

เกณฑ์การจัดสรรน้ำที่เหมาะสมด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาแบบทาบ Optimal Water Allocation Criteria using the Tabu Search Technique

เกียรติพงษ์ สายเมือง,¹ อนงกริทธิ์ แข็งแรง^{2*}

Kiattipong Saimuang,¹ Anongrit Kangrang^{2*}

Received: 23 February 2016; Accepted: 1 May 2016

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีความมุ่งหมายเพื่อประยุกต์ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาแบบทาบร่วมกับแบบจำลองการเลียนแบบเพื่อปรับปรุงโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำ โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 กรณี คือ ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด ความถี่ของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด และปริมาณการขาดแคลนสูงสุดที่น้อยที่สุด เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในกระบวนการค้นหาคำตอบ การศึกษาที่พิจารณาข้อมูลโค้งควบคุมรายเดือนของอ่างเก็บน้ำลำปาว จังหวัดกาฬสินธุ์ เป็นกรณีศึกษา ซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำตั้งแต่ปี พ.ศ. 2511 - พ.ศ. 2557 ข้อมูลความต้องการใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำ ข้อมูลอุทกวิทยา และข้อมูลทางกายภาพของอ่างเก็บน้ำลำปาว นอกจากนี้ยังได้สังเคราะห์ข้อมูลน้ำท่ารายเดือนที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจำนวน 100 ชุด เพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพของโค้งควบคุมที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งจะแสดงผลเป็นสถานการณ์น้ำขาดแคลนและน้ำไหลล้น ในรูปแบบความถี่ ช่วงเวลาของเหตุการณ์ ปริมาณน้ำเฉลี่ย และปริมาณน้ำสูงสุด

ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 3 รูปแบบข้างต้นนั้นจะได้โค้งควบคุมใหม่ที่มีรูปร่างคล้ายคลึงกับโค้งควบคุมเดิม เนื่องจากอิทธิพลของน้ำท่าในแต่ละฤดูกาลและเงื่อนไขอื่นที่เหมือนกัน เมื่อนำโค้งควบคุมใหม่เหล่านี้ไปทดสอบและเปรียบเทียบกับโค้งควบคุมเดิมที่ใช้อยู่ พบว่าโค้งใหม่ที่หาโดยใช้ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในกระบวนการค้นหาสามารถบรรเทาสภาวะน้ำท่วมและน้ำขาดแคลนได้ดีกว่าโค้งที่เกิดจากการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์อื่นและยังดีกว่าโค้งควบคุมเดิมด้วย หลังจากนั้นนำโค้งควบคุมที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดมาทดสอบและเปรียบเทียบกับโค้งควบคุมเดิมเพิ่มเติมอีก โดยการเพิ่มการใช้น้ำชลประทาน 20% และเพิ่มปริมาณฝนใช้การ 20% ใช้ข้อมูลการไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำที่สังเคราะห์ในอดีต 47 ปี จำนวน 100 ชุดข้อมูล พบว่า ยังก็ดีกว่าโค้งควบคุมเดิมอีกด้วย

คำสำคัญ : โค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำ การหาค่าเหมาะสมที่สุด การค้นหาแบบทาบ การบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ

Abstract

This research aims to apply the Tabu Search technique connected with a simulation model to improve the rule curve of a reservoir. The function of three cases: the minimal average water shortage, minimal frequency of water shortages and minimal amount of water shortage were used for the objective function for the search procedure. The monthly rule curves of Lampao reservoir located in Kalasin province were considered in this study. The inflow record from 1968 to 2014, net water demand from the reservoir, hydrologic data and physical data of the Lampao reservoir were used in the study. In addition, 100 samples of generated inflow data were used to evaluate the performance of the newly obtained rule curves. The results presented the situation of water shortage and excess release in terms of frequency and duration, amount of average and maximum.

¹ นิสิตปริญญาโท, ² รองศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

¹ Graduate students, ² Assoc. Prof., Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand.

* Corresponding author; Assoc. Prof. Anongrit Kangrang, Ph.D., Faculty of Engineering Mahasarakham University, Kantharawichai District, Maha Sarakham 44150, Thailand. E-mail: anongrit.k@msu.ac.th

The results found that the proposed model with three objective functions provided new rule curves. The patterns of these new rule curves are similar due to seasonal inflow effect and similar conditions. These obtained rule curves were used to evaluate and compare with the existing rule curves. The results present that the rule curves, using average water shortage as an objective function in the searching process, were more suitable than the other rule curves including the existing rule curves. Then, the obtained rule curves of the proposed model using average water shortage as an objective function were used to evaluate with synthetic inflow of 100 samples. There were 3 conditions including normal condition, increasing 20% of water demand and increasing 20% effective rain fall. The results also found that the new rule curves of using average water shortage as an objective function can alleviate situations of water shortage and flood more than other rule curves as well as including the rule curves.

Keywords: Reservoir rule curves, Optimization techniques, Tabu Search, Reservoir management.

