

โค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมโดยใช้วิธีฮาร์โมนีเซิร์ช: กรณีศึกษาอ่างเก็บน้ำห้วยน้ำใส

Optimal Operation Rule Curve for Reservoir Using Harmony Search Algorithm:

A Case study of Huay Nam Sai Reservoir

ปกรณ์ ณ สิริ (Pakorn Na siri)* ดร.ปกรณ์ ดิษฐกิจ (Dr.Pakorn Ditthakit)**

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค้นหาโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำโดยใช้วิธีฮาร์โมนีเซิร์ชร่วมกับแบบจำลองการเลียนแบบ โดยพิจารณาปริมาณการขาดแคลนน้ำ น้อยที่สุดร่วมกับปริมาณน้ำล้นอ่างน้อยที่สุด เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในกระบวนการค้นหาคำตอบ ประกอบด้วย 24 ตัวแปรตัดสินใจสำหรับโค้งเกณฑ์การควบคุมบน (12 ตัวแปร) และล่าง (12 ตัวแปร) ตามช่วงเวลาที่พิจารณาเป็นรายเดือน ผลการศึกษาพบว่าโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ ที่ได้จากวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีฮาร์โมนีเซิร์ชร่วมกับแบบจำลองการเลียนแบบ มีประสิทธิภาพที่ดีเนื่องจากไม่มีเหตุการณ์น้ำขาดแคลนและน้ำไหลล้นอ่างเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ทดสอบจำนวน 216 เดือน เมื่อเทียบกับโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเดิมซึ่งมีน้ำขาดแคลนจำนวน 11 ครั้ง คิดเป็นปริมาณน้ำที่ขาดเท่ากับ 18.05 ล้านลูกบาศก์เมตร และน้ำไหลล้นอ่างจำนวน 2 ครั้ง คิดเป็นปริมาณน้ำที่ไหลล้นอ่าง 243.68 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยโค้งควบคุมเส้นล่างใหม่ มีรูปร่างแตกต่างจากโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำเดิมเล็กน้อย คือในช่วงฤดูแล้งตั้งแต่เดือนเมษายนถึงปลายเดือนพฤษภาคม จะสูงกว่าโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำเดิมเล็กน้อยเพื่อเก็บกักน้ำไว้ตอบสนองความต้องการใช้น้ำ ส่วนโค้งควบคุมเส้นบนใหม่ ในช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนตุลาคม จะสูงกว่าโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำเดิม เพื่อกักเก็บน้ำไว้ตอบสนองความต้องการใช้น้ำ

ABSTRACT

This article presents application of optimization technique based on Harmony Search Algorithm (HSA) and reservoir simulation model for searching reservoir rule curve. The objective function was developed to minimize shortage and spill volume and 24 decision variables were upper (12 variables) and lower (12 variables) rule curves considering monthly period of time. The study results were found that reservoir rule curve obtained using HSA and reservoir simulation model gave a good performance due to no event of shortage and reservoir spill for testing period of time 216 months. When compared to the old reservoir rule curve with the same conditions, it gave 11 times with 18.05 MCM for shortage event and 2 time with 243.68 MCM for reservoir spill event. The new obtained lower rule curve was slightly different from the old one, that is, during dry season from April to May the new one gave a bit higher value than the old one to storage water for use. The new obtained upper rule curve during April to October was higher than the old one due to water storage during dry season.

คำสำคัญ: โค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ วิธีฮาร์โมนีเซิร์ชอ่างเก็บน้ำห้วยน้ำใส

Keywords: Operation rule curve for reservoir, Harmony search algorithm Huay Namsai reservoir

*นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม สำนักวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม สำนักวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

บทนำ

ปัจจุบันปริมาณทรัพยากรน้ำมีอยู่อย่างจำกัด และความต้องการใช้น้ำเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปีในขณะที่ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำมีความไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำท่าในแต่ละปี ทำให้เกิดปัญหาในการบริหารจัดการน้ำของอ่างเก็บน้ำแต่ละแห่ง ในบางปีมีน้ำหลากเกิดขึ้นถ้าไม่มีการควบคุมระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำให้เหมาะสมจะทำให้มีการระบายน้ำลงสู่ท้ายน้ำเป็นปริมาณมาก ก่อให้เกิดความเสียหายกับพื้นที่ท้ายน้ำในปีที่มีปริมาณน้ำน้อย ถ้าไม่มีการบริหารจัดการน้ำที่ดีจะทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนน้ำใช้ในพื้นที่ตอนล่าง จากกรณีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น ทำให้ต้องศึกษาการกำหนดระดับน้ำควบคุมที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำแต่ละแห่ง เพื่อเป็นแนวทางในการบริหารจัดการน้ำให้มีประสิทธิภาพ

โค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) หรือบางครั้งเรียกว่าโค้งแนวปฏิบัติ (Guide Curves) ซึ่งจะได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางอุทกวิทยาในอดีต (historical data) ซึ่งมีเงื่อนไขต่าง ๆ กันร่วมกับความต้องการน้ำ ซึ่งประกอบด้วยโค้งควบคุมเส้นบน (Upper Rule Curve) และโค้งควบคุมเส้นล่าง (Lower Rule Curve) (สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา และสถาบันพัฒนาการชลประทาน, 2556) สำหรับโค้งควบคุมเส้นบนนั้นเป็นระดับสูงสุดของช่วงการจัดการอ่างเก็บน้ำเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดตลอดช่วงเวลาต่าง ๆ ในรอบปีเมื่อระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำนี้จะระบายออกจากอ่างเก็บน้ำ เพื่อลดปริมาณการกักเก็บน้ำของอ่างเก็บน้ำ ให้ต่ำกว่าหรืออยู่ระดับนี้ ส่วนโค้งควบคุมเส้นล่าง เป็นระดับล่างของช่วงอ่างเก็บน้ำตลอดช่วงเวลาต่าง ๆ ในรอบปี หากระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำลดลงต่ำกว่าระดับนี้ จะเกิดการขาดแคลนน้ำควรลดปริมาณการปล่อยน้ำออกจากอ่าง ซึ่ง Rule curve ของอ่างเก็บน้ำแต่ละแห่งจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามสภาพอุทกวิทยาและวัตถุประสงค์ของการใช้ประโยชน์ของอ่างเก็บน้ำ

