



ระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่าย

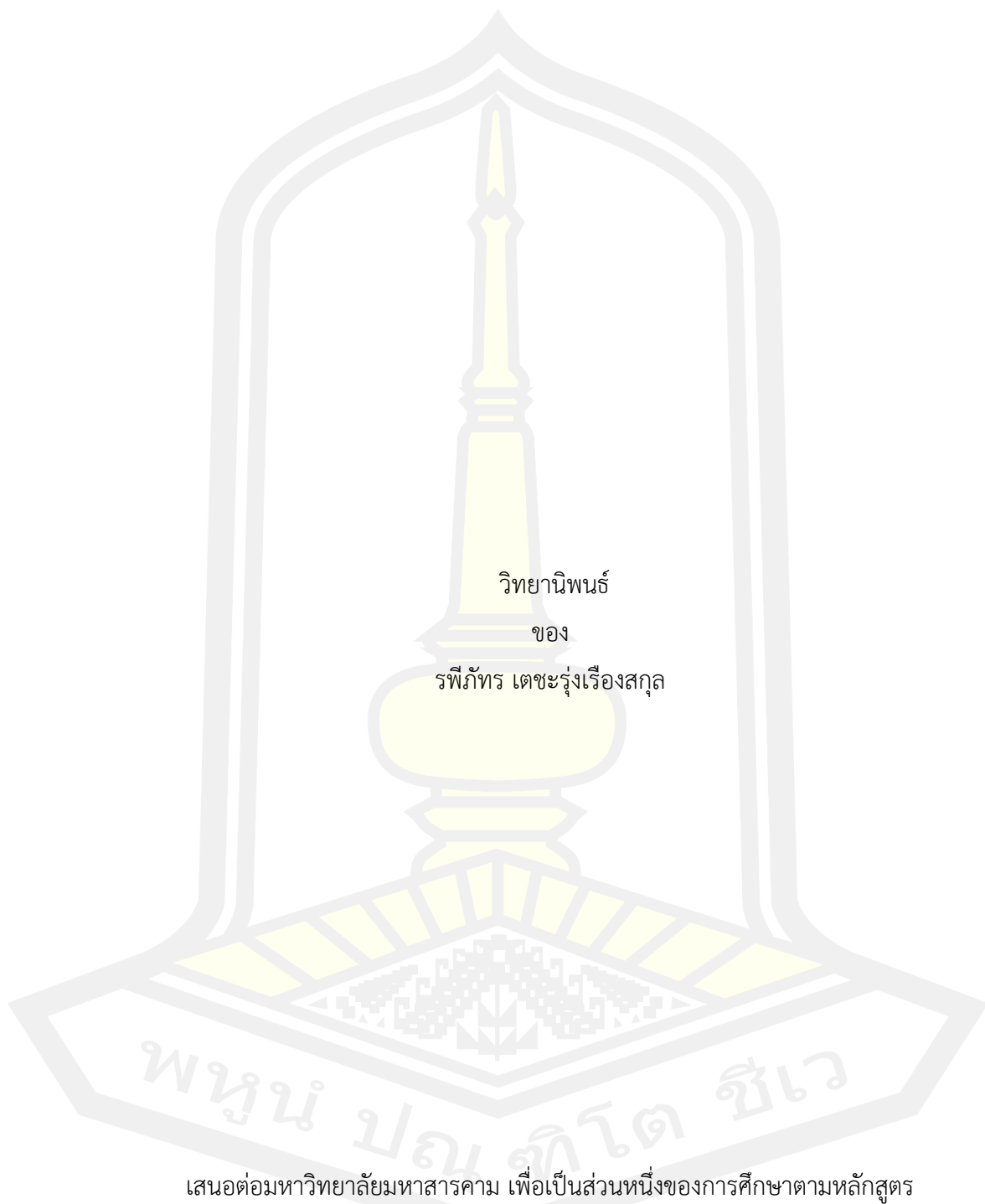
วิทยานิพนธ์
ของ
รพีภัทร เตชะรุ่งเรืองสกุล

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สิงหาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่าย



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สิงหาคม 2565

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Decision Supporting System for Network Reservoir Operation



Rapeepat Techarungruengsakul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Doctor of Philosophy (Civil Engineering)

August 2022

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายรพีภัทร เตชะรุ่งเรือง
สกุล แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. หริส ประสารฉ่ำ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)