บทนำ

ในสภาวะการณ์ปัจจุบัน ทรัพยากรน้ำเป็นปัญหาที่มีความสำคัญอย่างยิ่งของประเทศ ปัญหาการขาดแคลนน้ในหน้าวันจะทวีความรุนแรง ซึ่งมีผลมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร การขยายตัวของชุมชนเมืองตามความเจริญเติบโตของประเทศ ตลอดจนการผันแปรของสภาพภูมิอากาศอีกทั้งได้มีการเลือกสถานที่ก่อสร้างแหล่งเก็บน้ำที่มีลักษณะภูมิประเทศที่เหมาะสมไปเกือบหมดสิ้นแล้ว สถานที่ที่จะสามารถก่อสร้างแหล่งเก็บน้ำที่ยังคงเหลืออยู่ก็มักจะประสบปัญหาที่ไม่เหมาะสมหรือมีข้อจำกัดทางด้านทรัพยากรสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ ซึ่งล้วนแต่เป็นเงื่อนไขที่ทำให้ไม่สามารถเปิดโครงการพัฒนาแหล่งน้ำใหม่ๆ ขึ้นมา จึงทำให้เกิดปัญหาเรื่องความต้องการใช้น้ำ และความสามารถในการจัดสรรน้ำตามมาในภายหลัง ปัญหาเรื่องน้ำจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญมากยิ่งขึ้นเป็นทวีคูณ ดังนั้น น้ำจึงเป็นทรัพยากรธรรมชาติของคนไทยที่ต้องมีการบริหารจัดการทั้งปริมาณและคุณภาพอย่างเป็นรูปธรรมทั้งในระยะสั้นและระยะยาว โดยทั้งหน่วยงานภาครัฐ ภาคเอกชน ผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่าย และชุมชนในลุ่มน้ำ ควรต้องร่วมกันทบทวนและปรับปรุงกระบวนการจัดการน้ำบางส่วนให้มีความเหมาะสมกับกาลปัจจุบันด้วยแนวคิดของนโยบายที่ตั้งอยู่บนฐานแห่งความเป็นจริง และสามารถปฏิบัติได้โดยอาศัยข้อมูล ความรอบรู้ และสติปัญญาของผู้เกี่ยวข้องทุกฝ่ายที่เข้าใจในรากเหง้าแห่งปัญหา ซึ่งการจัดการน้ำในปัจจุบันควรมีกลไกสำคัญได้แก่ การมีส่วนร่วมของทุกฝ่ายในการทำงานแบบร่วมด้วยช่วยกันคิด ช่วยกันหารูปแบบและวิธีดำเนินการแก้ปัญหาต่างๆ แบบบูรณาการในทุกมิติเสมอ จึงจะบังเกิดผลสัมฤทธิ์อย่างยั่งยืนโดยไม่เกิดความขัดแย้งในสังคม

ในการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำนั้นใช้เครื่องมือพื้นฐานที่สำคัญและจำเป็นในการปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำคือ โค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงและผันแปรของข้อมูลด้านเข้าที่ใช้ในการจัดการ

อยู่ตลอดอีกทั้งไม่มีความแน่นอนตายตัว ซึ่งจะเป็นปัญหาแบบพลวัต ดังนั้นหากได้ใช้กฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบพลวัต ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำจะทำให้มีความสอดคล้องและมีประสิทธิภาพในการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำเพิ่มมากขึ้นได้

โค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำจะประกอบด้วย เส้นกราฟสองเส้นคือ เส้นบน (Upper Rule Curve) และเส้นล่าง (Lower Rule Curve) โค้งทั้งสองเส้นนั้นเป็นขอบเขตบนและล่างของช่วงการควบคุมระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ โดยจะพยายามควบคุมระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำให้อยู่ในช่วงของขอบเขตบนและล่างมากที่สุด¹ ส่วนใหญ่โค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำจะเป็นโค้งรายเดือน

การศึกษาเริ่มแรกใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial and error) ร่วมกับการศึกษาเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำ (reservoir simulation) ในการกำหนดระดับของโค้งควบคุม^{2,3} ต่อมาเริ่มใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมสูงสุด (Optimization techniques) ร่วมกับการศึกษาเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำเข้าช่วยในการค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสม เช่น เทคนิคเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA)⁴ วิธีดิฟเฟอเรนเชียลเอฟวิลูชัน (Differential Evolution Algorithm, DE)⁵ กระบวนการอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization, ACO)⁶ และเทคนิคนกคูฮั่ว (Cuckoo Search Algorithms, CS)^{7,8} เพื่อค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามยังมีเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเทคนิคอื่นที่น่าสนใจอีกคือ วิธีเทคนิคการค้นหาแบบทาบู (Tabu Search Technique) ซึ่งเป็นเทคนิคทางเลือกอีกเทคนิคหนึ่ง สำหรับการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุด หลักการของวิธีเทคนิคการค้นหาแบบทาบู มีจุดเด่นตรงที่ไม่ได้อาศัยการสุ่มหรือเลือกจากความน่าจะเป็น แต่เป็นวิธีการค้นหาแบบดีเทอร์มินิสติก (Deterministic)

อ่างเก็บน้ำลำปาวอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำลำปาวซึ่งมีลำน้ำลำปาวไหลผ่าน โดยลำปาวเป็นลำน้ำสาขาของแม่น้ำชี มีต้นน้ำ

อยู่ลุ่มน้ำหนองหาน อำเภอกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี ไหลผ่านจังหวัดอุดรธานีไปยังจังหวัดกาฬสินธุ์ มีความยาวทั้งสิ้นประมาณ 262 กิโลเมตร มีลำห้วยสาขาที่สำคัญหลายสาย ได้แก่ ลำพันชาด ห้วยสังชะ ห้วยสังเคียบ และห้วยยาง ซึ่งไหลลงอ่างเก็บน้ำลำปาวด้านเหนือเขื่อน ส่วนห้วยแกงและลำน้ำดอกไม้ไหลลงลำปาวด้านท้ายเขื่อน โดยลำปาวมีพื้นที่รับน้ำ 5,960 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ชลประทานทั้งสิ้นประมาณ 314,000 ไร่ในฤดูฝน และประมาณ 180,000 ไร่ ในฤดูแล้งและได้มีการปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำในช่วงปี 2549-2553 โดยโครงการควบคุมระดับเก็บกักของอ่างเก็บน้ำลำปาวใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ HEC-3

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคการค้นหาแบบทาบู่ร่วมกับการศึกษาเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำเพื่อหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมแบบพลวัต โดยใช้พื้นที่ศึกษาคืออ่างเก็บน้ำลำปาว จังหวัดกาฬสินธุ์