ที่ผ่านมา มีวิธีการที่ใช้ในการศึกษาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินการจัดการในงานวิศวกรรมด้านต่าง ๆ รวมทั้งในด้านวิศวกรรมการจัดสรรน้ำด้วย ในปัจจุบันมีการพัฒนาโปรแกรมขึ้นมามากมาย เพื่อช่วยในการแก้ปัญหาด้านทรัพยากรน้ำโดยการลดข้อจำกัดต่าง ๆ ทางด้านตัวแปร อีกทั้งยังช่วยในการหาค่าความเหมาะสม (Optimization) เทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในการหาโค้งควบคุมที่เหมาะสม (Optimal Rule Curve) คือ วิธีการเลียนแบบ (Simulation, SM) โปรแกรมเชิงพลวัต (Dynamic Programming, DP) เทคนิค เจนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) เทคนิคในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมโดยเลียนแบบพฤติกรรมของสัตว์ เช่น เทคนิคนกคูหา Cuckoo Search Algorithm (CS) (วิทวัส, 2557) เป็นต้น สำหรับปัญหาเชิงวิศวกรรมที่มีความซับซ้อน และมีขนาดใหญ่ วิธีการหาคำตอบที่เหมาะสม ได้มีการประยุกต์แนวคิดของเมตาฮิวริสติก (Meta-Heuristics) ซึ่งเป็นการหาคำตอบโดยการเลียนแบบพฤติกรรมตามธรรมชาติของสัตว์ หรือลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิต ซึ่งประสบความสำเร็จอย่างมากและมีความรวดเร็วในการประมวลผล โดยแนวคิดเมตา-ฮิวริสติกที่มีความนิยมแพร่หลายประกอบด้วย วิธีภูเขาลูกเตาแอนนิลลิ่ง (Simulated Annealing, SA) วิธีทาบูลู (Taboo Search, TS) วิธีนิวรอลเน็ตเวิร์ค (Neural Network, NN) วิธีทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) และวิธีฝูงมด (Ant Colony Optimization, ACO) วิธีหาค่าเหมาะสมแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) และวิธีฮาร์โมนีซีร์ช (Harmony Search Algorithm, HS) (อนันต์ศักดิ์, พงศ์ชนัน, 2553)

วิธีฮาร์โมนีซีร์ช (Harmony Search Algorithm, HS) เป็นวิธีการเลือกอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยใช้หลักการของการแก้ปัญหาของนักดนตรี เพื่อค้นหาสภาพที่เหมาะสมที่สุดของการประสานเสียงเครื่องดนตรี (Perfect State of Harmony) โดยตัดสินใจจากมาตรฐาน หรือระดับของความสวยงามของคุณภาพเสียงที่เกิดขึ้น (Aesthesis Standard) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าสมการวัตถุประสงค์ (Objective Function), (Geem et. al., 2005) ในการประยุกต์ใช้วิธีฮาร์โมนีซีร์ชในการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดเชิงวิศวกรรม (Engineering Variable) ก็คือการหาค่าของสมการวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมที่สุดนั่นเอง

อย่างไรก็ตามในประเทศไทยยังไม่มีการนำวิธีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีฮาร์โมนีเซิร์ช สำหรับประยุกต์ใช้เพื่อหาโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) ที่เหมาะสมสำหรับการจัดการอ่างเก็บน้ำห้วยน้ำใส อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดนครราชสีมา โดยในประเทศไทยในอดีตได้มีการใช้เทคนิคต่างๆ ในการหาโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ เช่น การปรับ Rule Curve ของเขื่อนภูมิพลและ เขื่อนสิริกิติ์ สำหรับความต้องการใช้น้ำที่เปลี่ยนไปในลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาให้เกิด ความขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด โดยใช้วิธี Dynamic Programming (โสภณ, 2544), การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมที่สุดของอ่างเก็บน้ำมูลบนและลำแชะ โดยใช้แบบจำลองโอกาส-ข้อจำกัดร่วมกับกฎการตัดสินใจเชิงเส้น (ณรงค์, 2545) การศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมระดับน้ำของอ่างเก็บน้ำลำปาวโดยใช้วิธี Dynamic Programming (ทิพาภรณ์, 2546) เป็นต้น

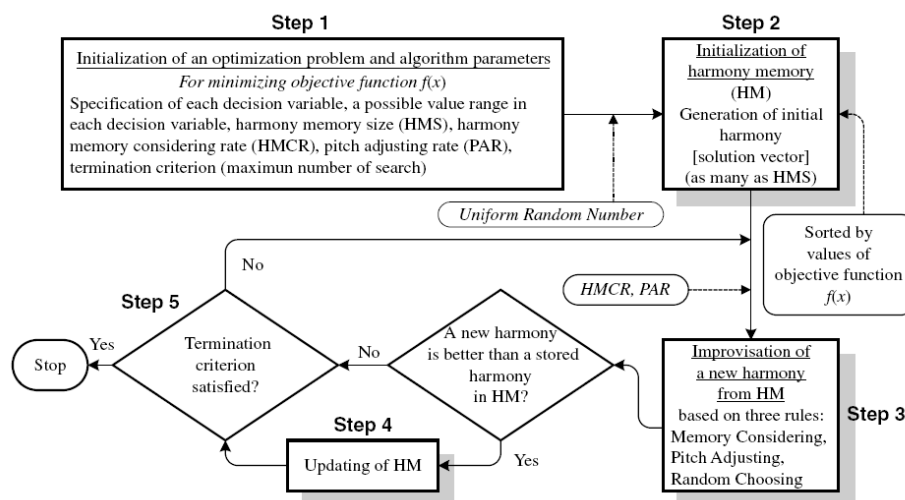
วัตถุประสงค์การวิจัย

1. พัฒนาแบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับค้นหาโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) โดยใช้วิธีฮาร์โมนีเซิร์ช (Harmony Search Algorithm, HS)
2. ประเมินประสิทธิภาพของโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) ของอ่างเก็บน้ำที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

วิธีการวิจัย

1. วิธีฮาร์โมนีเซิร์ช (Harmony Search Algorithm, HS)

Harmony search เป็นวิธีการหาค่าเหมาะสมประเภทเมตาฮิวริสติก ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาโดย ศ.ดร. Zong Woo Geem ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 โดยได้รับแนวคิดมาจากการการประพันธ์บทเพลงของนักดนตรีในการหาตัวโน้ตที่เหมาะสมสำหรับเครื่องดนตรีแต่ละชนิด เพื่อให้มีเสียงเกิดประสานของเครื่องดนตรีแต่ละชนิดที่วงดนตรีออกมาไพเราะที่สุด โดยที่ระดับเสียงของแต่ละเครื่องดนตรีจะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของเสียงดนตรี ทั้งนี้อาจเปรียบ ตัวโน้ตที่เหมาะสมสำหรับเครื่องดนตรีแต่ละชนิด คือ ตัวแปรตัดสินใจในปัญหาการหาค่าเหมาะสม และ คุณภาพของเสียงดนตรี คือ สมการวัตถุประสงค์ โดยการหาค่าตอบที่เหมาะสมของวิธี Harmony Search มี 5 ขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 1 ดังนี้



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการแก้ปัญหาของ HS meta-heuristic algorithm ที่มา: Lee and Geem (2005)

