานีญา มีค่า 26.39 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีต่อตารางกิโลเมตรต่อปี รองลงมาคือปีปกติ ปี

พ.ศ. 2613 และ พ.ศ. 2593 มีค่า 10.78, 9.69 และ 9.37 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีต่อตารางกิโลเมตรต่อปี ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบสภาพการให้น้ำทำในแต่ละปี พบว่า ในปีลาเนียญา มีสภาพการให้น้ำทำคิดเป็นร้อยละ 1.45 ของปีปกติ เนื่องจากเมื่อมีปริมาณน้ำฝนมาก จึงเกิดน้ำส่วนที่เกินความสามารถในการรองรับของดินและเกิดการไหลเป็นน้ำท่าผิวดิน ส่วนปี พ.ศ. 2613 และ พ.ศ. 2593 มีสภาพการให้น้ำทำน้อยกว่าปีปกติ คิดเป็นร้อยละ 0.1 และ 0.13 ของปีปกติ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม สภาพ

การให้น้ำทำในแต่ละเหตุการณ์มีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากปริมาณน้ำฝนไม่แตกต่างกันมากนัก

ปริมาณน้ำท่ารวม (total flow)

จากการศึกษาปริมาณน้ำท่ารวมรายปี พบว่า ปริมาณน้ำท่ารวมรายปีที่มีปริมาณมากที่สุดในปีลาเนียญา มีค่า 58,719.9 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที รองลงมาคือปีปกติ ปี พ.ศ. 2613 และ พ.ศ. 2593 มีค่า 23,990.6 21,550.3 และ 20,843.6 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ตามลำดับ มีปริมาณน้ำท่ารวมรายเดือนต่ำสุด 473 ลูกบาศก์เมตรต่อ

Table 2 Some hydrological characteristics in upper Nan sub-watershed.

hydrological characteristics	year			
	normal	La Nina	2050	2070
percentage of rainfall runoff (%)	17.29	31.32	19.56	17.54
specific yield (m ³ /s/km ² /yr.)	10.78	26.39	9.37	9.69
total flow (m ³ /s)	23,990.60	58,719.90	20,843.60	21,550.30
peak flow (m ³ /s)	367.44	1,560.40	248.52	229.09

วินาที ในทุกช่วงปี ส่วนปริมาณน้ำท่าสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงเดือนกรกฎาคม และสิงหาคม มีค่า 14,569.8, 6,303.2, 6,126.1 และ 5,210.5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ในปีลาเนียญา ปี พ.ศ. 2593 ปี พ.ศ. 2613 และปีปกติตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณน้ำท่าค่อนข้างน้อยในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนมีนาคม และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงเดือนเมษายนจนมีค่าสูงสุดในช่วงระหว่างเดือนกรกฎาคมถึงกันยายน แล้วจึงค่อยๆ ลดลงไปจนถึงเดือนธันวาคม (Figure 3) เนื่องจากช่วงระหว่างเดือนสิงหาคมถึงกันยายน เป็นช่วงที่บริเวณภาคเหนือตอนบนได้รับอิทธิพลจากพายุเขตร้อนที่เคลื่อนที่มาจากทะเลจีนใต้ฝั่งประเทศเวียดนามและสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว และอิทธิพลของร่องความกดอากาศต่ำกำลังแรงพัดผ่านเข้ามา (จตุพร, 2555) ประกอบกับกลุ่มน้ำย่อยน่านตอนบนมีทิวเขาหลวงพระบาง และทิวเขาฝิปันน้ำวางตัวตั้งฉากกับแนวการเคลื่อนที่ของพายุหมุนเขตร้อน และแนวของร่องมรสุม ส่งผลให้ปริมาณน้ำท่ามีแนวโน้มดังกล่าว และจากการทดสอบความแตกต่างทางสถิติระหว่างปีปกติ กับปีลาเนียญา ปี

พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613 ด้วยการทดสอบ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า ปริมาณน้ำท่ารายปีในปีลาเนียญา ปี พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613 ไม่มีความแตกต่างจากปีปกติ แต่เมื่อทำการทดสอบความแตกต่างปริมาณน้ำท่าเฉพาะช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม - ตุลาคม) พบว่า ปริมาณน้ำท่ารวมในปีลาเนียญา มีความแตกต่างจากปีปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่มีความแตกต่างจาก ปี พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613 เนื่องจากปริมาณน้ำท่าในช่วงฤดูฝนของปีปกติกับปี พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613 มีปริมาณแตกต่างกันเล็กน้อย