อุปกรณ์และวิธีการศึกษา

แบบจำลองการเลียนแบบสภาพสมดุลงน้ำ

การศึกษาเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำในแต่ละลุ่มน้ำนิยมใช้แบบจำลอง HEC-3, HEC-5 และ HEC-RAS⁹ โดยใช้หลักการสมดุลงน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้ได้สร้างแบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำขึ้น โดยใช้หลักการเดียวกันกับแบบจำลองข้างต้น เพื่อให้สะดวกต่อการเชื่อมต่อกับเทคนิคการค้นหาแบบทาบู่และการพัฒนาในอนาคต ซึ่งแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้สามารถใช้หาได้ทั้งสถานการณ์ขาดแคลนน้ำ และสถานการณ์ที่เกิดน้ำไหลล้นได้ (ความถี่ ขนาด ช่วงเวลา)

ในการเริ่มต้นคำนวณการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำ จะกำหนดให้ปริมาณน้ำเก็บกักเริ่มต้นของอ่างที่ระดับเต็มอ่างหรือปริมาณเก็บกักสูงสุด (Full capacity) ส่วนปริมาณน้ำระบายจากอ่างเก็บน้ำในแต่ละเดือนจะหาได้ตามเกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน (Standard Operating Rule) ดังแสดงใน (Figure 1) และสมการที่ 1

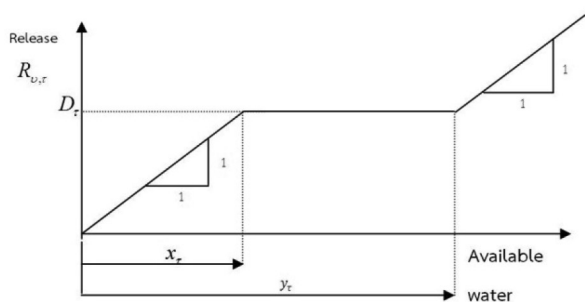


Figure 1 Standard operating rule

$$R_{u,t} = \begin{cases} D_t + W_{u,t} - y_t, & \text{for } W_{u,t} \geq y_t + D_t \\ D_t, & \text{for } x_t \leq W_{u,t} < y_t + D_t \\ D_t + W_{u,t} - x_t, & \text{for } x_t - D_t \leq W_{u,t} < x_t \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

เมื่อ $R_{u,t}$ คือปริมาณน้ำที่ระบายออกจากอ่างเก็บน้ำ (หน่วย ล้าน ลบ.ม.) ในช่วงปี n ของเดือน t (t = 1 ถึง 12 แทนเดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม) D_t เป็นความต้องการใช้น้ำท้ายอ่างของเดือน t (หน่วย ล้าน ลบ.ม.), x_t เป็นขอบเขตล่างของโค้งควบคุมของเดือน t, y_t เป็นขอบเขตบนของโค้งควบคุมของเดือน t และ $W_{u,t}$ เป็นปริมาณน้ำต้นทุนที่มีอยู่ของอ่างในเดือน t (หน่วย ล้าน ลบ.ม.) จากนั้นคำนวณหาน้ำต้นทุนที่มีอยู่ของอ่างเก็บน้ำในเดือนถัดไป โดยใช้หลักสมการสมดุลงน้ำต่อไปนี้

$$W_{u,t+1} = S_{u,t} + Q_{u,t} - R_{u,t} - E_t - DS \quad (2)$$

เมื่อ $S_{u,t}$ เป็นปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเมื่อสิ้นสุดเดือน t (หน่วย ล้าน ลบ.ม.), $Q_{u,t}$ เป็นปริมาณน้ำท่ารายเดือนที่ไหลเข้าอ่างในเดือน t ปี n (หน่วย ล้าน ลบ.ม.), E_t เป็นค่าการระเหยรายเดือนเฉลี่ยเดือน t (หน่วย ล้าน ลบ.ม.) และ DS (dead storage) เป็นปริมาตรเก็บกักที่ไม่ได้ใช้การ (หน่วย ล้าน ลบ.ม.) เมื่อทำการจำลองสภาพสมดุลงน้ำโดยใช้แบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำที่สร้างขึ้นจนครบจำนวนปีที่มีข้อมูลแล้ว ก็จะได้ผลการจำลองเป็นสถานการณ์ขาดแคลนน้ำ และสถานการณ์ที่เกิดน้ำส่วนเกิน (ความถี่ ขนาด ช่วงเวลา) จากนั้นก็ทำการบันทึกข้อมูลดังกล่าวไว้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมสูงสุดต่อไป

การประยุกต์วิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาแบบทาบู่กับแบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำ

การคำนวณค่าโค้งควบคุมจากแบบจำลองเทคนิคการค้นหาแบบทาบู่ โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการทำงาน จำนวนรอบของการทำงาน สร้างเริ่มต้น โดยการสร้างเซตของคำตอบ เริ่มต้น ซึ่งคือการเลือกค่าโค้งควบคุมแต่ละเดือนทั้ง 12 เดือน จำนวน 24 ค่า เป็นการสร้างค่าโค้งควบคุมเริ่มต้น หลังจากนั้นสร้างเซตของคำตอบใกล้เคียงที่เป็นไปได้ เลือกเซตคำตอบใกล้เคียงที่ดีที่สุด ตรวจสอบรายการต้องห้าม

