

การปรับปรุงเส้นโค้งควบคุมของระบบอ่างเก็บน้ำโดยใช้เทคนิคการค้นหาแบบทาบู และเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการขับเคลื่อนด้วยลม

นิวัตร ภูมิพันธ์^{1*} บรรณณัฐ บริบูรณ์² สุวัชร โกษาแสง³

Received : October 8, 2023

Revised : June 29, 2024

Accepted : August 9, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มุ่งหมายที่จะประยุกต์ใช้เทคนิคการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดร่วมกับแบบจำลองอ่างเก็บน้ำเพื่อค้นหาเส้นโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอ่างเก็บน้ำ โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหา คือ การคำนวณค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดและค่าเฉลี่ยของนํ้าส่วนเกินน้อยที่สุด งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลน้ำตั้งแต่ปี พ.ศ. 2537 - 2565 จำนวน 28 ปี ของอ่างเก็บน้ำอุบล ในตำบลแร่ อำเภอพิบูลย์รักษ์ จังหวัดสุรินทร์ ข้อมูลเหล่านี้ประกอบด้วยปริมาณน้ำที่ไหลมาในแต่ละเดือน ข้อมูลความต้องการใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำ ข้อมูลทางอุทกวิทยาและข้อมูลทางกายภาพของอ่างเก็บน้ำ นอกจากนี้ยังจำลองเหตุการณ์ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายเดือน จำนวน 1,000 ชุดเหตุการณ์ เพื่อใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของเส้นโค้งควบคุมที่สร้างขึ้นจากแบบจำลอง ซึ่งจะแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของสถานการณ์ที่เกิดความขาดแคลนนํ้าและนํ้าส่วนเกิน โดยระบุช่วงเวลาของเหตุการณ์ ปริมาณน้ำเฉลี่ย และปริมาณน้ำสูงสุด ผลการวิจัยพบว่าเส้นโค้งควบคุมจากแบบจำลองแต่ละวิธีมีแนวโน้มที่คล้ายกัน เนื่องจากปริมาณน้ำทำในแต่ละฤดูกาลและเงื่อนไขอื่น ๆ ที่มีความคล้ายกัน เมื่อนำเส้นโค้งควบคุมที่ได้จากแบบจำลองเหล่านี้ไปทดสอบและเปรียบเทียบกับเส้นโค้งควบคุมที่ใช้ในปัจจุบัน พบว่าเส้นโค้งควบคุมที่ได้จากเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการขับเคลื่อนด้วยลม (WDO) สามารถลดความรุนแรงของสถานการณ์นํ้าส่วนเกินได้ดีกว่าโค้งควบคุมที่ได้จากการค้นหาแบบทาบู (TSA) และเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน อย่างไรก็ตามเส้นโค้งควบคุมที่ได้จากแบบจำลองทั้งสองได้แสดงประสิทธิภาพได้ดีกว่าเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน

คำสำคัญ: การค้นหาค่าที่ดีที่สุด การบริหารจัดการน้ำ โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ แบบจำลองทาบู
แบบจำลอง Wind Driven Optimization

¹ อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี อีเมล: niwat.bh@udru.ac.th

² อาจารย์ประจำหลักสูตรคณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี อีเมล: banyat.bo@udru.ac.th

³ หัวหน้าฝ่ายบำรุงรักษา สำนักงานชลประทานที่ 5 จังหวัดอุดรธานี อีเมล: suwapatx@gmail.com

* ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: niwat.bh@udru.ac.th

IMPROVING THE RULE CURVE OF A RESERVOIR SYSTEM USING TABU SEARCH AND WIND-DRIVEN OPTIMIZATION TECHNIQUES

Niwat Bhumiphan^{1*} Banyat Boribum² Suwapat Kosasaeng³

Abstract

This research aimed to apply an optimal search technique together with a reservoir system simulation model to find the appropriate rule curve for the reservoir. The objective function of the search was to calculate the average of the least water shortage and the average of the least water surplus. This research used water data from 1994 to 2022, totaling 28 years, from Oon Reservoir in Rae Subdistrict, Phang Khon District, Sakon Nakhon Province. These data included the amount of water flowing each month, information on water demand from reservoirs, and hydrological and physical data of the reservoir. Additionally, 1,000 water inflow events into the reservoir were simulated to evaluate the performance of the rule curve generated from the model. The results were presented in the form of situations of water scarcity and water surplus which specified the period of the event, average water volume, and maximum water volume. The research results indicate that the rule curves derived from various models exhibit similar trends due to seasonal water variations and similar conditions. When tested and compared to the current rule curve, the Wind- Driven Optimization (WDO) technique demonstrated superior capability in reducing the severity of water surplus situations compared to the Tabu Search Algorithm (TSA) and the current rule curve. Nevertheless, both models outperformed the current rule curve.

Keywords: Optimal value search, Water Management, Rule curve, Tabu search,
Wind-driven optimization

¹ Lecturer, Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University, e-mail: niwat.bh@udru.ac.th

² Lecturer, Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University, e-mail: banyat.bo@udru.ac.th

³ Head of Maintenance Department, Water Management and Maintenance Section, Irrigation Office No. 5, Udon Thani Province, e-mail: suwapatx@gmail.com