..... กรรมการ

(ผศ. ดร. ศิวา แก้วปลั่ง)

..... กรรมการ

(ผศ. ดร. รัตนา หอมวิเชียร)

..... กรรมการ

(รศ. ดร. เรืองรุชดี ชีระโรจน์)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กิริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	ระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่าย		
ผู้วิจัย	รพีภัทร เตชะรุ่งเรืองสกุล		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง		
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวทางเลือกระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการจัดน้ำทางวิศวกรรมของอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายโดยการหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมนำไปสร้างทางเลือกภายใต้ 4 สถานการณ์คือ สถานการณ์การขาดแคลนน้ำปกติ สถานการณ์การขาดแคลนน้ำสูง ส่งผลกระทบต่อระบบส่งผลกระทบรุนแรง สถานการณ์น้ำท่วมจากการไหลล้นปกติ และสถานการณ์น้ำท่วมจากการไหลล้นปกติสูง ส่งผลกระทบต่อระบบส่งผลกระทบต่อระบบ โดยประยุกต์ใช้เทคนิค Harris Hawks Optimization (HHO) ที่เชื่อมโยงกับแบบจำลองเลียนแบบอ่างเก็บน้ำเพื่อประเมินทางเลือกในการตัดสินใจสำหรับระบบอ่างเก็บน้ำเครือข่ายในประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วยอ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ โดยมีวัตถุประสงค์ของการค้นหาได้แก่ ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด ค่าสูงสุดของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด และค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด โดยใช้ร่วมกับเกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐานมาตรฐาน (SOP) และเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule (HR) ผลการค้นหาและทดสอบประสิทธิภาพของโค้งควบคุม พบว่าเกิดทางเลือกที่ดีที่สุดในการตัดสินใจด้วยสถานการณ์น้ำ 4 สถานการณ์ สำหรับการบริหารอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายจำนวน 8 ทางเลือกจาก 152 ทางเลือก ซึ่งโดยส่วนมากจะเป็นจากโค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ HR ซึ่งบรรเทาสถานการณ์น้ำขาดแคลนและน้ำไหลล้นได้ดีทั้งในเกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน (SOP) และเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ HR

คำสำคัญ : ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ, โค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำ, การหาค่าเหมาะสมที่สุด, เครือข่ายอ่างเก็บน้ำ, การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ, Harris Hawks Optimization, Hedging Rule

TITLE	Decision Supporting System for Network Reservoir Operation		
AUTHOR	Rapeepat Techarungruengsakul		
ADVISORS	Professor Anongrit Kangrang , Ph.D.		
DEGREE	Doctor of Philosophy	MAJOR	Civil Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2022

ABSTRACT

The aim of this research is to develop a methodology for selecting decision support systems for networked reservoirs by selecting relevant rule curves that will result in alternatives in the following four scenarios regular water scarcity situation is a serious effect of high water shortage conditions flooding from both the typical overflow and the typical high overflow has a significant impact. This methodology will use the Harris Hawks Optimization (HHO) technique in conjunction with a reservoir simulation model to assess decision-making options for the network reservoir system in Thailand comprising the Bhumibol reservoir and the Sirikit reservoirs. The objective functions of the search procedure were the minimal average water shortage per year, the minimal maximum water shortage, and the minimal average water spill per year according to the main purpose of the reservoirs using The standard operating policy (SOP) and the hedging rule (HR). According to the results and assessing the effectiveness of the control curves, the best option scenarios total of eight alternative solutions one of 152 options, the majority of which were based on rule curve triggered by the HR water discharge threshold and helped to relieve the problem both the standard discharge threshold (SOP) and the HR discharge threshold benefit from water shortages and spills.