(Tabu List) พิจารณาเกณฑ์ความปรารถนา (Aspiration Criteria) โดยกำหนดเป็นเงื่อนไขสำหรับพิจารณาเซตของคำตอบข้างเคียง และตรวจสอบรอบการทำงาน (Stopping Criteria) นำค่าโค้งควบคุมที่ได้มาดำเนินการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation Simulation) แล้วคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องปล่อยในแต่ละเดือนภายใต้โค้งควบคุมชุดนี้ เพื่อนำไปประเมินสถานการณ์น้ำขาดแคลนตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาคำตอบ การศึกษาครั้งนี้ใช้ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ความถี่ของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด และค่าปริมาณการขาดแคลนสูงสุดที่น้อยที่สุด เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาคำตอบกรณีใช้น้ำปกติและกรณีเพิ่มความต้องการใช้น้ำ ซึ่งแสดงดังสมการ (3) การทำงานของเทคนิคนี้จะ เป็นแบบวนซ้ำหากยังไม่ถึงเงื่อนไขที่ตั้งไว้จะทำงานต่อไปจนกระทั่งเมื่อครบรอบที่กำหนดและจะได้ค่าโค้งควบคุมที่เหมาะสม ดังแสดงใน (Figure 2)

$$Min(Aver_Sh) = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^n Sh_v \quad (3)$$

เมื่อ n เป็นความยาวของชุดข้อมูลปริมาณน้ำต้นทุน Sh_v ปริมาณน้ำที่ขาดในปี v (ปริมาณน้ำที่ปล่อยน้อยกว่าเป้าหมายความต้องการใช้น้ำ) กรณีความถี่ของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดจะเปลี่ยนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการค้นหาคำตอบเป็นความถี่ของการขาดแคลนดังสมการ

$$\frac{\text{จำนวนปีที่ขาดแคลน}}{\text{จำนวนปีของข้อมูลน้ำท่าทั้งหมด}} \quad (4)$$

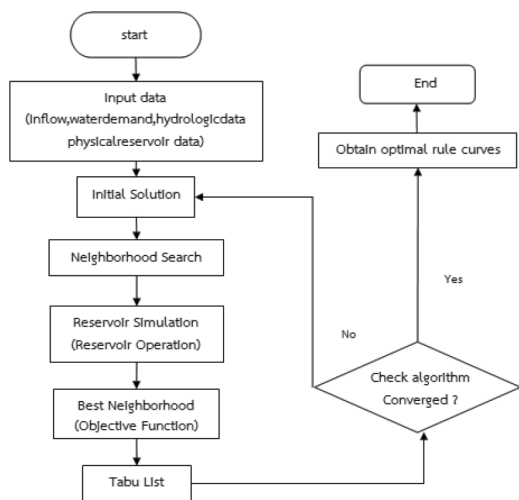


Figure 2 Application of Tabu search techniques to model simulates reservoir system.

การประยุกต์ใช้เทคนิคการค้นหาแบบทาบู

ในการศึกษานี้เลือกประยุกต์ใช้เทคนิคการค้นหาแบบทาบูกับอ่างเก็บน้ำลำปาว จังหวัดกาฬสินธุ์ เป็นลำน้ำสาขาสำคัญของแม่น้ำชีมีต้นน้ำอยู่ที่หนองหาน อำเภอกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานีแล้วไหลลงมารวมกับแม่น้ำชีที่ อำเภอกมลาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์ ดังแสดงใน (Figure 3) แผนที่ของระบบอ่างเก็บน้ำลำปาว แสดงดัง (Figure 4) ลักษณะก่อนปรับปรุงตัวเชื่อมความจุน้ำเก็บกักปกติ 1,430 ล้าน ลบ.ม. ระดับน้ำเก็บกักปกติ 162 ม.(ร.ท.ก.) ครอบคลุม พื้นที่ชลประทานทั้งสิ้น 502.4 ตารางกิโลเมตร ต่อมาเมื่อ ปี พ.ศ.2551 ได้มีการปรับปรุงเพิ่มความจุอ่างเก็บน้ำเป็น 1,981 ล้าน ลบ.ม.ระดับน้ำเก็บกักปกติ 164 ม.(ร.ท.ก.) ปริมาตรเก็บกักที่ไม่ได้ใช้การ (dead storage) 100 ล้าน ลบ.ม. อ่างเก็บน้ำลำปาว จะต้องปล่อยน้ำเพื่อกิจกรรมต่างๆ คือ อุปโภค-บริโภค อุตสาหกรรม รักษาสภาพแวดล้อมท้ายน้ำ และเพื่อการชลประทานของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาลำปาว สำหรับพื้นที่เพาะปลูก 306,963 ไร่ ซึ่งเป็นความต้องการใช้น้ำส่วนใหญ่ที่สุด จากนั้นจะไหลลงสู่แม่น้ำชี (Figure 5) แสดงปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำลำปาว ระหว่างปี พ.ศ. 2511-2557 ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองเทคนิคการค้นหาแบบทาบูจะดำเนินการโดย นำโค้งควบคุมของอ่างปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมใช้ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำในระยะยาวด้วยข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำด้วยข้อมูลที่สังเคราะห์ขึ้นมา 100 ชุดข้อมูล จากข้อมูลน้ำที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำจำนวน 47 ปี ตั้งแต่ พ.ศ.2511 – 2557 ครอบคลุมเหตุการณ์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นได้รวมถึงเหตุการณ์ในอดีตที่เคยเกิดขึ้นผ่านมา ทำการจำลองสภาพการโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำในระยะยาวด้วยดำเนินการจำลองปฏิบัติการการอ่างเก็บน้ำ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบจากกฎของการจัดการและควบคุม แล้วคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องปล่อยในแต่ละเดือนภายใต้โค้งของเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ ผลการประเมินจะแสดงรูปสถานการณ์น้ำขาดแคลนและน้ำไหลล้น (ความถี่ ขนาด และช่วงเวลา)