1.1 การกำหนดปัญหาและพารามิเตอร์ต่างๆของ Harmony Search ได้แก่ การกำหนดสมการวัตถุประสงค์ ตัวแปรตัดสินใจ ขอบเขตของตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไปได้ ขนาดของหน่วยความจำของ Harmony (harmony memory size, HMS) อัตราการพิจารณาหน่วยความจำของ Harmony (Harmony Memory Considering Rate, HMCR) อัตราการปรับระดับเสียง (Pitch Adjustments Rate, PAR) และเกณฑ์ที่ใช้สำหรับหยุดการทำงาน

1.2 การกำหนดค่าในหน่วยความจำเริ่มต้น โดยใช้วิธีการสุ่มเลือกเพื่อให้ได้เวกเตอร์ของคำตอบที่เป็นไปได้เบื้องต้น

1.3 การสร้างเวกเตอร์ของคำตอบที่เป็นไปได้ชุดใหม่ โดยใช้หลักการ 3 ประการที่กล่าวมาในข้างต้นได้แก่

1.3.1 เลือกค่าของตัวแปรตัดสินใจจากหน่วยความจำของ Harmony Search ที่เรียกว่า memory considerations ด้วยความน่าจะเป็น $P(E_1) = HMCR * (1 - PAR)$

1.3.2 เลือกค่าของตัวแปรตัดสินใจที่อยู่ติดกันหรือใกล้เคียงกันกับค่าในหน่วยความจำของ Harmony Search เรียกวิธีการนี้ว่า การปรับระดับเสียง (pitch adjustments) ด้วยความน่าจะเป็น $P(E_2) = HMCR * PAR$

1.3.3 สุ่มเลือกค่าของตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไปได้จากช่วงคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด เรียกวิธีการนี้ว่า การเลือกแบบสุ่ม (randomization) ด้วยความน่าจะเป็น $P(E_3) = 1 - HMCR$

1.4 ขั้นตอนการปรับค่าเวกเตอร์ของคำตอบที่เป็นไปได้แต่ละเวกเตอร์ในหน่วยความจำของ Harmony โดยถ้าเวกเตอร์ชุดใหม่ของคำตอบที่เป็นไปได้มีค่าดีกว่าเวกเตอร์ของคำตอบที่เป็นไปได้ชุดเก่า เวกเตอร์ของคำตอบที่เป็นไปได้ชุดเก่าก็จะถูกเอาออกจากหน่วยความจำของ Harmony โดยการแทนที่ด้วยเวกเตอร์ของคำตอบที่เป็นไปได้ชุดใหม่

1.5 ขั้นตอนการทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 และ 4 จนกว่าจะเป็นที่น่าพอใจ โดยจะพิจารณาว่าอยู่ในเกณฑ์เป็นที่น่าพอใจหรือไม่ ถ้าไม่อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจก็จะทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 และ 4 จนกว่าจะอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจตามที่กำหนดเกณฑ์ที่ใช้สำหรับหยุดการทำงานไว้ในขั้นตอนที่ 1

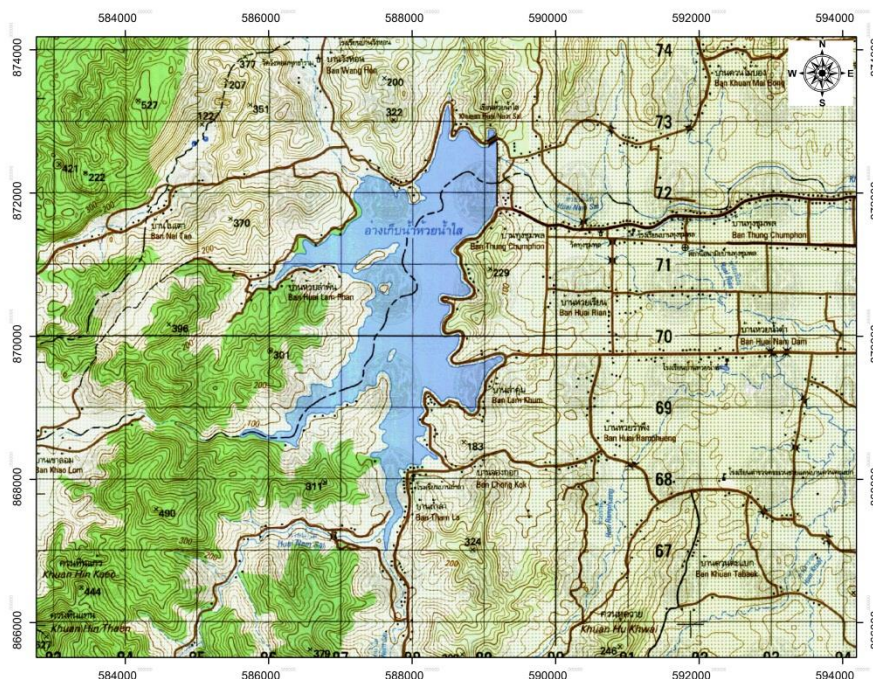
2. พื้นที่ศึกษา

ในการศึกษาเลือกอ่างเก็บน้ำห้วยน้ำใสอันเนื่องมาจากพระราชดำริ อำเภอชะอวด จังหวัดนครศรีธรรมราช พิกัด 47NNJ 891-722 ระวาง 4924I ดังแสดงในภาพที่ 2 อยู่ในความรับผิดชอบของโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาปากพนังบนสำนักงานชลประทานที่ 15 กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เป็นอ่างเก็บน้ำขนาดกลาง ความจุที่ระดับเก็บกัก 80 ล้านลูกบาศก์เมตร ส่งน้ำให้แก่พื้นที่ชลประทาน 4 พื้นที่ ประกอบด้วย 1. ระบบส่งน้ำนิคมควนขนุน 2. ระบบส่งน้ำช่วยเหลือราษฎรบ้านควนมิชยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ 3. ระบบส่งน้ำฝายคลองไม้เสียบ 4. ระบบส่งน้ำฝายคลองไม้เสียบ ส่วนขยาย รวมพื้นที่ชลประทาน 85,802 ไร่

3. การพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ บนโปรแกรมสเปรดชีต (spreadsheet)

การจำลองระบบ (Simulation) คือ การจำลองแนวคิดของระบบซึ่งยังรักษาคุณลักษณะที่สำคัญของระบบเพื่อวัตถุประสงค์นั้น ดังนั้นการจำลองระบบเป็นการแสดงคุณลักษณะของระบบ โดยใช้ข้อจำกัดและกระบวนการเป็นตัวแทนของระบบ โดยข้อมูล (Input) บางส่วนของระบบและผลลัพธ์ (Output) ขณะนั้นจะต้องทราบค่าเพื่อใช้ในการสอบเทียบระบบต่อไป ในการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation Simulation) บนโปรแกรมสเปรดชีต (spreadsheet) เป็นการจำลองสภาพปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำ ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่างๆ โดยใช้หลักสมดุลของน้ำในอ่างเก็บ