* Corresponding author, e-mail: niwat.bh@udru.ac.th

บทนำ

น้ำเป็นทรัพยากรที่สำคัญและมีอยู่อย่างจำกัด ปัญหาทรัพยากรน้ำทำให้เกิดผลกระทบรุนแรงต่อประเทศชาติ ไม่ว่าจะเป็นอุทกภัยหรือภัยแล้ง การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ (Climate change) เป็นสาเหตุหนึ่ง que เปลี่ยนแปลงสมดุลในลุ่มน้ำ ซึ่งส่งผลให้เกิดการไหลบ่าและการระเหยของน้ำ (Kundu et al., 2017a) บางพื้นที่มีฝนตกมากเกินไป ในทางกลับกันบางพื้นที่มีปริมาณน้ำฝนไม่เพียงพอต่อความต้องการ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดิน (Land use change) เนื่องจากการเติบโตของประชากรและความต้องการใช้ที่ดินในกิจกรรมต่าง ๆ นี้ทำให้พื้นที่รับน้ำฝนมีการเปลี่ยนแปลง และมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนไปเป็นพื้นที่ที่น้ำซึมผ่านได้ยากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำไหลบ่าที่พื้นผิวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งปัญหานี้ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตและทรัพย์สิน ในอดีตมีการจัดการปัญหาเหล่านี้ โดยการสร้างสิ่งก่อสร้างเช่น สระเก็บน้ำ คลอง ฝาย เขื่อน และอ่างเก็บน้ำ เพื่อช่วยบรรเทาปัญหาที่เกิดขึ้น มนุษย์ถือเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีการใช้น้ำในหลายด้านมากที่สุดในโลกนี้ น้ำถูกนำมาใช้ประโยชน์ในหลายด้านของชีวิตมนุษย์ ได้แก่ การอุปโภค-บริโภค เช่น การดื่มน้ำและการใช้น้ำในการทำอาหาร การพลังงาน เมื่อน้ำถูกใช้ในการผลิตไฟฟ้าและเครื่องจักรต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม การเกษตรกรรม เพื่อการเพาะปลูกและการเลี้ยงสัตว์ เพื่อผลิตอาหาร การอุตสาหกรรม เมื่อน้ำถูกใช้ในกระบวนการผลิตของสินค้าต่าง ๆ ทองเที่ยว เนื่องจากน้ำมีบทบาทสำคัญในการสร้างที่น่ายุและสถานที่ท่องเที่ยว การผลิตกระแสไฟฟ้า เมื่อน้ำถูกใช้ในการสร้างพลังงานไฟฟ้า การรักษาสมดุลนิเวศ ผ่านการบำบัดน้ำและการควบคุมการใช้น้ำให้เป็นไปอย่างยั่งยืน นอกจากนี้ยังมีผลกระทบด้านน้ำเค็มและการชะล้างน้ำเสีย (Kundu et al., 2017b) ในแหล่งน้ำเพื่อส่งน้ำสะอาดให้กับผู้ใช้งานต่าง ๆ

อ่างเก็บน้ำสามารถแบ่งออกเป็นสองประการหลัก คือการเก็บกักน้ำให้ได้ในปริมาณมากที่สุดและการรองรับปริมาณน้ำฝนที่จะเกิดขึ้น โดยมีการจัดการอ่างเก็บน้ำให้เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หน้าที่แรกคือการเก็บกักน้ำให้มากที่สุดเพื่อป้องกันปัญหาขาดแคลนน้ำในช่วงหน้าแล้ง การเก็บน้ำให้เต็มอ่างเก็บน้ำตั้งแต่ฝนก้อนแรกอาจจะเป็นวิธีที่ดีเพื่อให้มีน้ำในปริมาณมากที่สุดที่เป็นไปได้ แต่หน้าที่ที่สองคือการรองรับน้ำฝนที่จะเกิดขึ้น ซึ่งต้องการอ่างเก็บน้ำที่มีปริมาณน้ำน้อยเพื่อรองรับน้ำฝนเข้ามา ดังนั้นจึงเกิดความขัดแย้งระหว่างการเก็บน้ำให้เต็มอ่างและการรองรับน้ำฝนในปริมาณที่มากพอ (Ngamsert & Kangrang, 2019) สำหรับการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำให้อยู่ในสถานะที่มีความสมดุล นำมาพิจารณาเป็นสิ่งสำคัญ โดยจะต้องมีการวางแผนและปรับปรุงอ่างเก็บน้ำเพื่อให้สามารถสอดคล้องกับทั้งการเก็บน้ำในปริมาณมากและการรองรับน้ำฝนในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถใช้น้ำในกิจกรรมต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็นการเกษตร การใช้ในหมู่บ้าน หรือในการผลิตน้ำประปา การบริหารจัดการนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้อ่างเก็บน้ำทำหน้าที่ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพในทั้งสองประการนี้

การบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำมีความสำคัญในการรักษาสภาพนิเวศที่เหมาะสมและป้องกันปัญหาอุทกภัยและภัยแล้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ การวางแผนระบบการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำในอนาคตเป็นขั้นตอนสำคัญ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้น โดยเฉพาะในการคาดการณ์ปริมาณน้ำที่จะไหลเข้าอ่างและการปล่อยน้ำออกจากอ่าง เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการนี้การคาดการณ์ปริมาณน้ำที่จะไหลเข้าอ่างเก็บน้ำและการวางแผนการปล่อยน้ำออกจากอ่างเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพื่อป้องกันปัญหาอุทกภัยและภัยแล้ง การใช้เครื่องมือและวิธีการต่าง ๆ เช่น Rational method, Theissen method, หรือ Us Soil Conservation Service (S.C.S) และแบบจำลองอื่น ๆ (Techarungruengsakul & Kangrang, 2019) เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการวิเคราะห์และอธิบายสภาพทางอุทกวิทยา ที่จำเป็นสำหรับการวางแผนระบบบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำในอนาคต การบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำที่มีการวางแผนได้อย่างสมบูรณ์และคาดการณ์ได้อย่างแม่นยำจะช่วยลดความเสี่ยงของปัญหาอุทกภัยและปัญหาภัยแล้ง สามารถการจัดการน้ำได้เพียงพอตามความต้องการของชุมชนและธรรมชาติได้อย่างเหมาะสมและยั่งยืนในอนาคต

การประเมินปริมาณการใช้น้ำทั่วไปมักจะใช้โค้งควบคุมการปฏิบัติการของอ่างเก็บน้ำ หรือเรียกอีกอย่างว่า โค้งควบคุม (Rule curve) (Bhumiphan, 2021) โค้งควบคุมประกอบด้วยเส้นกราฟสองเส้น คือเส้นบนแสดงระดับควบคุมตอนบน (Upper Rule Curve, URC) ซึ่งเป็นระดับน้ำที่กำหนดให้เป็นมาตรฐานของอ่างเก็บน้ำในแต่ละเดือน มีความสำคัญที่จะรักษาระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำให้ไม่สูงเกินระดับควบคุมตอนบน เพื่อสำรองปริมาณน้ำระหว่างระดับควบคุมตอนบนกับระดับน้ำเก็บกักสูงสุด ซึ่งจะช่วยป้องกันน้ำท่วมได้ ส่วนเส้นล่างแสดงระดับควบคุมตอนล่าง (Lower Rule Curve, LRC) ซึ่งเป็นระดับน้ำต่ำสุดที่กำหนดในอ่างเก็บน้ำในแต่ละเดือน มีความสำคัญที่จะไม่ให้ระดับน้ำต่ำกว่าระดับควบคุมตอนล่าง เพื่อสำรองปริมาณน้ำระหว่างระดับน้ำควบคุมตอนล่างเพื่อใช้ในฤดูแล้งและระหว่างฤดูฝนตกของปีนั้น ๆ (Kumar & Baliarsingh, 2003) ดังนั้นการรักษาระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำให้อยู่ระหว่างระดับควบคุมตอนบนและระดับควบคุมตอนล่างมีความสำคัญมากในการบรรเทาสถานการณ์น้ำท่วมและการใช้น้ำในฤดูแล้ง