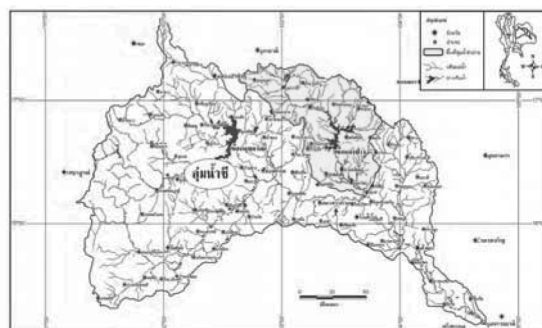


Figure 3 Lampao Reservoir Kalasin

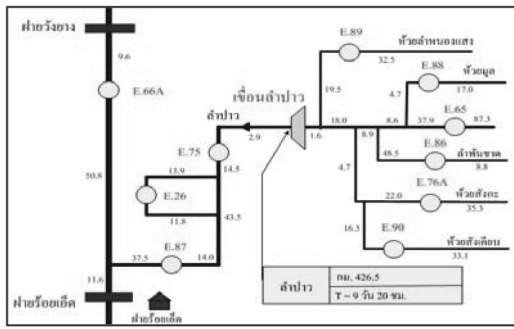


Figure 4 Diagram of Lamao Reservoir

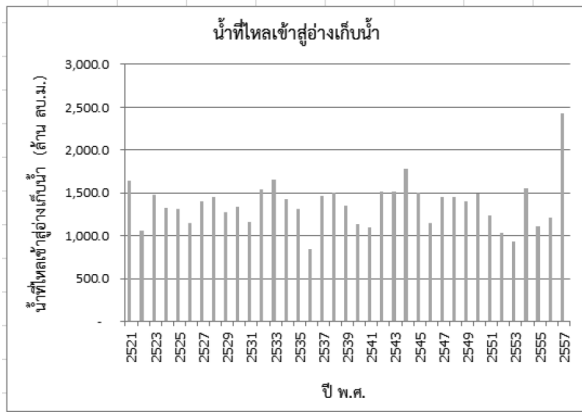


Figure 5 Inflow record from 1968 to 2014

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการสร้างโค้งควบคุมจากข้อมูลอดีต

ผลการสร้างโค้งควบคุมจากแบบจำลองการศึกษาเลียนแบบร่วมกับเทคนิคการค้นหาแบบทาบู เปรียบเทียบกับโค้งควบคุมด้วย โดยใช้ข้อมูลน้ำท่าที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำในอดีต 47 ปี (ระหว่างปี พ.ศ. 2511- 2557) ใช้ความต้องการน้ำรายเดือนซึ่งโค้งควบคุมที่ได้นี้จะใช้สำหรับกรณีที่สถานการณ์น้ำเป็นปกติทั่วไป ดังแสดงใน (Figure 6) จากรูปจะเห็นว่า โค้งควบคุมใหม่และเก่าทั้ง 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้มีลักษณะรูปร่างใกล้เคียงกัน ซึ่งได้รับอิทธิพลโดยตรงจากปริมาณน้ำท่ารายเดือนที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ โดยโค้งควบคุมใหม่ที่ได้มีรูปร่างคล้ายคลึงกับโค้งควบคุมเดิม อย่างไรก็ตามยังมีจุดที่แตกต่างกัน เช่น โค้งควบคุมใหม่เส้นล่างจะสูงกว่าโค้งควบคุมเดิมในช่วงฤดูแล้งคือตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนมิถุนายน เพื่อเก็บ

กักน้ำไว้ตอบสนองความต้องการใช้น้ำ ส่วนโค้งควบคุมใหม่เส้นโค้งบนมีรูปร่างใกล้เคียงกับเส้นโค้งเดิม โดยเฉพาะช่วงเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม เพื่อเก็บกักน้ำไว้ตอบสนองความต้องการใช้น้ำในเขตพื้นที่ชลประทานในฤดูแล้ง

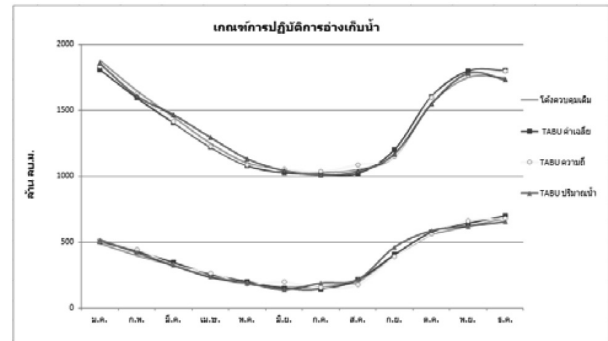


Figure 6 Reservoir rule curves Lampao reservoir original and characteristic curves Tabu three new objective function

ผลการประเมินประสิทธิภาพของโค้งควบคุมใหม่

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองวิธีการหา

ค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาแบบทาบู จะดำเนินการเปรียบเทียบกับโค้งควบคุมเก่า จะมีการประเมินประสิทธิภาพฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของความขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดเป็น 3 วัตถุประสงค์คือ 1.) ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด 2.) ความถี่ของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด 3.) ค่าปริมาณการขาดแคลนสูงสุดที่น้อยที่สุด ซึ่งประเมินโดยการจำลองสภาพสมดุลน้ำของอ่างเก็บน้ำลำปาว ใช้ข้อมูลย้อนหลังจากการบันทึก 47 ปี ตั้งแต่ปี 2511-2557 ประกอบไปด้วยปริมาณน้ำต้นทุนที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำปริมาณความต้องการน้ำรายเดือนแต่ละกิจกรรมการใช้น้ำปี อัตราการระเหยเฉลี่ยรายเดือน ข้อมูลโค้งความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูง-พื้นที่ผิวน้ำ-ปริมาตรความจุของอ่างเก็บน้ำลำปาว ข้อมูลปริมาตรต่ำสุด-สูงสุดของระดับน้ำเก็บกัก ในการประเมินสถานการณ์การขาดแคลนน้ำ และการไหลล้นเป็น พร้อมทั้งนำไปประเมินประสิทธิภาพของโค้งควบคุมที่ได้ในแต่ละกรณีโดยใช้ข้อมูลน้ำท่าสังเคราะห์ 47 ปี จำนวน 100 ชุด