ปริมาณน้ำท่าสูงสุด (peak flow)

จากการศึกษาปริมาณน้ำท่าสูงสุด พบว่า ปริมาณน้ำท่าสูงสุดมีปริมาณมากที่สุดในปีลาเนียญา มีค่า 1,560.40 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ในช่วงปลายเดือนมิถุนายน รองลงมาคือปีปกติ มีค่า 367.44 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ในช่วงปลายเดือนกรกฎาคม และปี พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613 มีค่า 248.52 และ 229.09 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ในช่วงปลายเดือนสิงหาคม จาก

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปีที่เกิดปรากฏการณ์ลานีญาอาจเกิดน้ำหลากเร็วขึ้น และรุนแรงกว่าปกติ เมื่อทำการทดสอบความแตกต่างทางสถิติระหว่างปีปกติกับปีลานีญาปี พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613 ด้วยการทดสอบ t-test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่า ปริมาณ

น้ำท่าสูงสุดในปีลานีญามีความแตกต่างจากปีปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ในปีปกติไม่มีความแตกต่างจากปี พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบปริมาณน้ำท่ารวมในช่วงฤดูฝน

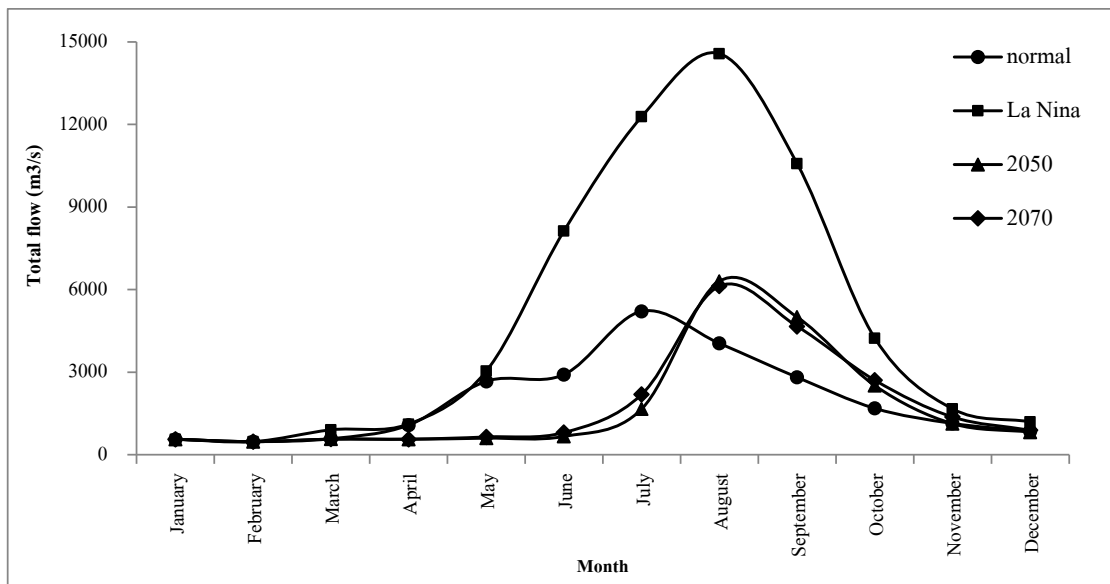


Figure 3 Total flow in a normal year, La Nina phenomena and climate change scenario.

สรุป

การประมาณปริมาณน้ำท่าโดยประยุกต์ใช้แบบจำลอง IFAS บริเวณลุ่มน้ำห้วยน้ำตอนบน พบว่าปริมาณน้ำท่าในปีปกติมีค่าสูงสุดในเดือนกรกฎาคมเท่ากับ 5,210.5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที โดยที่ปริมาณน้ำท่าสูงสุดในปีลานีญา มีปริมาณมากขึ้นจากปีปกติคิดเป็นร้อยละ 84.4 ของปริมาณน้ำท่าในปีปกติ ส่วนปีที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613) มีปริมาณน้ำท่าน้อยลงเท่ากับ 19.3 และ 17.4 ของปริมาณน้ำท่าในปีปกติ ตามลำดับ ซึ่งจากการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง พบว่าแบบจำลอง IFAS มีประสิทธิภาพในการประเมินปริมาณน้ำท่าได้ในระดับดี โดยมีค่าดัชนี NSE อยู่ในช่วงระหว่าง 0.81–0.83 และ มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนระหว่าง 1.45–24.11 และจากการวิเคราะห์ลักษณะทางอุทกวิทยาบางประการ พบว่า