การหาค่าโค้งควบคุมที่เหมาะสมมีหลายวิธีที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ เช่น วิธีการที่ใช้กระบวนการเชิงเส้น (LP) (Gilmore & Gomory, 1963) Dynamic programming (Mendoza et al., 2021; Nagesh et al., 2010) Genetic Algorithms (GA) (Mendoza et al., 2021) Differential Evolution Algorithm (DEA) (Hormwichian et al., 2012) Particle Swarm Optimization (PSO) (Peng et al., 2017; Spiliotis et al., 2016) Tabu Search (TS) (Bhumiphan, 2021) และ Wind Driven Optimization (WDO) (Ibrahim et al., 2020; Kosasaeng et al., 2022) แต่ละวิธีมีข้อดีและความยากง่ายแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการค้นหาแบบทาบู (TS) เป็นอีกเทคนิคทางเลือกที่ใช้สำหรับการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุดในการแก้ปัญหาต่าง ๆ โดยมีหลักการที่เน้นการค้นหาแบบดีเทอร์มินิสติก (Deterministic) โดยไม่พึ่งพาการสุ่มหรือความน่าจะเป็น มีความสามารถในการ

การค้นหาคำตอบในเวลาที่สูงขึ้น แต่มีปัญหาในลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการหาทิศทางหรือการจัดกลุ่มข้อมูล ส่วนเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการขับเคลื่อนด้วยลม (WDO) แนวคิดการเคลื่อนที่ของลมในชั้นบรรยากาศถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ ในการหาค่าเหมาะสม มีความยืดหยุ่นและความสามารถในการปรับการค้นหาคำตอบตามลักษณะของปัญหาได้ดี

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายที่จะประยุกต์ใช้การค้นหาเส้นทางโค้งควบคุมที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำออน อำเภอฟังโคน จังหวัดสกลนคร ด้วยวิธีการค้นหาแบบ (Tabu Search Algorithms : TSA) และเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการขับเคลื่อนด้วยลม (Wind Driven Optimization : WDO)

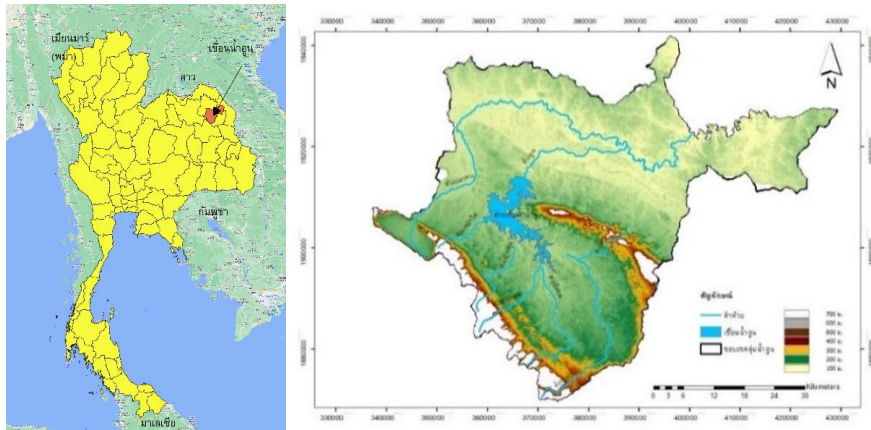
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาการค้นหาเส้นทางโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของอ่างเก็บน้ำ ด้วยวิธีการค้นหาแบบ Tabu Search Algorithms (TSA) และเทคนิค Wind Driven Optimization (WDO) และประเมินประสิทธิภาพของเส้นทางโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำที่ได้จากแบบจำลอง เปรียบเทียบกับเส้นทางโค้งควบคุมปัจจุบัน