น้ำ (Water Balance) และเกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน (Standard Operating Policy) เพื่อใช้ในการพิจารณาวางแผนเก็บกักน้ำ และปล่อยน้ำ จากอ่างเก็บน้ำเพื่อกิจกรรมต่าง ๆ เพื่อให้การบริหารจัดการน้ำเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ไม่ให้เกิดการขาดแคลน น้ำและน้ำไหลล้นอ่าง หรือเกิดให้น้อยที่สุด โดยใช้โปรแกรม สเปรดชีต (spreadsheet) ที่มีอยู่ใน Microsoft Office Excel ดำเนินการจำลองระบบ ซึ่งสะดวกต่อการใช้งานเนื่องจากสามารถทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows ได้ทุกเวอร์ชัน



ภาพที่ 2 ตำแหน่งที่ตั้งอ่างเก็บน้ำห้วยน้ำใสอันเนื่องมาจากพระราชดำริ

4. การพัฒนาแบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) โดยใช้วิธีฮาร์โมนี เซิร์ช (Harmony Search Algorithm, HS)

ในการพัฒนาแบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) โดยใช้วิธีฮาร์โมนี เซิร์ช (Harmony Search Algorithm, HS) กรณีศึกษาอ่างเก็บน้ำห้วยน้ำใส ผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรมหาโค้งของกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมด้วย Visual Basic for Application (VBA) in Microsoft Excel ทั้งนี้ในการทำการประมวลผลนั้นจะทำการประมวลผลทั้งที่แสดงใน Microsoft Excel ร่วมกับการทำงานเบื้องหลัง โดยเขียนโปรแกรมด้วยภาษา VBA เพื่อจัดการกับวิธีฮาร์โมนี เซิร์ช ทั้งสองส่วนนี้จะทำการรับและส่งค่าในระหว่างการประมวลผล การพัฒนาแบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำนั้นประกอบด้วย 3 องค์ประกอบที่สำคัญคือ ตัวแปรตัดสินใจ สมการวัตถุประสงค์ และสมการข้อจำกัด

5. การประเมินประสิทธิภาพของโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) ของอ่างเก็บน้ำที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

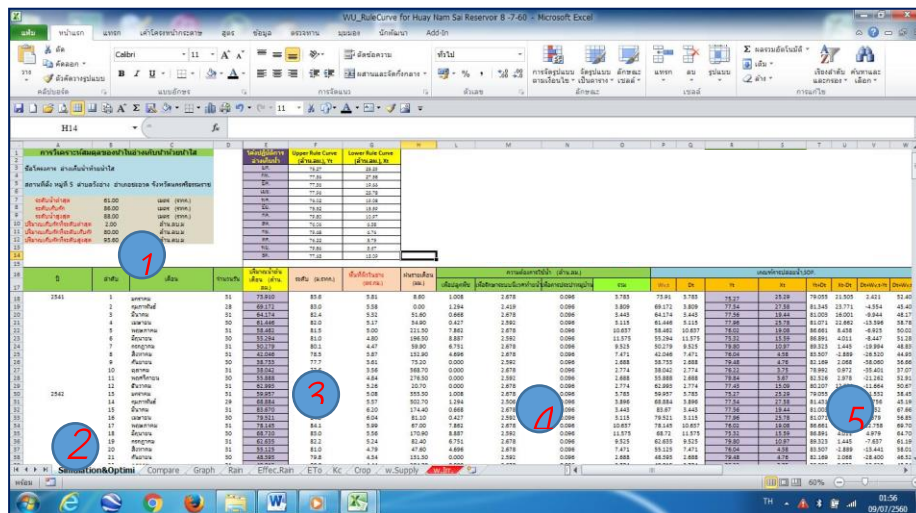
ในการการประเมินประสิทธิภาพของโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) ของอ่างเก็บน้ำที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น พิจารณาได้จากสมการวัตถุประสงค์ (Objective Function)

ผลการวิจัย

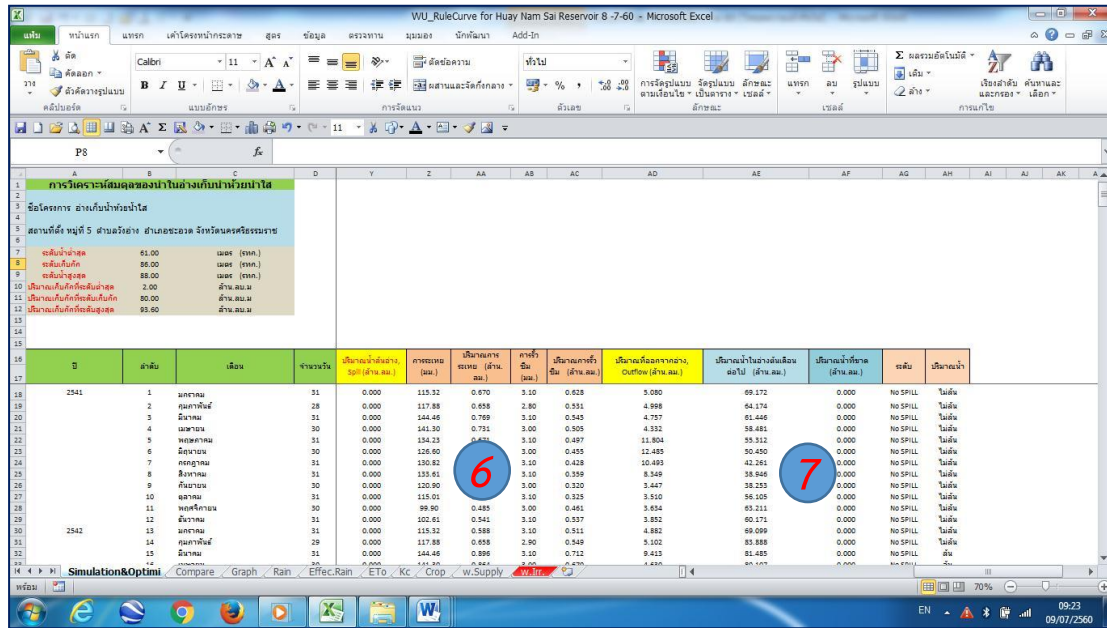
ผลการศึกษาการหาโค้งการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมโดยใช้วิธีฮาร์โมนิเชิร์ช กรณีสืบหาอ่างเก็บน้ำห้วยน้ำใส ประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

1. การพัฒนาแบบจำลองการดำเนินการอ่างเก็บน้ำ บนโปรแกรมสเปรดชีต (spreadsheet)

ในการการพัฒนาแบบจำลองการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation Simulation) บนโปรแกรมสเปรดชีต (spreadsheet) โดยใช้หลักสมดุลของน้ำในอ่างเก็บน้ำ (Water Balance) และเกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน (Standard Operating Policy) เพื่อใช้ในการพิจารณาวางแผนการเก็บกักน้ำและปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำ เพื่อให้การบริหารจัดการน้ำเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ไม่ให้เกิดการขาดแคลนน้ำและน้ำไหลล้นอ่าง หรือเกิดให้น้อยที่สุด โดยใช้โปรแกรมสเปรดชีต (spreadsheet) ที่มีอยู่ใน Microsoft Office Excel แล้วดำเนินการป้อนข้อมูลของอ่างเก็บน้ำห้วยน้ำใสและค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในชุด Simulation & Optimi โดยมีผลการพัฒนาแบบจำลอง ดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4



ภาพที่ 3 หน้าจอหลักที่ใช้ในการป้อนข้อมูลเพื่อจำลองระบบ



ภาพที่ 4 หน้าจอหลักที่ใช้ในการป้อนข้อมูลเพื่อจำลองระบบ (ต่อ)

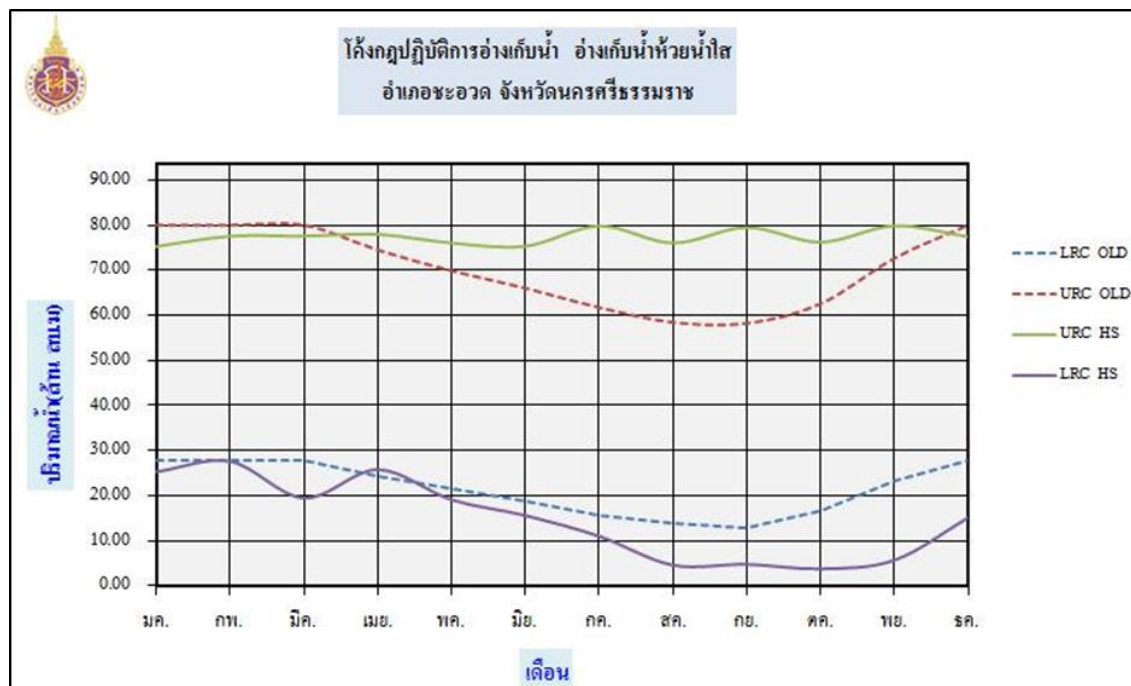
เมื่อดำเนินการป้อนข้อมูลที่จำเป็นในส่วนที่ 1 ถึงส่วนที่ 7 จากนั้นดำเนินการประมวลผลด้วยโปรแกรมสเปรดชีต (spreadsheet) ที่มีอยู่ใน Microsoft Office Excel จะได้ข้อมูลโค้งของกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำบน (Upper Rule Curve) และล่าง (Lower Rule Curve) ทั้งในส่วนที่ได้รับจากการประมวลผลด้วยโปรแกรม (ด้านซ้าย) และโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเดิม (ด้านขวา) ดังแสดงในภาพที่ 5

โค้งปฏิบัติการ อ่างเก็บน้ำ	Upper Rule Curve (ล้าน.ลบม.), Yt	Lower Rule Curve (ล้าน.ลบม.), Xt
ม.ค.	75.61	5.55
ก.พ.	78.68	8.38
มี.ค.	77.27	12.37
เม.ย.	78.75	2.06
พ.ค.	77.42	9.01
มี.ย.	78.22	18.80
ก.ค.	75.84	13.55
ส.ค.	76.85	14.05
ก.ย.	76.77	3.64
ต.ค.	75.99	8.25
พ.ย.	77.23	5.61
ธ.ค.	77.23	23.82

โค้งปฏิบัติการ อ่างเก็บน้ำเดิม	Upper Rule Curve (ล้าน.ลบม.), Yt	Lower Rule Curve (ล้าน.ลบม.), Xt
ม.ค.	80.00	27.78
ก.พ.	80.00	27.78
มี.ค.	80.00	27.78
เม.ย.	74.48	24.33
พ.ค.	69.87	21.59
มี.ย.	66.02	18.66
ก.ค.	61.72	15.70
ส.ค.	58.44	13.71
ก.ย.	58.21	12.88
ต.ค.	62.54	16.60
พ.ย.	72.65	23.30
ธ.ค.	80.00	27.78

ภาพที่ 5 ข้อมูลโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำบนและล่าง

ข้อมูลโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำจากตารางในภาพที่ 5 เมื่อนำไปพล็อตกราฟจะได้ดังแสดงได้ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ข้อมูลเปรียบเทียบ ผลการจำลองโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ บน โปรแกรมสเปรดชีต (spreadsheet)

กับโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเดิม

2. ผลการพัฒนาแบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) โดยใช้วิธีฮาร์โมนีเซิร์ช (Harmony Search Algorithm, HS)

ผลการพัฒนาแบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) โดยใช้วิธีฮาร์โมนีเซิร์ช (Harmony Search Algorithm, HS) กรณีศึกษาอ่างเก็บน้ำห้วยน้ำใส ผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรมหาโค้งของกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมด้วย Visual Basic for Application (VBA) in Microsoft Excel ทั้งนี้ในการทำการประมวลผลนั้นจะทำการประมวลผลทั้งที่แสดงใน Microsoft Excel ร่วมกับการทำงานเบื้องหลัง โดยเขียนโปรแกรมด้วยภาษา VBA เพื่อจัดการกับวิธีฮาร์โมนีเซิร์ช ทั้งสองส่วนนี้จะทำการรับและส่งค่าในระหว่างการประมวลผล การพัฒนาแบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำนั้นประกอบด้วย 3 องค์ประกอบที่สำคัญคือ 1. ตัวแปรตัดสินใจ 2. สมการวัตถุประสงค์ และ 3. สมการข้อจำกัด โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ตัวแปรตัดสินใจ (decision variables)

ในการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับโค้งของกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ ตัวแปรตัดสินใจมีทั้งหมด 24 ตัวแปร คือ เส้นโค้งของกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำบน ($URC_i = 1, 2, \dots, 12$) จำนวน 12 ตัวแปร และเส้นโค้งของกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำล่าง ($LRC_i = 1, 2, \dots, 12$) จำนวน 12 ตัวแปร ทั้งนี้เป็นไปตามจำนวนเดือนในรอบ 1 ปี

2.2 สมการวัตถุประสงค์ (objective function)

สมการวัตถุประสงค์สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับโคงของการปฏิบัติการ อ่างเก็บน้ำ คือ

$$\text{Min } Z = \text{Num}_{\text{shortage}} \times \sum_{i=1}^{12} Q_{\text{shortage}} + \text{Num}_{\text{spill}} \times \sum_{i=1}^{12} Q_{\text{spill}} \quad (1)$$

เมื่อ

$\text{Num}_{\text{shortage}}$ = จำนวนครั้ง (เดือน) ที่มีปล่อยน้ำไม่เพียงพอกับความต้องการน้ำทำอ่าง

$\sum_{i=1}^{12} Q_{\text{shortage}}$ = ผลรวมของปริมาณน้ำที่ขาด (ล้าน ลบ.ม.) ทั้งหมด คำนวณได้

$$\text{จาก } \text{if Supply} > \text{Demand then } Q_{\text{shortage}} = 0 \quad (2)$$

$$\text{if Supply} < \text{Demand then } Q_{\text{shortage}} = |\text{Supply} - \text{Demand}| \quad (3)$$

$\text{Num}_{\text{spill}}$ = จำนวนครั้ง (เดือน) ที่มีน้ำไหลล้นอ่าง

$\sum_{i=1}^{12} Q_{\text{spill}}$ = ผลรวมของปริมาณน้ำที่ไหลล้นทางระบายน้ำล้น (ล้าน ลบ.ม.) ทั้งหมด

2.3 สมการข้อจำกัด (constraints)

ประกอบด้วย สมการสมดุลน้ำในอ่าง และเงื่อนไขข้อจำกัดโคงของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ ดังนี้

ก. สมดุลน้ำในอ่าง:

$$\sum I - \sum O = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (4)$$

เมื่อ $\sum I$ = ผลรวมของปริมาณน้ำไหลเข้าอ่าง

$\sum O$ = ผลรวมปริมาณน้ำไหลออกจากอ่าง

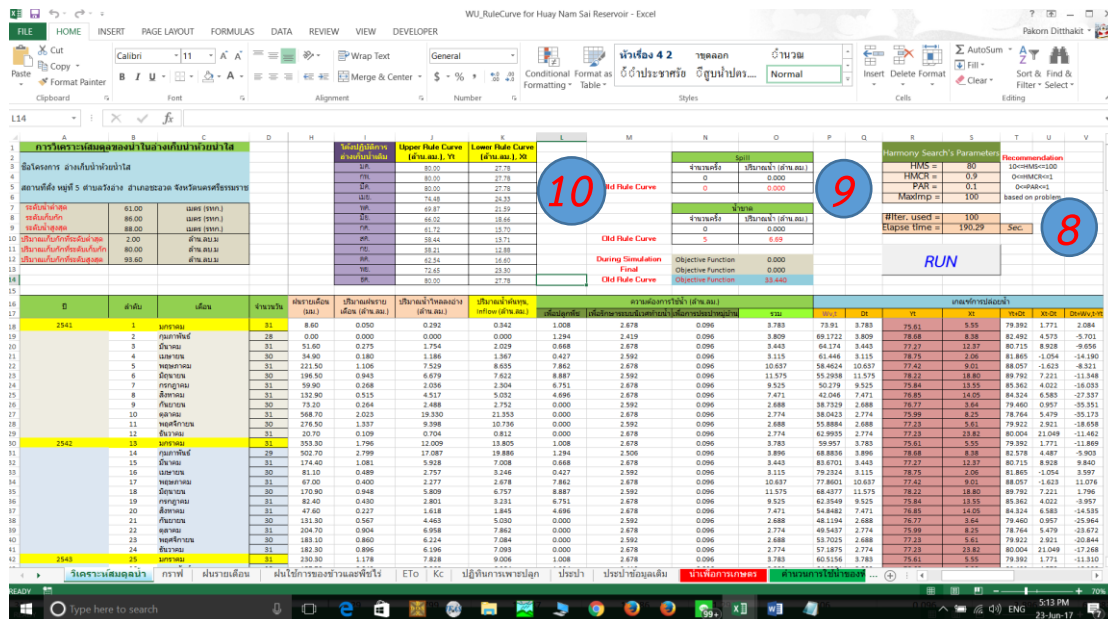
$\frac{\Delta S}{\Delta t}$ = การเปลี่ยนแปลงปริมาณของน้ำในอ่างในช่วงระยะเวลา 1 เดือน

ข. โคงของการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ:

$$\text{URC}_{i=1,2,\dots,12} > \text{LRC}_{i=1,2,\dots,12} \quad (5)$$

หน้าจอหลักที่ใช้ในการประมวลผลซึ่งอยู่ใน sheet ชื่อ “Simulation & Optimi.” ดังแสดงในภาพที่ 7 โดยมีส่วนที่เพิ่มขึ้นจากการพัฒนาแบบจำลองในข้อ 1 ได้แก่ ส่วนที่ 8 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของฮาร์โมนิเชิร์ชและรัน

แบบจำลอง ส่วนที่ 9 แสดงการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง ส่วนที่ 10 โค้งของกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ได้รับจากการประมวลผลด้วยวิธีฮาร์โมนีเซิร์ช



ภาพที่ 7 การพัฒนาแบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับค้นหาโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve)

โดยใช้วิธีฮาร์โมนีเซิร์ช (Harmony Search Algorithm)

โดยส่วนที่ 8 สามารถขยายภาพให้เห็นชัดเจนขึ้นดังภาพที่ 8 ซึ่งเป็นการกำหนดพารามิเตอร์ของฮาร์โมนีเซิร์ชและรันแบบจำลอง ในส่วนนี้ต้องตั้งค่าพารามิเตอร์ของฮาร์โมนีเซิร์ช ได้แก่ HMS, HMCR, PAR และ MaxImp ดังภาพที่ 9 เมื่อกดปุ่ม RUN โปรแกรมก็จะทำการประมวลผล

Harmony Search's Parameters		Recommendation	
HMS =	80	10<=HMS<=100	
HMCR =	0.9	0<=HMCR<=1	
PAR =	0.1	0<=PAR<=1	
MaxImp =	100	based on problem	
#Iter. used =	100		
Elapse time =	190.29	Sec.	
RUN			