Table 1 Assessment of reservoir performance curve control to assess the situation of water shortage by determining the average minimum water shortages. Frequency of water supply shortages and the lowest maximum minimum a reservoir of Lampao 47 years from 1968 to 2014

Situations (times/year)	curve	Fre-quency	Magnitude (MCM/year)		Duration (year)	
		Time/year	Average	Maximum	Average	Maximum
Water	Old	0.745	190.574	549.000	3.889	7.000
Shortage	Maximum	0.723	188.617	548.000	3.778	7.000
	Frequency	0.723	181.021	604.000	3.778	7.000
	maximum shortage	0.745	175.745	543.000	3.889	7.000
Overflow	Old	0.702	524.459	2,869.787	3.667	13.000
	Maximum	0.723	522.608	2,868.673	4.250	14.000
	Frequency	0.702	515.718	2,869.396	3.667	13.000
	maximum shortage	0.723	511.172	2,869.632	3.778	14.000

Table 2 Evaluate the performance curve control of the reservoir to assess the situation of water shortage by determining the average of the lowest frequency of water shortages, water scarcity and the minimal amount of shortage maximum minimal use of synthetic Lampao Reservoir. in the past 47 years from 1968 to 2014 100 series. Note : m= mean, s= standard deviation

Situations (times/year)	curve		Fre-quency	Magnitude (MCM/year)		Duration (year)	
			Time/year	Average	Maximum	Average	Maximum
Water	Old	μ	0.811	206.075	596.580	5.762	12.800
Shortage	Maximum	σ	0.726	541.156	2,539.602	4.032	9.970
		μ	0.758	195.890	616.900	4.505	11.260
	Frequency	σ	0.722	527.732	2,532.607	4.066	10.070
		μ	0.797	193.151	609.610	5.334	12.900
	maximum shortage	σ	0.710	526.521	2,546.917	3.839	9.520
		μ	0.811	199.261	602.920	5.667	13.290
Overflow	Old	σ	0.724	532.236	2,534.583	4.033	9.980
		μ	0.046	22.690	140.814	1.822	5.164
	Maximum	σ	0.058	68.737	583.904	1.126	3.465
		μ	0.044	13.433	135.454	1.119	3.958
	Frequency	σ	0.050	15.022	543.164	1.092	3.965
		μ	0.043	13.507	143.845	1.460	4.437
	maximum shortage	σ	0.049	15.075	547.885	0.894	3.392
		μ	0.038	14.201	145.069	1.453	4.404
		σ	0.053	15.687	541.001	1.047	3.808

Table 1 จะเห็นได้ว่าสถานการณ์การขาดแคลนน้ำ พบว่าแบบจำลองวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาค้นหาแบบทาบ ปริมาณน้ำที่มีค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ 188.617 ล้าน ลบ.ม. สถานการณ์การไหลล้น พบว่า การไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 522.608 ล้าน ลบ.ม. ส่วนโค้งควมคุมเติมของอ่างเก็บน้ำลำปาว พบว่า

ปริมาณน้ำที่ขาดแคลนเฉลี่ยเท่ากับ 190.574 ล้าน ลบ.ม. และ สถานการณ์การไหลล้น การไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 524.459 ล้าน ลบ.ม. จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำที่มีค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาค้นหาแบบทาบมีค่าน้อยกว่า โค้งควมคุมเติมของอ่างเก็บน้ำลำปาวตามวัตถุประสงค์ของ

การศึกษาวิจัยของการขาดแคลนน้ำที่ต่างเท่ากับ 0.019 ความถี่ของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ 0.723 ครั้ง/ปี สถานการณ์การไหลล้น พบว่า ความถี่ของการไหลล้นเท่ากับ 0.702 ครั้ง/ปี ส่วนโค้งควมคุมเดิมของอ่างเก็บน้ำลำปาว พบว่า ความถี่ของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด 0.745 ครั้ง/ปี และ สถานการณ์ความถี่ของการไหลล้น เท่ากับ 0.723 ครั้ง/ปี จะเห็นได้ว่าความถี่ของการเกิดสถานการณ์ ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาแบบทาบามีค่าน้อยกว่า โค้งควมคุมเดิมของอ่างเก็บน้ำลำปาวตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาร้อยละของการขาดแคลนน้ำที่ต่างเท่ากับ 0.0002 ค่าปริมาณการขาดแคลนสูงสุดที่น้อยที่สุดเท่ากับ 543.000 ล้าน ลบ.ม. สถานการณ์การไหลล้น พบว่า การไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 2,869.632 ล้าน ลบ.ม. ส่วนโค้งควมคุมเดิมของอ่างเก็บน้ำลำปาวพบว่าค่าปริมาณการขาดแคลนสูงสุดที่น้อยที่สุด เท่ากับ 549.000 ล้าน ลบ.ม. และการไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 2,870.243 ล้าน ลบ.ม. จะเห็นได้ว่าค่ามากที่สุดของปริมาณน้ำของสถานการณ์การขาดแคลนน้ำ ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิคการค้นหาแบบทาบามีค่าน้อยกว่าโค้งควมคุมเดิมตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาร้อยละของการขาดแคลนน้ำที่ต่างเท่ากับ 0.006

(Table 2) จะเห็นได้ว่าสถานการณ์การขาดแคลนน้ำพบว่าแบบจำลองวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาแบบทาบามีปริมาณน้ำที่มีค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ 195.890 ล้าน ลบ.ม. สถานการณ์การไหลล้น พบว่า การไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 13.433 ล้าน ลบ.ม. และสถานการณ์การขาดแคลนน้ำ พบว่าโค้งควมคุมเดิมของอ่างเก็บน้ำลำปาว ปริมาณน้ำที่มีค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ 206.075 ล้าน ลบ.ม. และ สถานการณ์การไหลล้น การไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 22.690 ล้าน ลบ.ม. จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำที่มีค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาแบบทาบามีค่าน้อยกว่าโค้งควมคุมเดิมของอ่างเก็บน้ำลำปาวตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาร้อยละของการขาดแคลนน้ำที่ต่างเท่ากับ 0.101 ความถี่ของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ 0.797 ครั้ง/ปี สถานการณ์การไหลล้น พบว่า ความถี่ของการไหลล้น เท่ากับ 0.043 ครั้ง/ปี และสถานการณ์การขาดแคลนน้ำ พบว่าโค้ง