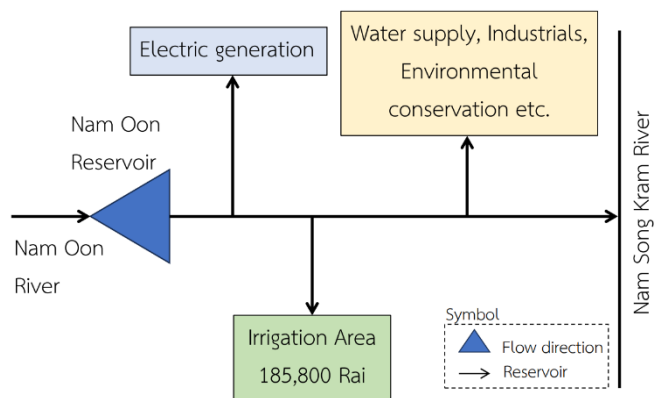
วิธีดำเนินการวิจัย

พื้นที่ศึกษา

การศึกษานี้ได้เลือกอ่างเก็บน้ำออนเป็นพื้นที่ศึกษา อ่างเก็บน้ำออนตั้งอยู่ที่พิกัด 17.213°N 103.744°E ในตำบลแร่ อำเภอฟังโคน จังหวัดสกลนคร ดังแสดงในภาพที่ 1 ตัวอ่างมีความสูงทั้งสิ้น 29.50 เมตร และยาวถึง 3,000 เมตร มีความจุสูงสุดในการเก็บกักน้ำได้ถึง 780 ล้าน ลบ.ม. และระดับน้ำเก็บกักสูงสุดที่ 187.60 ม. ปริมาตรเก็บกักเก็บน้ำต่ำสุด (Dead storage) เท่ากับ 45 ล้าน ลบ.ม. การระบายน้ำล้นได้ที่อัตรา 2 ลบ.ม./วินาที อ่างเก็บน้ำออนเป็นสาขาหนึ่งของแม่น้ำสงครามมีการใช้ประโยชน์หลายประการ เช่น ความต้องการด้านผลิตไฟฟ้า ด้านการชลประทาน ด้านการเกษตร ด้านอุตสาหกรรม และด้านการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ดังแสดงในภาพที่ 2 การเพาะปลูกในช่วงฤดูฝนบริเวณที่มีขนาดใหญ่ถึง 185,800 ไร่ และในฤดูแล้ง 63,000 ไร่ นอกจากนี้ อ่างเก็บน้ำออนสามารถช่วยบรรเทาอุทกภัยในลุ่มน้ำออน เมื่อเริ่มต้นคำนวณการจำลองระบบของอ่างเก็บน้ำ เพื่อการจัดการน้ำ ขั้นแรกคือการกำหนดปริมาณน้ำเริ่มต้นที่อ่างเก็บน้ำจะมีในระดับเต็ม (Full capacity) ให้เป็นปริมาณรกกักเก็บสูงสุด สำหรับปริมาณน้ำที่จะถูกปล่อยระบายออกจากอ่างเก็บน้ำในแต่ละเดือนจะต้องเป็นไปตามเกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน (Standard operating rule) ซึ่งแสดงในภาพที่ 3 สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 1 สำหรับพื้นที่เพาะปลูกในช่วงฤดูฝน และในช่วงฤดูแล้งซึ่งเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญในการวางแผนการจัดการน้ำในระบบนี้



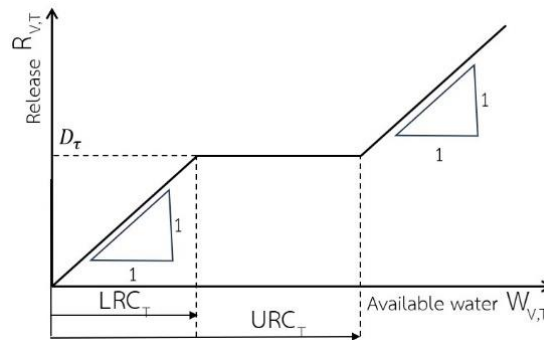
ภาพที่ 1 ที่ตั้งอ่างเก็บน้ำอุ๋น



ภาพที่ 2 แผนผังลุ่มน้ำอุ๋น

แบบจำลองการเลียนแบบสภาพสมตุลน้ำ

การศึกษาการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำในแต่ละลุ่มน้ำ แบบจำลองที่นิยมใช้คือ HEC-5, HEC-HMS และ HEC-RAS (Rodriguez et al., 2008; ณัฐพล แก้วทอง และคณะ, 2563) โดยมีหลักการเดียวกัน เช่น การสมตุลน้ำ การศึกษาได้สร้างแบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำขึ้นมา โดยยึดหลักการเดียวกันกับแบบจำลองที่กล่าวมา และเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ของการเชื่อมต่อกับเทคนิคการค้นหาแบบ TSA และ WDO ในอนาคตแบบจำลองที่สร้างนี้จะสามารถใช้ในการหาสถานการณ์ที่ขาดแคลนน้ำและสถานการณ์ที่น้ำส่วนเกินได้ รวมถึงความถี่ของการเกิดขึ้น ปริมาณน้ำ และช่วงเวลา



ภาพที่ 3 เกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน

$$R_{V,T} = \begin{cases} D_T + W_{V,T} - URC_T & \text{For } W_{V,T} \geq URC_T + D_T \\ D_T & \text{For } LRC_T \leq W_{V,T} < URC_T + D_T \\ D_T + W_{V,T} - LRC_T & \text{For } LRC_T - D_T \leq W_{V,T} < LRC_T \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

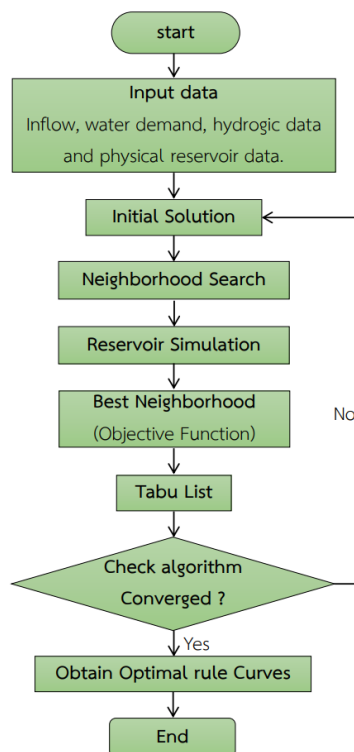
โดย $R_{V,T}$ คือ ปริมาณน้ำที่ระบายออกจากอ่างเก็บน้ำ (หน่วย ล้าน ลบ.ม.) ในช่วงปี n ของเดือน T ($T = 1$ ถึง 12 แทน เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม) D_T คือ ความต้องการใช้น้ำท้ายอ่างของเดือน T (หน่วย ล้าน ลบ.ม.) LRC_T คือ ขอบเขตล่างของโค้งควบคุมของแต่ละเดือน T , URC_T คือ ขอบเขตบนของโค้งควบคุมของเดือน T , $W_{V,T}$ คือ ปริมาณน้ำต้นทุนที่มีอยู่ของอ่างในเดือน T (หน่วย ล้าน ลบ.ม.)

$$W_{V,T+1} = S_{V,T} + Q_{V,T} - R_{V,T} - E_T - DS \quad (2)$$

โดย $S_{V,T}$ คือ ปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเมื่อสิ้นสุด เดือน T (หน่วย ล้าน ลบ.ม.) $Q_{V,T}$ คือ ปริมาณน้ำท่ารายเดือนที่ไหลเข้าอ่างในเดือน T ปี n (หน่วย ล้าน ลบ.ม.) E_T คือ ค่าการระเหยรายเดือนเฉลี่ยเดือน T (หน่วย ล้าน ลบ.ม.) และ DS (Dead storage) คือ ปริมาตรเก็บกักที่ไม่ได้ใช้การ (หน่วย ล้าน ลบ.ม.) เมื่อทำการจำลองสภาพสมตูลน้ำโดยใช้แบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำที่สร้างขึ้นจนครบจำนวนปีที่มีข้อมูลแล้ว ผลการจำลองจะแบ่งออกเป็นสถานการณ์การขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดและสถานการณ์การนํ้าส่วนเกินน้อยที่สุด โดยจะถูกบันทึกข้อมูลตามความถี่และช่วงเวลาของเหตุการณ์ต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดต่อไป

การประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบทาบูกับแบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำ

การคำนวณค่าเส้นโค้งควบคุมจากแบบจำลองเทคนิคการค้นหาแบบ TSA โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการทำงานจำนวนรอบของการทำงาน เริ่มต้นโดยการสร้างเซตของคำตอบเริ่มจากการคำนวณระยะทางที่ลดลงได้มากที่สุดตามค่าเริ่มต้น ที่กำหนดโดยเส้นทางที่สร้างขึ้นจาก Saving methods ซึ่งคือการเลือกค่าเส้นโค้งควบคุมในแต่ละเดือนทั้ง 12 เดือน จำนวน 24 ค่า เป็นการสร้างค่าเส้นโค้งควบคุมเริ่มต้น หลังจากนั้นนำค่าเส้นโค้งควบคุมที่ได้มาดำเนินการ Reservoir operation แล้วคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องปล่อยออกจากอ่างในแต่ละเดือนภายใต้เส้นโค้งควบคุมชุดนี้ เพื่อนำไปประเมินสถานการณ์การคลื่อนน้ำตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาคำตอบ การศึกษาครั้งนี้ใช้ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ค่าเฉลี่ยของน้ำส่วนเกินน้อยที่สุด ค่าความถี่ของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด และค่าปริมาณการขาดแคลนสูงสุดที่น้อยที่สุด เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาคำตอบในกรณีใช้น้ำปกติและกรณีเพิ่มความต้องการใช้น้ำ ซึ่งแสดงดังสมการ (3) การทำงานของเทคนิคนี้จะเป็นแบบวนซ้ำจนกว่าจะถึงเงื่อนไขที่ตั้งไว้ หากไม่ถึงเงื่อนไขที่ตั้งไว้จะทำงานต่อไปจนครบรอบที่กำหนดและได้ค่าโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การประยุกต์ใช้เทคนิคการค้นหาแบบทาบูกับแบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำสำหรับการค้นหาเส้นโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุด

$$\text{Min}_{(\text{avr})} = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^n \text{Sh}_v \quad (3)$$

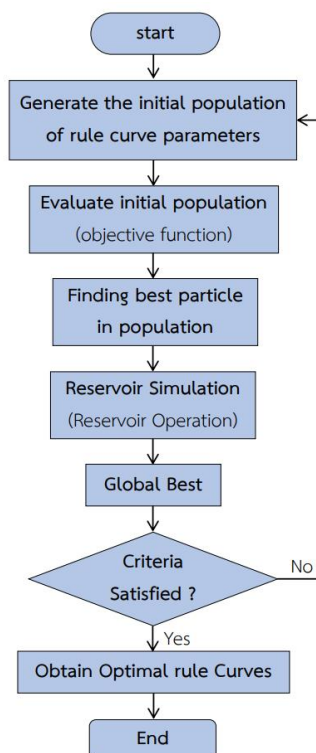
โดย n คือ ความยาวของชุดข้อมูลปริมาณน้ำต้นทุน Sh_v คือ ปริมาณน้ำที่ขาดในปี V (ปริมาณน้ำที่ปล่อยน้อยกว่าเป้าหมายความต้องการใช้น้ำ) กรณีความถี่ของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดจะเปลี่ยนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการค้นหาคำตอบเป็นความถี่ของการขาดแคลนดังสมการ (4)

$$\frac{Y_n}{\sum Y_{in}} \quad (4)$$

โดย Y_n คือ จำนวนปีที่ขาดแคลนนํ้า และ $\sum Y_{in}$ คือ จำนวนปีของข้อมูลปริมาณน้ำท่าทั้งหมด

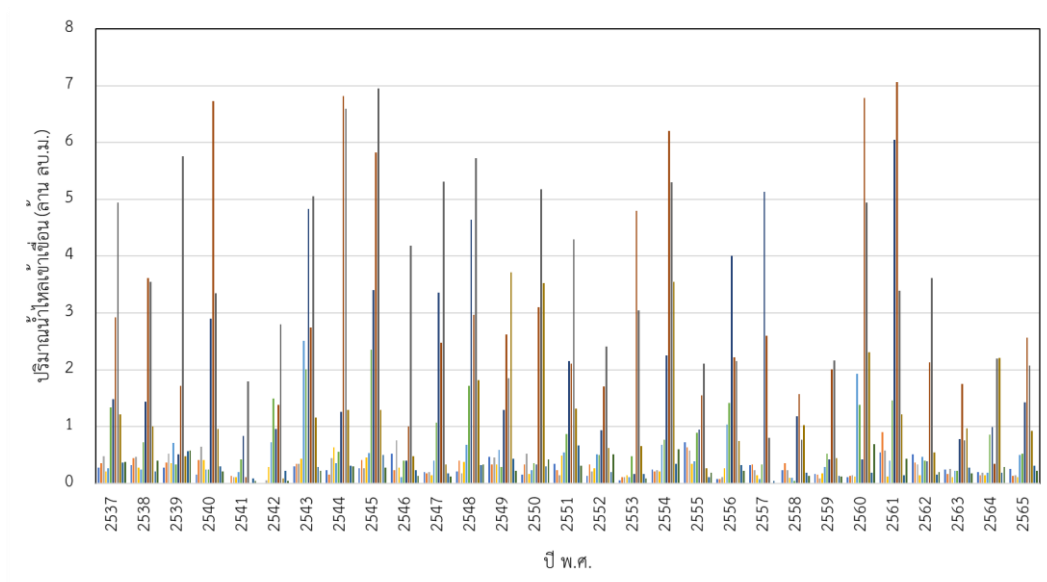
การประยุกต์ใช้วิธี Wind Driven Optimization กับแบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำ

การคำนวณหาค่าเส้นโค้งควบคุมจากแบบจำลองเทคนิคการค้นหาแบบ WDO โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการทำงานและจำนวนรอบของการทำงานที่ต้องการทำ สร้างประชากรเริ่มต้นโดยการสร้างเซตของคำตอบเริ่มต้น ซึ่งเป็นการเลือกค่าเส้นโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำแต่ละเดือนทั้ง 12 เดือน จำนวน 24 ค่า เป็นการสร้างค่าโค้งควบคุมเริ่มต้น หลังจากนั้นสร้างเซตของคำตอบใกล้เคียงที่เป็นไปได้โดยการเลือกเซตคำตอบใกล้เคียงที่ดีที่สุดตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ทำการตรวจสอบเงื่อนไขพิจารณาเกณฑ์ความปรารถนา (Aspiration criteria) โดยกำหนดเป็นเงื่อนไขสำหรับพิจารณาเซตของคำตอบข้างเคียง ตรวจสอบรอบการทำงาน (Stopping criteria) และหากยังไม่ถึงเงื่อนไขที่ตั้งไว้ จะทำงานต่อไปจนกระทั่งเมื่อครบรอบที่กำหนดแล้วและได้ค่าเส้นโค้งควบคุมที่เหมาะสมตามเงื่อนไข นำค่าโค้งควบคุมที่ได้มาดำเนินการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir operation simulation) คำนวณปริมาณน้ำที่ต้องปล่อยในแต่ละเดือนเป็นไปตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาคำตอบ การศึกษาครั้งนี้ใช้ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ค่าเฉลี่ยของน้ำส่วนเกินน้อยที่สุด ค่าความถี่ของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด และค่าปริมาณการขาดแคลนสูงสุดที่น้อยที่สุด เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาคำตอบในกรณีใช้น้ำปกติและกรณีเพิ่มความต้องการใช้น้ำ ซึ่งแสดงดังสมการ (3) การทำงานของเทคนิคนี้จะเป็นแบบวนซ้ำหากยังไม่ถึงเงื่อนไขที่ตั้งไว้ จะทำงานต่อไปจนกระทั่งเมื่อครบรอบที่กำหนดและได้ค่าโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุด ดูตัวอย่างการทำงานในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การประยุกต์เทคนิค Wind Driven Optimization สำหรับการค้นหาเส้นโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุด

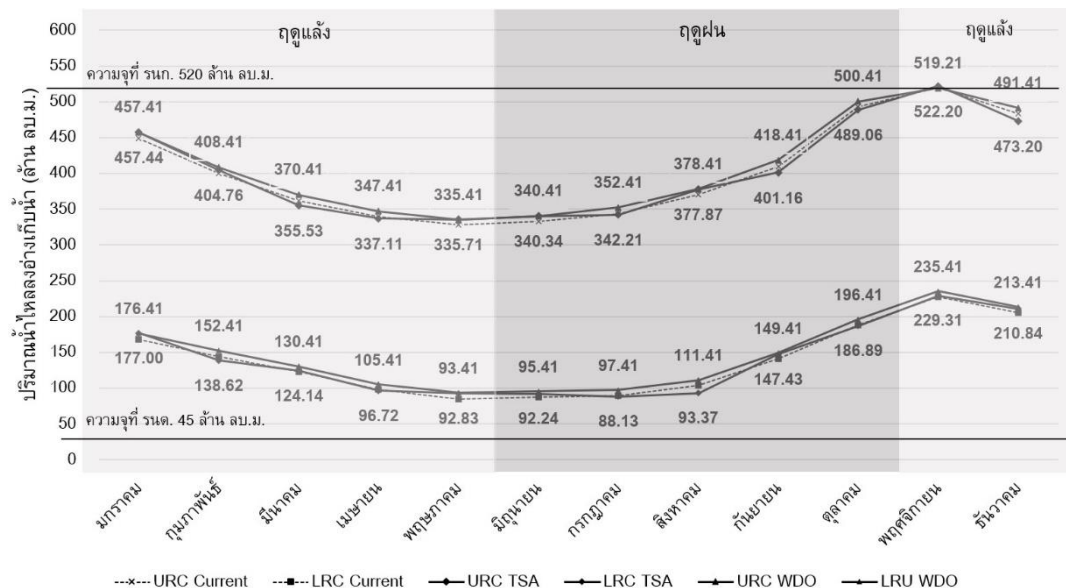
การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองเทคนิคการค้นหาแบบ TSA และ WDO จะดำเนินการโดยนำค่าเส้นโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมที่สุดใช้ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในระยะยาวด้วยข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำด้วยการสังเคราะห์ข้อมูลขึ้นมา 1,000 ชุดเหตุการณ์ จากข้อมูลน้ำที่ไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำจำนวน 28 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2537–2565 ดังภาพที่ 6 ด้วยแบบจำลอง HEC-4 (วิเชียร ปลื้มกมล, 2536) ครอบคลุมเหตุการณ์ที่คาดการณ์ว่าจะเกิดขึ้นรวมถึงเหตุการณ์ในอดีตที่เคยเกิดขึ้นมาแล้ว เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบจากกฎของการจัดการและการควบคุม จากนั้นคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องปล่อยในแต่ละเดือนภายใต้เส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ และจะแสดงผลเป็นสถานการณ์ขาดแคลนน้ำและน้ำส่วนเกิน รวมถึงความถี่ของการเกิดขึ้นปริมาณ และช่วงเวลา



ภาพที่ 6 ข้อมูลน้ำทำตั้งแต่ปี พ.ศ. 2537-2565 จำนวน 28 ปี

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลจากการสร้างเส้นโค้งควบคุมจากแบบจำลองการเลียนแบบร่วมกับแบบจำลองการค้นหาแบบ TSA และ WDO ถูกนำมาเปรียบเทียบกับเส้นโค้งควบคุมที่ใช้ในปัจจุบัน (Current) โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำทำ จำนวน 28 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2537-2565 ดังภาพที่ 6 ใช้ความต้องการน้ำแบบรายเดือนซึ่งเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำที่ได้ จะใช้สำหรับกรณีที่สถานการณ์น้ำปกติทั่วไป ดังแสดงในภาพที่ 7 จากภาพจะเห็นว่าเส้นโค้งควบคุมใหม่ตาม ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้จากแบบจำลองการค้นหาแบบ TSA และ WDO มีหลายจุดที่ได้ค่าแตกต่างกันแต่มี แนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน เส้นโค้งควบคุมใหม่ที่ได้จากเทคนิค WDO จะสูงกว่า TSA และเส้นโค้งควบคุมที่ใช้ใน ปัจจุบัน ซึ่งเป็นการลดการปล่อยน้ำในช่วงฤดูแล้งตั้งแต่เดือนธันวาคมถึงเดือนมิถุนายน ส่งผลให้น้ำที่เหลืออยู่ใน อ่างเก็บน้ำมากขึ้น เพื่อกักเก็บน้ำไว้ใช้ตามความจำเป็น ช่วยลดการขาดแคลนน้ำในช่วงหน้าแล้งได้ดี และค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นในเดือนพฤษภาคมถึงเดือนพฤศจิกายนซึ่งทำให้กักเก็บน้ำไว้ได้มากขึ้นเนื่องจากสิ้นสุดฤดูกาลเพาะปลูก แล้ว ส่วนเส้นโค้งควบคุมที่ได้จากการค้นหาแบบ TSA นั้นมีความคล้ายคลึงกับเส้นโค้งควบคุมที่ใช้ในปัจจุบัน แต่มีบางจุดที่สูงกว่าแต่มีแนวโน้มของเส้นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งในเดือนกรกฎาคมเป็นการพร่องน้ำออกจาก อ่างเก็บน้ำ เพื่อที่จะทำให้อ่างเก็บน้ำมีปริมาตรเพียงพอที่จะรับน้ำฝน หรือรองรับปริมาณน้ำไหลหลากที่อาจจะ เกิดขึ้นเพื่อป้องกันการเกิดน้ำท่วมได้