Keyword : Decision Support System, Reservoir Rule Curves, Optimization Technique, Network Reservoirs, Reservoir Operation, Harris Hawks Optimization, Hedging Rule

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งรวมถึงแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หริส ประสารฉ่ำ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวา แก้วปลั่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนา ทอมวิเชียร กรรมการ และ รองศาสตราจารย์ ดร.เรืองรุชดี ชีระโรจน์ กรรมการ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ นายธีระวัฒน์ ทองวรรณ และพี่ๆ น้องๆ สาขาวิศวกรรมแหล่งน้ำทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ครอบครัว ที่ให้กำลังใจในการจัดทำวิทยานิพนธ์เสมอมา

รพีภัทร เตชะรุ่งเรืองสกุล

พูน ปณ ภิโต ชีเว

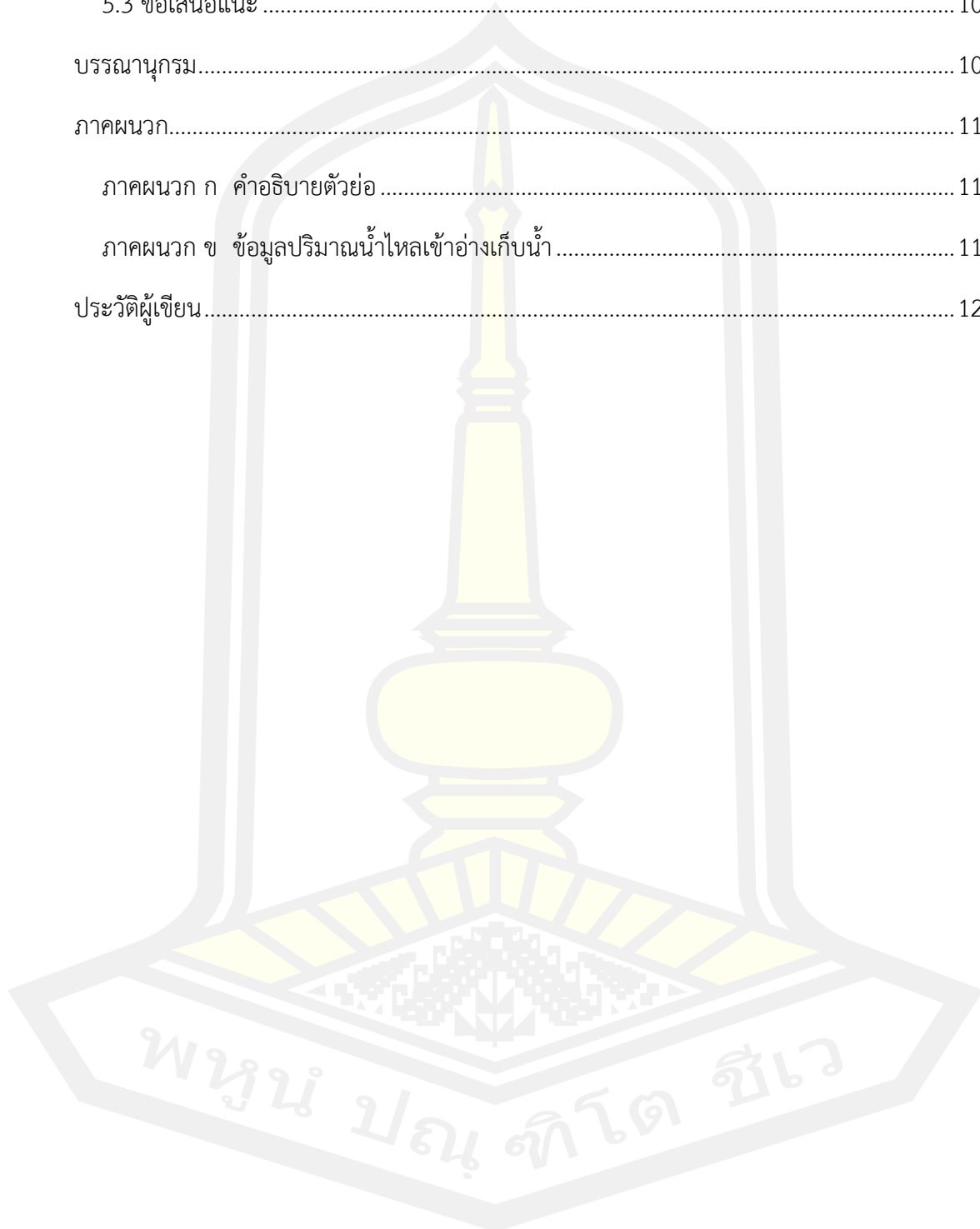
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	7
1.3 ขอบเขตการวิจัย	7
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
บทที่ 2 ปรัชศน์เอกสารข้อมูล	9
2.1 ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support System)	9
2.1.1 ความหมายของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ.....	9
2.1.2 การจัดการกับการตัดสินใจ	9
2.1.3 ส่วนประกอบของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ.....	13
2.2 การจัดการน้ำ.....	14
2.2.1 การจัดการด้านน้ำต้นทุน	16
2.2.2 การจัดการด้านความต้องการน้ำ.....	17
2.3 การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operations).....	18
2.3.1 ประเภทของอ่างเก็บน้ำ.....	19