ควมคุมเดิมของอ่างเก็บน้ำลำปาว ความถี่ของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ 0.811 ครั้ง/ปี และสถานการณ์ความถี่ของการไหลล้น เท่ากับ 0.046 ครั้ง/ปี จะเห็นได้ว่าความถี่ของการเกิดสถานการณ์ ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาแบบทาบามีค่าน้อยกว่าโค้งควมคุมเดิมของอ่างเก็บน้ำลำปาวตามวัตถุประสงค์ของโค้งของการศึกษาร้อยละของการขาดแคลนน้ำที่ต่างเท่ากับ 0.0001 ค่าปริมาณการขาดแคลนสูงสุดที่น้อยที่สุดเท่ากับ 602.920 ล้าน ลบ.ม. สถานการณ์การไหลล้น พบว่า การไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 145.069 ล้าน ลบ.ม. และค่ามากที่สุดของปริมาณน้ำพบว่าโค้งควมคุมเดิมของอ่างเก็บน้ำลำปาว ค่าปริมาณการขาดแคลนสูงสุดที่น้อยที่สุดเท่ากับ 596.580 ล้าน ลบ.ม. และ สถานการณ์การไหลล้น การไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 140.814 ล้าน ลบ.ม. จะเห็นได้ว่าค่ามากที่สุดของปริมาณน้ำของสถานการณ์การขาดแคลนน้ำ ด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาแบบทาบามีค่ามากกว่าโค้งควมคุมเดิมของอ่างเก็บน้ำลำปาวไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาร้อยละของการขาดแคลนน้ำที่ต่างเท่ากับ 0.063

ผลการประเมินประสิทธิภาพของโค้งควมคุมใหม่ กรณีการเปลี่ยนแปลงความต้องการน้ำ

จากการทดสอบในหัวข้อ ผลการประเมินประสิทธิภาพของโค้งควมคุมใหม่นั้นพบว่าโค้งควมคุมที่ได้จากการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์การหาค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดสามารถบรรเทาน้ำขาดแคลนและน้ำไหลล้นได้ดีกว่าโค้งที่เกิดจากค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดและค่าปริมาณการขาดแคลนสูงสุดที่น้อยที่สุด ดังนั้นจึงนำโค้งควมคุมที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดมาทดสอบเพิ่มเติมอีก โดยการเพิ่มการใช้น้ำชลประทาน 20% และเพิ่มปริมาณฝนใช้การ 20% และใช้ ข้อมูล 47 ปี ตั้งแต่พ.ศ.2511-พ.ศ.2557 ประกอบด้วย การไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำที่สังเคราะห์ในอดีตจำนวน 47 ปี 100 ชุด ข้อมูล ปริมาณความต้องการน้ำรายเดือนแต่ละกิจกรรมการใช้น้ำปี อัตราการระเหย เฉลี่ยรายเดือน ข้อมูลโค้งควมคุมสัมพันธระหว่างระดับความสูง-พื้นที่ผิวน้ำ-ปริมาตรความจุของอ่างเก็บน้ำลำปาว ข้อมูลปริมาตรต่ำสุด-สูงสุดของระดับน้ำเก็บกัก

Table 3 Evaluate the performance curve control of the water reservoir, the irrigation rose 20% to assess the situation of water shortage by determining the average minimum water shortages. A reservoir of LamPao synthesized in the past 47 years from 1968 to 2014 100

Situations (times/year)	curve	Fre-quency Time/year	Magnitude (MCM/year)		Duration (year)		
			Average	Maximum	Average	Maximum	
Water Shortage	Old	μ	0.981	350.954	903.990	43.180	43.180
		σ	0.622	413.114	2287.885	2.949	7.190
Overflow	New	μ	0.873	338.161	930.370	8.697	17.800
		σ	0.604	396.147	2279.821	2.814	6.800
	Old	μ	0.009	30.144	172.440	0.386	0.386
		σ	0.059	62.997	564.096	0.610	2.107
New	μ	0.037	17.097	148.711	4.502	6.326	
	σ	0.052	18.098	523.853	0.551	2.089	

Note : m= mean, s= standard deviation

Table 4 Evaluate the performance curve of reservoir control for the rain increased 20% to assess the situation of water shortage by determining the average minimum water shortages. A reservoir of LamPao synthesized in the past 47 years from 1968 to 2014 100 series.

Situations (times/year)	curve	Fre-quency Time/year	Magnitude (MCM/year)		Duration (year)		
			Average	Maximum	Average	Maximum	
Water Shortage	Old	μ	0.805	200.081	583.370	5.587	12.620
		σ	0.730	547.938	2,552.495	4.057	10.110
Overflow	New	μ	0.752	189.281	603.020	4.376	11.010
		σ	0.727	533.858	2542.523	4.127	10.210
	Old	μ	0.047	22.149	139.454	1.801	5.185
		σ	0.057	68.965	584.847	1.068	3.567
New	μ	0.043	12.976	134.586	1.056	3.912	
	σ	0.051	14.774	544.997	1.181	4.120	

Note : m= mean, s= standard deviation

(Table 3) จะเห็นได้ว่าสถานการณ์การขาดแคลนน้ำจากแบบจำลองวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาค่าแบบทาบู่ได้ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ 338.161 ล้าน ลบ.ม. สถานการณ์การไหลล้น พบว่าการไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 17.097 ล้าน ลบ.ม. และสถานการณ์การขาดแคลนน้ำของของว่าโค้งควบคุมเดิมของอ่างเก็บน้ำลำปาว ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด 350.954 ล้าน ลบ.ม. และสถานการณ์การไหลล้น การไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 30.144 ล้าน ลบ.ม. จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำที่ขาดแคลนเฉลี่ยของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