ภาพที่ 7 เส้นโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของอ่างเก็บน้ำอูน

ตารางที่ 1 ประเมินผลเส้นโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำ จากข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอดีต จำนวน 28 ปี

Situations	Rule curves	Frequency (Time/year)	Volume (MCM/year)		Time period (year)	
			Average	Maximum	Average	Maximum
Shortage	Current	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	TSA	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	WDO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Overflow	Current	1.000	250.540	470.730	30.000	30.000
	TSA	1.000	250.030	469.140	30.000	30.000
	WDO	1.000	250.000	469.000	30.000	30.000

จากตารางที่ 1 พบว่าผลลัพธ์ของเส้นโค้งควบคุมทั้ง 3 สถานการณ์น้ำขาดแคลนมีค่าเท่ากัน ไม่เกิดการขาดแคลนน้ำ และมีค่าความถี่ของน้ำส่วนเกินเท่ากันทั้ง 3 แบบ ส่วนปริมาณน้ำส่วนเกินพบว่าเส้นโค้งควบคุมที่ได้จากจากจากเทคนิค WDO มีค่าน้ำส่วนเกินเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ 250.000 ล้าน ลบ.ม เส้นโค้งควบคุมที่ได้จากการค้นหาแบบ TSA คือ 250.030 ล้าน ลบ.ม และเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน คือ 250.540 ล้าน ลบ.ม ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่างานของ (เจษฎา ตงศิริ และอนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง, 2561) จากผลลัพธ์เหล่านี้อธิบายได้ว่าเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำที่ถูกสร้างขึ้นจากแบบจำลองมีประสิทธิภาพดีกว่าเส้นโค้งควบคุมปัจจุบันเล็กน้อยกับเหตุการณ์สถานการณ์น้ำปกติ

ตารางที่ 2 ประเมินผลเส้นโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำ จากข้อมูลการสังเคราะห์เหตุการณ์ปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ จำนวน 1,000 ชุดเหตุการณ์

Situations	Rule curves	Frequency (Time/year)	Volume (MCM/year)		Time period (year)	
			Average	Maximum	Average	Maximum
Shortage	Current	μ	0.000	0.000	0.000	0.000
		σ	0.000	0.000	0.000	0.000
	TSA	μ	0.000	0.000	0.000	0.000
		σ	0.000	0.000	0.000	0.000
	WDO	μ	0.000	0.000	0.000	0.000
		σ	0.000	0.000	0.000	0.000
Overflow	Current	μ	0.992	247.897	22.602	23.616
		σ	0.019	23.437	5.169	3.339
	TSA	μ	0.992	246.910	22.819	23.723
		σ	0.019	23.436	4.967	3.723
	WDO	μ	0.992	246.325	22.806	23.716
		σ	0.019	23.438	4.978	3.244

หมายเหตุ μ = ค่าเฉลี่ย, σ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการประเมินประสิทธิภาพของเส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำที่ได้จากการค้นหาแบบ TSA และ WDO เปรียบเทียบกับเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน ด้วยข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่สังเคราะห์ จำนวน 1,000 ชุดเหตุการณ์ จากตารางที่ 2 พบว่าผลลัพธ์ของสถานการณ์ขาดแคลนน้ำของเส้นโค้งควบคุมทั้ง 3 แบบ มีค่าเท่ากันคือไม่ขาดแคลนน้ำ สอดคล้องกับงานของ (เจษฎา ตงศิริ และอนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง, 2561) แต่สถานการณ์น้ำส่วนเกินพบว่า มีโอกาสเกิดขึ้น 0.992 ครั้งต่อปี ทั้ง 3 แบบ ส่วนปริมาณน้ำส่วนเกินเฉลี่ยเส้นโค้งควบคุมปัจจุบันสามารถลดปริมาณน้ำส่วนเกินเฉลี่ย คือ 247.897 ล้าน ลบ.ม เส้นโค้งควบคุมที่ได้จากการค้นหาแบบ TSA คือ 246.910 ล้าน ลบ.ม อย่างไรก็ตามพบว่าเส้นโค้งควบคุมที่ได้จากเทคนิค WDO คือ 246.325 ล้าน ลบ.ม สามารถลดปริมาณน้ำส่วนเกินได้ดีกว่าเส้นโค้งควบคุมจากการค้นหาแบบ TSA และเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน ส่วนช่วงเวลาเฉลี่ยการเกิดน้ำส่วนเกินพบว่าเส้นโค้งควบคุมปัจจุบันดีกว่าเส้นโค้งควบคุมที่ได้จากเทคนิค WDO และ TSA คือ 22.602 ปี 22.806 ปี และ 22.819 ปี ตามลำดับ

สรุป

การปรับปรุงเส้นโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมที่สุด ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการค้นหาแบบ TSA และ WDO เปรียบเทียบกับเส้นโค้งควบคุมที่ใช้ในปัจจุบัน โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาคำตอบ คือ การคำนวณค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดและค่าเฉลี่ยของน้ำส่วนเกินน้อยที่สุด พบว่า เส้นโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำทั้ง 3 แบบ ได้ค่าเส้นโค้งควบคุมที่แตกต่างกัน แต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและมีลักษณะการสูงขึ้น-ลดลงของเส้นโค้งควบคุมที่คล้ายคลึงกัน เช่น เส้นโค้งควบคุมจากเทคนิค WDO สูงกว่าเส้นโค้งควบคุมที่