2.3.2	หลักการเกณฑ์การปล่อยน้ำของอ่างเก็บน้ำ	19
2.3.3	หลักการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำด้วยโค้งควบคุม	23
2.4	การปรับปรุงโค้งควบคุม	26
2.4.1	เทคนิคการหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีการศึกษาเลียนแบบ.....	27
2.4.2	เทคนิคการหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีโปรแกรมเชิงพลวัต	29
2.4.3	เทคนิคการหาค่าเหมาะสมด้วยเทคนิคเจเนติกอัลกอริทึม.....	30
2.5	เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิค Harris Hawks Optimization (HHO)	32
2.5.1	ความเป็นมา	32
2.5.2	Harris hawks optimization (HHO)	34
2.6	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43
2.6.1	การประยุกต์ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำและการ ปรับปรุงโค้งคุมอ่างเก็บน้ำ.....	43
2.6.2	การประยุกต์ใช้เทคนิค Harris Hawks Optimization ในงานอื่น ๆ	51
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	55
3.1	พื้นที่ศึกษา.....	56
3.1.1	อ่างเก็บน้ำภูมิพล	58
3.1.2	อ่างเก็บน้ำสิริกิติ์.....	59
3.2	การสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจ	60
3.2.1	การสร้างฐานข้อมูล.....	60
3.2.2	การสร้างฐานแบบจำลอง	61
3.2.3	การสร้างส่วนการจัดการโต้ตอบ.....	61
3.3	การค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิค Harris Hawks Optimization.....	61
3.3.1	จัดทำโค้งควบคุม	63
3.3.2	การตรวจสอบโค้งควบคุมและประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุม	65

บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	67
4.1 ผลการค้นหาคำคุ้มครองที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำ.....	67
4.1.1 คุ้มครองจากกรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging Rule ด้วยเทคนิค Harris Hawks Optimization เปรียบเทียบกับ Genetic Algorithm และเทคนิค Wind Driven Optimization กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด.....	68
4.1.2 คุ้มครองจากกรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating Rules) ด้วยเทคนิค Harris Hawks Optimization.....	70
4.1.3 คุ้มครองจากกรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging Rule ด้วยเทคนิค Harris Hawks Optimization	74
4.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพคุ้มครองอ่างเก็บน้ำ.....	78
4.2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบของคุ้มครองด้วยเทคนิค HHO, GA และ WDO กรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule ด้วยข้อมูลปริมาณน้ำทำในอดีต 1 ชุดเหตุการณ์.....	78
4.2.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพคุ้มครองด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating rules) จากน้ำทำอดีต 1 ชุดเหตุการณ์.....	80
4.2.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพคุ้มครองด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating rules) จากน้ำทำอดีตสังเคราะห์ 1,000 เหตุการณ์	83
4.2.4 ผลการประเมินประสิทธิภาพคุ้มครอง ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule จากน้ำทำอดีต 1 ชุดเหตุการณ์.....	87
4.2.5 ผลการประเมินประสิทธิภาพคุ้มครอง ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule จากน้ำทำอดีตสังเคราะห์ 1,000 เหตุการณ์.....	90
4.3 ผลการสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจ	94
4.3.1 ผลทางเลือกของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ.....	96
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	104
5.1 สรุปผลการค้นหาคำคุ้มครองที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำ.....	104

5.2 สรุปผลการสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจ	106
5.3 ข้อเสนอแนะ	106
บรรณานุกรม.....	108
ภาคผนวก.....	113
ภาคผนวก ก คำอธิบายตัวย่อ	114
ภาคผนวก ข ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ	116
ประวัติผู้เขียน.....	121