ภาพที่ 8 การกำหนดพารามิเตอร์ของฮาร์โมนีเซิร์ชและรันแบบจำลอง

ส่วนที่ 10 แสดงโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ได้รับจากการประมวลผลด้วยโปรแกรม ในส่วนนี้จะแสดงข้อมูลโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำบนและล่าง ทั้งในส่วนที่ได้รับจากการประมวลผล ด้วยโปรแกรม (ด้านซ้าย) และโค้งของกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเดิม (ด้านขวา) ดังแสดงในภาพที่ 10

โค้งปฏิบัติการ อ่างเก็บน้ำ	Upper Rule Curve (ล้าน.ลบม.), Yt	Lower Rule Curve (ล้าน.ลบม.), Xt	โค้งปฏิบัติการ อ่างเก็บน้ำเดิม	Upper Rule Curve (ล้าน.ลบม.), Yt	Lower Rule Curve (ล้าน.ลบม.), Xt
มค.	75.61	5.55	มค.	80.00	27.78
กพ.	78.68	8.38	กพ.	80.00	27.78
มีค.	77.27	12.37	มีค.	80.00	27.78
เมย.	78.75	20.6	เมย.	74.48	24.33
พค.	77.42	9.01	พค.	69.87	21.59
มิย.	78.22	18.80	มิย.	66.02	18.66
กค.	75.84	13.55	กค.	61.72	15.70
สค.	76.85	14.05	สค.	58.44	13.71
กย.	76.77	3.64	กย.	58.21	12.88
ตค.	75.99	8.25	ตค.	62.54	16.60
พย.	77.23	5.61	พย.	72.65	23.30
ธค.	77.23	23.82	ธค.	80.00	27.78

ภาพที่ 9 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบ ผลการคำนวณ โค้งของกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเดิม

กับที่ปรับปรุงโดยใช้วิธีฮาร์โมนิเซิร์ซ

3. ผลการประเมินประสิทธิภาพของโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) ของอ่างเก็บน้ำที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

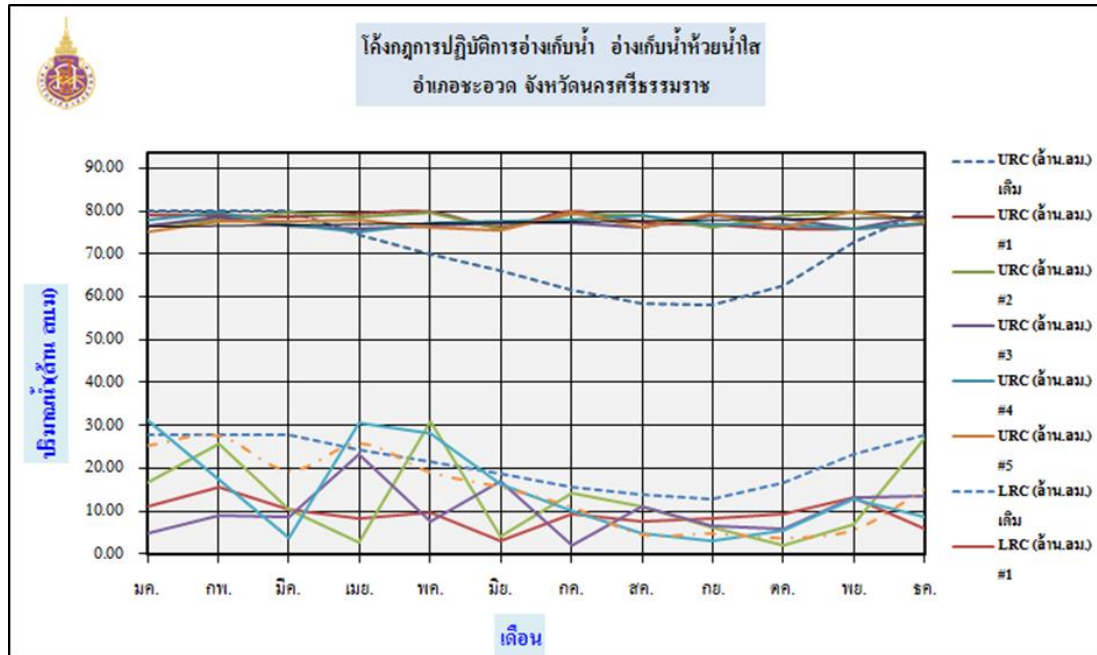
ผลการประเมินประสิทธิภาพของโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) ที่พัฒนาขึ้นกับอ่างเก็บน้ำห้วยน้ำใส ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของฮาร์โมนิเซิร์ซ ได้แก่ HMS, HMCR, PAR และ MaxImp เท่ากับ 80 0.9 0.1 และ 100 ตามลำดับ ทำการประมวลผลโดยใช้คอมพิวเตอร์ Notebook Intel(R) Core(TM) i5-4200U CPU @ 1.60GHz 2.29 GHz RAM 4.00 GB 64-bit Operation System ระบบปฏิบัติการ Windows 10 Home Single Language พบว่าให้ค่าคำตอบโค้งของกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำบนและล่าง ได้หลายคำตอบ โดยที่ให้ค่าสมการวัตถุประสงค์เท่ากับศูนย์ทุกกรณี ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 และภาพที่ 10

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบโศงกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเส้บนและล่าง ที่ได้จากแบบจำลองจากการรัน 5 ครั้ง และ โศง
กฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเส้บนและล่างเดิม

เดือน	URC (ล้าน.ลม.)						LRC (ล้าน.ลม.)					
	เดิม	#1	#2	#3	#4	#5	เดิม	#1	#2	#3	#4	#5
ม.ค.	80.00	79.14	76.51	76.51	77.98	75.27	27.78	10.98	16.76	4.90	31.41	25.29
ก.พ.	80.00	79.03	77.77	78.44	79.79	77.54	27.78	15.74	25.71	9.12	17.39	27.58
มี.ค.	80.00	78.66	79.53	76.49	76.75	77.56	27.78	10.41	10.33	8.46	3.90	19.44
เม.ย.	74.48	79.45	78.65	75.90	75.30	77.96	24.33	8.30	2.79	23.30	30.50	25.78
พ.ค.	69.87	79.82	79.64	76.67	77.21	76.02	21.59	9.66	30.79	7.46	28.15	19.08
มิ.ย.	66.02	76.33	75.76	77.09	77.48	75.32	18.66	3.11	4.25	16.92	16.33	15.59
ก.ค.	61.72	79.94	79.15	77.39	77.89	79.80	15.70	9.21	14.22	2.09	10.01	10.97
ส.ค.	58.44	77.35	78.80	76.03	78.96	76.04	13.71	7.51	11.20	10.92	4.66	4.58
ก.ย.	58.21	76.85	76.07	78.96	76.86	79.48	12.88	8.45	6.36	6.47	3.10	4.76
ต.ค.	62.54	75.87	78.88	78.35	76.95	76.22	16.60	9.25	2.11	5.83	5.56	3.75
พ.ย.	72.65	75.91	79.72	75.69	75.84	79.84	23.30	13.02	6.89	13.17	12.79	5.67
ธ.ค.	80.00	76.99	78.00	78.81	77.08	77.43	27.78	5.75	27.09	13.67	8.60	15.09