ด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาค่าแบบทาบู่มีค่าน้อยกว่าโค้งควบคุมเดิมของอ่างเก็บ

น้ำลำปาวตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาร้อยละของการขาดแคลนน้ำที่ต่างเท่ากับ 0.127

(Table 4) จะเห็นได้ว่าสถานการณ์การขาดแคลนน้ำจากแบบจำลองวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาค่าแบบทาบู่ได้ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด 189.281 ล้าน ลบ.ม. สถานการณ์การไหลล้น พบว่าการไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 12.976 ล้าน ลบ.ม. และสถานการณ์การขาดแคลนน้ำของโค้งควบคุมเดิมของอ่างเก็บ

น้ำลำปาว ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด 200.081 ล้าน ลบ.ม. และสถานการณ์การไหลล้น การไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 22.149 ล้าน ลบ.ม. จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำที่ขาดแคลนเฉลี่ยของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่

สุดท้ายวิธีเทคนิคการค้นหาค่าแบบทาบามีค่าน้อยกว่า โค้งควบคุมเดิมของอ่างเก็บน้ำลำปาวตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาร้อยละของการขาดแคลนน้ำที่ต่างเท่ากับ 0.108

สรุปผลการวิจัย

การประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาค่าแบบทาบ เพื่อปรับปรุงโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 กรณี คือ 1) ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด 2) ความถี่ของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด 3) ค่าปริมาณการขาดแคลนสูงสุดที่น้อยที่สุด โดยการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ พบว่าทั้ง 3 กรณีได้โค้งควบคุมที่มีรูปร่างใกล้เคียงกันและผลการประเมินสถานการณ์การขาดแคลนยังได้ผลที่ดีกว่าโค้งควบคุมเดิม อย่างไรก็ตามยังมีจุดที่แตกต่างกัน เช่น โค้งควบคุมใหม่เส้นล่างจะสูงกว่าโค้งควบคุมเดิมในช่วงฤดูแล้งคือตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนมิถุนายน เพื่อเก็บกักน้ำไว้ตอบสนองความต้องการใช้น้ำ ส่วนโค้งควบคุมใหม่เส้นโค้งบนมีรูปร่างใกล้เคียงกับเส้นโค้งเดิม โดยเฉพาะช่วงเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม เพื่อเก็บกักน้ำไว้ตอบสนองความต้องการใช้น้ำในเขตพื้นที่ชลประทานในฤดูแล้ง ถัดไปเมื่อนำโค้งทั้ง 3 กรณีไปทดสอบและเปรียบเทียบกับโค้งควบคุมเดิมที่ใช้อยู่พบว่าโค้งใหม่ที่หาโดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในกระบวนการค้นหา สามารถบรรเทาสภาวะน้ำท่วมและน้ำขาดแคลนได้ดีกว่าโค้งที่เกิดจากการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์อื่นและยังดีกว่าโค้งควบคุมเดิมด้วย หลังจากนั้นนำโค้งควบคุมที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดมาทดสอบและเปรียบเทียบกับโค้งควบคุมเดิมเพิ่มเติมอีก โดยการเพิ่มการใช้น้ำชลประทาน 20% และเพิ่มปริมาณฝนใช้การ 20% ใช้ข้อมูลการไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำที่สังเคราะห์ในอดีตจำนวน 47 ปี 100 ชุดข้อมูล พบว่ายังดีกว่าโค้งควบคุมเดิมอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ กรมชลประทาน ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลต่างๆ ในการใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ขอขอบคุณอาจารย์สุภารัตน์ คำปลิว สำหรับการจัดเตรียมข้อมูลสังเคราะห์

บรรณานุกรม

1. Kumar D. and Baliarsingh F. Folded dynamic programming for optimal operation of multireservoir system. *Water Resour Manage*, 17, 337-353, 2003.
2. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (EGAT), 2545. "คู่มือปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเขื่อนอุบลรัตน์"
3. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. (EGAT), 2547. "คู่มือปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำภูมิพลและสิริกิติ์"
4. Chang J.F., Chen L. & Chang C.L. (2005). Optimizing reservoir operating rule curves by genetic algorithms. *Hydrological Processes*, 19, 2277-2289.
5. Hormwichian R. & Kangrang A. (2012) Coupled-operations model and a conditional differential evolution algorithm for improving reservoir management. *International Journal of Physical Sciences*, 7(42), 5701-5710.
6. Kangrang A. & Lokham C. (2013). Optimal reservoir rule curves considering conditional ant colony optimization with simulation model. *American Journal of Applied Sciences*, 13(1), 154-160
7. กิตติพงษ์ จรรย์ศิริไพศาล. (2555). การเพิ่มความถูกต้องของตัวแบบซัพพอร์ตเวกเตอร์ แมทซึนแบบค่ากำลังสองน้อยที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีการค้นหาแบบนกดูเหว่า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
8. Yang, X.S. & Deb, S. (2009). Cuckoo search via Levy flights. In Deb, S., Abraham, A., & Herrera, F. (Eds.). *World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing*, 9-11 December 2009, pp. 210 - 214, Coimbatore, India.
9. Leticia B. Rodriguez. (2008). Fully conservative coupling of HEC-RAS with MODFLOW to simulate stream-aquifer interactions in a drainage basin. *Journal of Hydrology*, 353, 129-142.
10. Kangrang A. & Chaleeraktragoon C. (2007). Genetic algorithms connected simulation with smoothing function for searching rule curves. *American Journal of Applied Sciences*, 4(2), 73-79