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ชั้นฐานข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำเครือข่าย	60
ตาราง 2 ผลการประเมินเหตุการณ์ปริมาณน้ำขาดแคลนและน้ำไหลส่วนเกินของโค้งโค้งควบคุมจากเทคนิค HHO, GA และ WDO กรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule ด้วยข้อมูลปริมาณน้ำทำในอดีต 1 ชุดเหตุการณ์ โดยพิจารณาค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด	79
ตาราง 3 ผลการประเมินเหตุการณ์ปริมาณน้ำขาดแคลนและน้ำไหลส่วนเกินของโค้งควบคุมจากกรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating Rules) ด้วยข้อมูลปริมาณน้ำทำในอดีต 1 ชุดเหตุการณ์	82
ตาราง 4 ผลการประเมินเหตุการณ์ปริมาณน้ำขาดแคลนและน้ำไหลส่วนเกินของโค้งควบคุมจากกรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating Rules) ด้วยข้อมูลปริมาณน้ำทำในอดีต 1,000 ชุดเหตุการณ์	84
ตาราง 5 ผลการประเมินเหตุการณ์ปริมาณน้ำขาดแคลนและน้ำไหลส่วนเกินของโค้งควบคุมจากกรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule ด้วยข้อมูลปริมาณน้ำทำในอดีต 1 ชุดเหตุการณ์	88
ตาราง 6 ผลการประเมินเหตุการณ์ปริมาณน้ำขาดแคลนและน้ำไหลส่วนเกินของโค้งควบคุมจากกรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule ด้วยข้อมูลปริมาณน้ำทำในอดีต 1,000 ชุดเหตุการณ์	91

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ระดับของการจัดการ.....	10
ภาพประกอบ 2 ขั้นตอนของการตัดสินใจ.....	11
ภาพประกอบ 3 ประเภทของการตัดสินใจ.....	13
ภาพประกอบ 4 เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน.....	21
ภาพประกอบ 5 เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging.....	22
ภาพประกอบ 6 แนวทางการปล่อยน้ำด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging.....	23
ภาพประกอบ 7 การแบ่งปริมาตรอ่างเก็บน้ำ.....	24
ภาพประกอบ 8 เกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน.....	25
ภาพประกอบ 9 การพร่องน้ำในช่วงเริ่มต้นฤดูฝน.....	27
ภาพประกอบ 10 การสำรองน้ำในช่วงฤดูแล้ง.....	28
ภาพประกอบ 11 Harris's hawk.....	33
ภาพประกอบ 12 ขั้นตอนของ HHO.....	34
ภาพประกอบ 13 การเปลี่ยนแปลงของ E ระหว่างการวิ่งสองรอบและการทำซ้ำ 500 ครั้ง.....	36
ภาพประกอบ 14 ตัวอย่างของเวกเตอร์โดยรวมในกรณีของ hard besiege.....	38
ภาพประกอบ 15 ตัวอย่างของเวกเตอร์โดยรวมในกรณีของ soft besiege และ progressive rapid dives.....	40
ภาพประกอบ 16 ตัวอย่างของเวกเตอร์โดยรวมในกรณีของ hard besiege และ progressive rapid dives ในพื้นที่ 2D และ 3D.....	41
ภาพประกอบ 17 รหัสคอมพิวเตอร์ของ HHO.....	42
ภาพประกอบ 18 แผนผังกระบวนการดำเนินงาน.....	55
ภาพประกอบ 19 ที่ตั้งพื้นที่ศึกษา อ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์.....	56

ภาพประกอบ 20 ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและความต้องการใช้น้ำ อ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์	57
ภาพประกอบ 21 แผนผังการไหล อ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์	57
ภาพประกอบ 22 รายละเอียดโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำภูมิพล	58
ภาพประกอบ 23 รายละเอียดโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์	59
ภาพประกอบ 24 ขั้นตอนการสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจของอ่างเก็บน้ำศรีอภัย	60
ภาพประกอบ 25 แผนผังการทำงานหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมด้วยเทคนิค HHO	62
ภาพประกอบ 26 การสร้างโค้งควบคุม.....	65
ภาพประกอบ 27 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ HR จากเทคนิค HHO, GA และ WDO กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด.....	69
ภาพประกอบ 28 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ด้วยเกณฑ์ HR จากเทคนิค HHO, GA และ WDO กรณี ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด	69
ภาพประกอบ 29 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ SOP กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ย การขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 57 ปี.....	71
ภาพประกอบ 30 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ด้วยเกณฑ์ SOP กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการ ขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 47 ปี.....	71
ภาพประกอบ 31 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ SOP กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าสูงสุด ของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 57 ปี	72
ภาพประกอบ 32 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ด้วยเกณฑ์ SOP กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าสูงสุด ของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 47 ปี	72
ภาพประกอบ 33 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ SOP กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ย ของการไหลล้นน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 57 ปี.....	73
ภาพประกอบ 34 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ SOP กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ย ของการไหลล้นน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 47 ปี.....	73
ภาพประกอบ 35 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ HR กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการ ขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 57 ปี.....	75