ลุ่มน้ำห้วยน้ำตอนบน มีร้อยละน้ำท่าต่อน้ำฝนเฉลี่ยสูงที่สุดในปีลานีญา เท่ากับร้อยละ 31.32 รองลงมาคือปีปกติ เท่ากับร้อยละ 17.29 ซึ่งใกล้เคียงกับปีที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613) มีค่าร้อยละ 19.56 และ 17.54 ตามลำดับ สภาพการให้น้ำท่าสูงสุดในปีลานีญา เท่ากับ 26.39 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ต่อตารางกิโลเมตรต่อปี รองลงมาคือปีปกติปี พ.ศ. 2613 และ พ.ศ. 2593 โดยมีค่า 10.78, 9.69 และ 9.37 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีต่อตารางกิโลเมตรต่อปี ตามลำดับ ปริมาณน้ำท่ารวมสูงสุดในปีลานีญา มีค่า 58,719.90 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีต่อปี ซึ่งปริมาณน้ำท่ารวมในช่วงเดือนพฤษภาคม-ตุลาคม แตกต่างจากปีปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนปริมาณน้ำท่ารวมในปี พ.ศ. 2593 และ พ.ศ. 2613 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติจากปีปกติ เช่นเดียวกันกับปริมาณน้ำท่าสูงสุด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย. 2551. แผนปฏิบัติการป้องกันและบรรเทาปัญหาอุทกภัย วาตภัย และดินถล่ม. แหล่งที่มา: <http://www.cendru.eng.cmu.ac.th/web/13-2.htm>, 17 ตุลาคม 2560.

กรมอุตุนิยมนิเทศ. 2537. อุตุกาลของประเทศไทย. แหล่งที่มา: <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=53>, 6 ตุลาคม 2560.

_____. 2546. เอลนีโญ. แหล่งที่มา: <http://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=17>, 19 พฤศจิกายน 2558.

_____. 2553. รายงานความเสียหายจากการเกิดอุทกภัยจังหวัดน่าน พ.ศ. 2542-2552. กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, กรุงเทพฯ.

จตุพร ผดุงกาญจน์. 2555. ผลของปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญาต่อปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิอากาศ และปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำแม่แตง เชียง และคลองยัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ทัศนภรณ์ คำศรี. 2558. การคาดการณ์น้ำท่าตามการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและสภาพภูมิอากาศของกลุ่มน้ำน่านตอนบน โดยใช้แบบจำลองอุทกวิทยาบนระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ทศวรรษ หานุกาพ. 2556. การประเมินน้ำต้นทุนในเขตจังหวัดภูเก็ต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

พงษ์ศักดิ์ วิทวัสสุทธิกุล, สำเริง ปานอุทัย และบุญมา ดีแสง. 2554. แบบจำลองน้ำท่าป่าต้นน้ำ. ใน

เอกสารประกอบการสัมมนาวิชาการนิเวศวิทยาป่าไม้. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.

มันทนา พฤกษ์วัน. 2531. การหาผลกระทบของเอลนีโญที่มีต่อฝนในประเทศไทย. เอกสารวิชาการเลขที่ 551.578.1-02-2531. กรมอุตุนิยมนิเทศ, กรุงเทพฯ.

_____ และสุดาพร นิ่มมา. 2542. ผลกระทบของลานีญาที่มีผลต่อฝนและอุณหภูมิของประเทศไทย. เอกสารวิชาการเลขที่ 551.46-01-2542. กรมอุตุนิยมนิเทศ, กรุงเทพฯ.

ศูนย์ภูมิอากาศ. 2559. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณฝนจากการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในอนาคต. เอกสารวิชาการเลขที่ 551.577.3-01-2559. กรมอุตุนิยมนิเทศ, กรุงเทพฯ.

สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย. 2551. ภาวะโลกร้อน: ผลกระทบต่อประเทศไทย. แหล่งที่มา: <http://www.greenpeace.org/seasia/th/solargen/climate-change/impacts/impacts-thailand/>, 16 พฤศจิกายน 2560.

Abramowitz, M. and I.A. Stegun. 1972. **Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables**. Dover, New York.

Glantz, M.H. 2001. **Currents of Change: Impacts of El Niño and La Niña on Climate and Society**. 2nd edition. Cambridge University Press, United Kingdom.

Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part1: A discussion of principles. **Journal of Hydrology** 10 (3): 282-290.