ตารางที่ 2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของโศงกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) ของอ่างเก็บน้ำที่ได้
จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

ครั้ง ที่	Objective Function	เวลาที่ใช้ในการ ประมวลผล (วินาที)	น้ำล้น		น้ำขาด	
			จำนวน ครั้ง	ปริมาณน้ำ (ล้าน.ลม.)	จำนวน ครั้ง	ปริมาณน้ำ (ล้าน.ลม.)
เดิม	33.44	-	0	0.00	5	6.69
#1	0.00	86.20	0	0.00	0	0.00
#2	0.00	80.52	0	0.00	0	0.00
#3	0.00	87.78	0	0.00	0	0.00
#4	0.00	89.40	0	0.00	0	0.00
#5	0.00	87.57	0	0.00	0	0.00



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบโค้งของกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำบนและล่างที่ได้จากแบบจำลองจากการรัน 5 ครั้ง และโค้งของกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำบนและล่างเดิม

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้มีความมุ่งหมายเพื่อประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมโดยใช้วิธีฮาร์โมนีเซิร์ช กรณีศึกษาอ่างเก็บน้ำห้วยน้ำใส (Optimal Operation Rule Curve for Reservoir using Harmony Search Algorithm: A Case study of Huay Nam Sai Reservoir) ร่วมกับแบบจำลองการเดินแบบเพื่อปรับปรุงโค้งกฎการปฏิบัติการ อ่างเก็บน้ำ โดยใช้ปริมาณการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดรวมกับปริมาณน้ำล้นอ่างน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในกระบวนการค้นหาคำตอบ ในการวิจัยจะพิจารณาข้อมูลโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรายเดือนเดิมของอ่างเก็บน้ำห้วยน้ำใส จังหวัดนครราชสีมา เป็นกรณีศึกษา ข้อมูลปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายเดือนที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ ข้อมูลปริมาณฝนที่ตกภายในเดือน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541-พ.ศ. 2558 ข้อมูลความต้องการใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำ ข้อมูลอุทกวิทยา และข้อมูลทางกายภาพของอ่างเก็บน้ำ เพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพของโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำ ซึ่งจะแสดงผลเป็นสถานการณ์น้ำขาดแคลนและน้ำไหลล้นอ่าง ในรูปแบบของจำนวนครั้งและปริมาณน้ำของเหตุการณ์

ผลการศึกษาพบว่าโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่ได้จากวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีฮาร์โมนีเซิร์ช (Harmony Search Algorithm, HS) ร่วมกับแบบจำลองการเดินแบบ สรุปได้ดังนี้

1. โค้งควบคุมเส้นล่าง (Lower Rule Curve) ใหม่ มีรูปร่างแตกต่างจากโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำเดิมเล็กน้อย คือ ในช่วงฤดูแล้งตั้งแต่เดือนเมษายนถึงปลายเดือนพฤษภาคม จะสูงกว่าโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำเดิมเล็กน้อยเพื่อเก็บกักน้ำไว้ตอบสนองความต้องการใช้น้ำ ส่วนโค้งควบคุมเส้นบน (Upper Rule Curve) ใหม่ ในช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนตุลาคม จะสูงกว่าโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำเดิม เพื่อกักเก็บน้ำไว้ตอบสนองความต้องการใช้น้ำเช่นเดียวกัน ในทาง

ปฏิบัติควรต้องคำนึงถึงปัจจัยประเด็นอื่นร่วมด้วย อาจจำเป็นต้องพร่องน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำเพื่อลดความเสี่ยงโอกาสที่จะเกิดปัญหาน้ำท่วมในฤดูฝน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศที่อยู่เหนือการคาดคะเน

2. ผลการประเมินประสิทธิภาพของโ้่งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) ใหม่ที่ได้ พบว่าสถานการณ์น้ำขาดแคลนและน้ำไหลล้นมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือไม่มีการขาดแคลนน้ำและไม่มีน้ำล้นอ่าง โดยสรุปวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีฮาร์โมนีเซิร์ช (Harmony Search Algorithm, HS) ร่วมกับแบบจำลองการเลียนแบบ สามารถประยุกต์ใช้ค้นหาโ้่งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และโ้่งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำใหม่ที่ได้ สามารถบรรเทาสถานการณ์น้ำขาดแคลน และน้ำไหลล้นอ่างได้เป็นอย่างดี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาปากพนังบน หน่วยงานสังกัดกรมชลประทาน ที่ให้การสนับสนุนข้อมูล และการช่วยเหลือด้านต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

วิทวัส พาโคทม. เกณฑ์การจัดสรรน้ำที่เหมาะสมด้วยเทคนิคคนกดูเหว่า [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร

มหาบัณฑิต]. มหาสารคาม: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2557.

ณรงค์ จันทรเพ็ง. การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมที่สุดของอ่างเก็บน้ำมูลบนและลำแซะ [วิทยานิพนธ์ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครปฐม: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2545.

ทิพาภรณ์ หอมดี. การศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการควบคุมระดับน้ำของอ่างเก็บน้ำลำปาว [วิทยานิพนธ์ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. ขอนแก่น: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2546.

สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยา และสถาบันพัฒนาการชลประทาน. คู่มือการปฏิบัติงานด้านบริหารจัดการน้ำ.

กรุงเทพ; 2556.

โสภณ พงศ์สุธนะ. การปรับ Rule Curve ของเขื่อนภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์สำหรับความต้องการ น้ำที่เปลี่ยนไปในลุ่มน้ำ

เจ้าพระยา ให้เกิดความขาดแคลนน้อยที่สุด [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. ขอนแก่น:

บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2544.

อนันต์ศักดิ์ แสงจันทร์ และ พงศ์ชนัน เหลืองไพฑูรย์. การศึกษาเปรียบเทียบการแก้ไขปัญหาด้วยวิธีฮาร์โมนีเซิร์ช ที่มี

การเปลี่ยนแปลงระดับพารามิเตอร์ แบบดัดวิซสำหรับปัญหาชนิดไม่มีเงื่อนไขข้อจำกัดทางทรัพยากร. การ

ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8; วันที่ 22-23 เมษายน; สงขลา; 2553.

Z.W. Geem, K.S. Lee and Y. Park. Application of Harmony Search to Vehicle Routing. Korea University; 2005.