ภาพประกอบ 36 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ด้วยเกณฑ์ HR กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลนํ้าท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 47 ปี.....	75
ภาพประกอบ 37 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ HR กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลนํ้าท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 57 ปี.....	76
ภาพประกอบ 38 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ด้วยเกณฑ์ HR กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลนํ้าท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 47 ปี.....	76
ภาพประกอบ 39 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ HR กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลนํ้าท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 57 ปี.....	77
ภาพประกอบ 40 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ HR กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลนํ้าท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 47 ปี.....	77
ภาพประกอบ 41 ผลทางเลือกของระบบสนับสนุนการตัดสินใจของอ่างเก็บน้ำศรีอยุธยา	95
ภาพประกอบ 42 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนนํ้าของทางเลือกการตัดสินใจที่ 1.....	96
ภาพประกอบ 43 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนนํ้าของทางเลือกการตัดสินใจที่ 2.....	97
ภาพประกอบ 44 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนนํ้าของทางเลือกการตัดสินใจที่ 3.....	98
ภาพประกอบ 45 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนนํ้าของทางเลือกการตัดสินใจที่ 4.....	99
ภาพประกอบ 46 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนนํ้าของทางเลือกการตัดสินใจที่ 5.....	100
ภาพประกอบ 47 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนนํ้าของทางเลือกการตัดสินใจที่ 6.....	101
ภาพประกอบ 48 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนนํ้าของทางเลือกการตัดสินใจที่ 7.....	102
ภาพประกอบ 49 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนนํ้าของทางเลือกการตัดสินใจที่ 8.....	103

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

“ทรัพยากรน้ำ” เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญ และจำเป็นต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์และสัตว์ ซึ่งสภาวะการณ์ของทรัพยากรน้ำในปัจจุบันนี้ ได้เกิดปัญหาขึ้นไม่ว่าจะเป็นปัญหาทั้งทางด้านปริมาณ ซึ่งปัญหาทางด้านปริมาณนั้นก็เกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่ไม่แน่นอน (Climate change) (Kumar et al., 2017) และการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use change) จากการเจริญเติบโตของเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ซึ่งจะทำให้พื้นที่รับน้ำนั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย (Gashaw et al., 2018) ด้วยสาเหตุหลักทั้งสองนั้นจึงส่งผลกระทบต่อการใช้ของน้ำท่า รวมไปถึงการไหลเข้าของน้ำในอ่างเก็บน้ำอีกด้วย (Ponpang-Nga and Techamahasaranont., 2016) นอกจากนี้การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรนั้น ยังส่งผลให้เกิดการใช้น้ำในกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นการอุปโภค-บริโภค ด้านเกษตรกรรม และรวมไปถึงการเจริญเติบโตในด้านอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งอุตสาหกรรมต่าง ๆ ล้วนต้องใช้น้ำในกระบวนการผลิตทั้งสิ้น ดังนั้นการจัดการกับปริมาณน้ำที่มีความไม่แน่นอนเพื่อให้มีความสมดุลกับปริมาณความต้องการใช้น้ำจึงเป็นเรื่องที่ต้องให้ความสำคัญ เพื่อที่จะป้องกันการเกิดปัญหาด้านทรัพยากรน้ำซึ่งส่งผลกระทบต่อชีวิต ทรัพย์สิน และการดำรงชีวิต