ได้จากการค้นหาแบบ TSA และเส้นโค้งควบคุมที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งส่งผลให้ลดการปล่อยน้ำในช่วงฤดูแล้งตั้งแต่เดือนธันวาคมถึงเดือนมิถุนายน ทำให้มีน้ำกักเก็บไว้ใช้ตามความจำเป็นมากขึ้น ลดการขาดแคลนน้ำในช่วงหน้าแล้งได้ดี และจะเพิ่มสูงขึ้นในเดือนกรกฎาคมถึงเดือนพฤศจิกายนซึ่งทำให้กักเก็บน้ำไว้ได้มากขึ้นเนื่องจากสิ้นสุดฤดูการเพาะปลูก เมื่อนำเส้นโค้งควบคุมทั้ง 3 แบบมาทดสอบประสิทธิภาพเปรียบเทียบกันโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ พบว่าค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดมีค่าเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าเทคนิคการค้นหาแบบ TSA และ WDO สามารถค้นหาเส้นโค้งควบคุมที่เหมาะสม ช่วยบรรเทาสภาวะน้ำท่วมและสภาวะน้ำแล้งของอ่างเก็บน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อนำมาประเมินประสิทธิภาพโดยการสังเคราะห์ปริมาณน้ำท่า 1,000 ชุดเหตุการณ์ พบว่าเส้นโค้งควบคุมที่ได้จาก WDO มีประสิทธิภาพมากกว่าเส้นโค้งควบคุมที่ได้จากเทคนิค TSA และเส้นโค้งควบคุมปัจจุบันเล็กน้อย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเส้นโค้งควบคุมที่ได้จาก TSA และ WDO มีประสิทธิภาพในการลดการขาดแคลนน้ำและน้ำส่วนเกินของอ่างเก็บน้ำได้เป็นอย่างดีในสภาวะการใช้น้ำปกติทั่วไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่ได้สนับสนุนทุน และส่วนบริหารจัดการน้ำและบำรุงรักษาสำนักงานชลประทานที่ 5 จังหวัดอุดรธานีที่ให้การสนับสนุนข้อมูลต่าง ๆ ในการใช้ในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- เจษฎา ตงศิริ, และอนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง. (2561). การพยากรณ์ปริมาณน้ำท่าในอนาคตภายใต้การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางอุทกวิทยาและการปรับปรุงโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ น้ำอุ้น ด้วยเทคนิคเจเนติกอัลกอริทึม. *Journal of Science & Technology MSU*, 37(6).
- ณัฐพล แก้วทอง, ปกรณ์ ดิษฐกิจ, สรายุทธ์ นาครอด, และชยณัฐ บัวทองเกื้อ. (2563). การประยุกต์ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ HEC-HMS และ HEC-RAS เพื่อศึกษาแนวทางการบรรเทาอุทกภัยของอำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช. *Journal of Science & Technology MSU*, 39(3).
- วิเชียร ปลื้มกมล. (2536). การสังเคราะห์ข้อมูลน้ำท่าโดยใช้โปรแกรม HEC-4 (Runoff Generation by HEC-4). *Engineering and Applied Science Research*, 20(1), 31-37.
- Bhumiphan, N. (2021). Improvement of Optimal Reservoir Operation Rule Curve by Tabu Search: A Case Study of Huai Luang. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 31(3), 461-470.
- Gilmore, P. C., & Gomory, R. E. (1963). A linear programming approach to the cutting stock problem—Part II. *Operations research*, 11(6), 863-888.
- Hormwichian, R., Kangrang, A., Lamom, A., Chaleeraktrakoon, C., & Patamatamkul, S. (2012). Coupled-operations model and a conditional differential evolution algorithm for improving reservoir management. *International Journal of Physical Sciences*, 7(42), 5701-5710.

- Ibrahim, I. A., Hossain, M., Duck, B. C., & Nadarajah, M. (2020). An improved wind driven optimization algorithm for parameters identification of a triple-diode photovoltaic cell model. **Energy Conversion and Management**, 213, 112872.
- Kosasaeng, S., Yamoat, N., Ashrafi, S. M., & Kangrang, A. (2022). Extracting Optimal Operation Rule Curves of Multi-Reservoir System Using Atom Search Optimization, Genetic Programming and Wind Driven Optimization. **Sustainability**, 14(23), 16205.
- Kumar, D. N., & Baliarsingh, F. (2003). Folded dynamic programming for optimal operation of multireservoir system. **Water Resources Management**, 17, 337-353.
- Kundu, S., Khare, D., & Mondal, A. (2017a). Individual and combined impacts of future climate and land use changes on the water balance. **Ecological Engineering**, 105, 42-57.
- Kundu, S., Khare, D., & Mondal, A. (2017b). Past, present and future land use changes and their impact on water balance. **Journal of environmental management**, 197, 582-596.
- Mendoza, R. R., Arganis J. M. L., Domínguez M. R., Padilla M. L. D., Fuentes M. Ó. A., Mendoza Reséndiz, A., Carrizosa E. E., & Carmona P. R. B. (2021). Operation policies through dynamic programming and genetic algorithms, for a reservoir with irrigation and water supply uses. **Water Resources Management**, 35, 1573-1586.
- Nagesh K. D., Baliarsingh, F., & Srinivasa R. K. (2010). Optimal reservoir operation for flood control using folded dynamic programming. **Water Resources Management**, 24, 1045-1064.
- Ngamsert, R., & Kangrang, A. (2019). **Estimation of Water Demand from Reservoir by Participation and Reservoir Operation**. (Doctoral dissertation, Mahasarakham University).
- Peng, Y., Peng, A., Zhang, X., Zhou, H., Zhang, L., Wang, W., & Zhang, Z. (2017). Multi-Core parallel particle swarm optimization for the operation of Inter-Basin water transfer-supply systems. **Water Resources Management**, 31, 27-41.
- Rodriguez, L. B., Cello, P. A., Vionnet, C. A., & Goodrich, D. (2008). Fully conservative coupling of HEC-RAS with MODFLOW to simulate stream-aquifer interactions in a drainage basin. **Journal of Hydrology**, 353(1-2), 129-142.
- Spiliotis, M., Mediero, L., & Garrote, L. (2016). Optimization of hedging rules for reservoir operation during droughts based on particle swarm optimization. **Water Resources Management**, 30, 5759-5778.
- Techarungruengsakul, R., & Kangrang, A. (2019). **Estimation of Reservoir Inflow by Participation and Reservoir Operation**. (Doctoral dissertation, Mahasarakham University).