อ่างเก็บน้ำ ถูกสร้างขึ้นเพื่อตอบสนองวัตถุประสงค์ตามพื้นที่ ซึ่งหน้าที่ของอ่างเก็บน้ำก็คือการรองรับปริมาณน้ำฝนในฤดูฝนเพื่อป้องกันน้ำหลาก และปล่อยน้ำมาใช้ตามความต้องการใช้น้ำทำอ่างในฤดูแล้ง ซึ่งการแบ่งประเภทของอ่างเก็บน้ำ นอกจากจะแบ่งตามขนาดแล้ว ก็สามารถที่จะแบ่งตามการตอบสนองวัตถุประสงค์ ได้แก่ อ่างเก็บน้ำเอกประสงค์ (Single-purpose Reservoir) คืออ่างเก็บน้ำที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์เพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง และอ่างเก็บน้ำเอนกประสงค์ (Multi-purpose Reservoir) คืออ่างเก็บน้ำที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อตอบสนองได้หลายวัตถุประสงค์ ได้แก่ การชลประทาน การจัดหาเพื่อการอุปโภคบริโภคและอุตสาหกรรม การผลิตไฟฟ้าพลังงานน้ำ การบรรเทาอุทกภัยหรือภัยแล้ง การคมนาคมทางน้ำ การควบคุมน้ำทางด้านท้ายน้ำ เป็นต้น ซึ่งการจัดการกับอ่างเก็บน้ำแบบเอกประสงค์นั้นจะมีวิธีการจัดการที่ไม่ยุ่งยากมากเท่ากับอ่างเก็บน้ำแบบเอนกประสงค์ เนื่องจากอ่างเก็บน้ำแบบเอนกประสงค์จะต้องมีการพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีมากกว่า

แต่ถึงอย่างนั้น การจัดการกับอ่างเก็บน้ำทั้งสองประเภทที่ตอบสนองภายในอ่างเก็บน้ำแห่งเดียว ก็ถือว่าไม่ได้มีความซับซ้อนเท่ากับอ่างเก็บน้ำที่ทำงานเป็นส่วนหนึ่ง หรือที่มีความสัมพันธ์และมีการใช้งานร่วมกันกับอ่างเก็บน้ำอื่น ๆ ที่อยู่ในระบบเดียวกัน ซึ่งเป็นระบบที่จัดการได้ยากแต่มีประสิทธิภาพในการใช้งานที่สูง

อ่างเก็บน้ำเครือข่าย (Network Reservoir) ถูกพัฒนาขึ้นจากข้อจำกัดของอ่างเก็บน้ำแบบอ่างเดียว เช่น เมื่อน้ำในอ่างเก็บน้ำเพียงแห่งเดียวไม่เพียงพอต่อการตอบสนองความต้องการน้ำ หรือถ้าอ่างเก็บน้ำแห่งเดียวไม่สามารถเก็บกักน้ำได้อย่างเพียงพอจนทำให้เกิดอุทกภัยขึ้นได้ การทำงานของอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายก็มีเข้ามามีบทบาทในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ ไม่ว่าจะเป็นการช่วยกันจ่ายน้ำเพื่อตอบสนองความต้องการใช้น้ำที่ท้ายอ่าง หรือแม้แต่ผันน้ำจากอ่างเก็บน้ำหนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เพื่อจัดการกับปัญหาน้ำล้นอ่างเก็บน้ำ ซึ่งเป็นแนวทางที่ดีในการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ ซึ่งในปัจจุบันมีอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายหลายแห่งใช้กันในหลาย ๆ ประเทศ ข้อดีคือจะช่วยเพิ่มความคล่องตัวและความยืดหยุ่นตัวในการจัดการอ่างเก็บน้ำในแง่ของการป้องกันน้ำท่วมและภัยแล้ง ซึ่งในประเทศไทยเองก็มีอ่างเก็บน้ำเครือข่าย ตั้งแต่อ่างเก็บน้ำขนาดเล็ก อ่างเก็บน้ำขนาดกลาง ไปจนถึงอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ เช่น อ่างเก็บน้ำภูมิพล และอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ที่ทำงานร่วมกันเพื่อตอบสนองความต้องการน้ำขนาดใหญ่ของกลุ่มน้ำเจ้าพระยา ซึ่งก็เป็นความท้าทายในการจัดการอ่างเก็บน้ำของประเทศไทยเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่จะส่งผลกระทบในวงกว้าง ดังนั้นจึงจะต้องมีการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำที่ดี เพื่อที่จะทำให้สามารถใช้งานอ่างเก็บน้ำได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

ในปัจจุบันพบว่างานพัฒนาแหล่งน้ำทางด้านโครงสร้างใหม่มีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งเหตุผลหลักมาจากต้นทุนในการพัฒนาแผนใหม่ต้องใช้เงินมหาศาล รวมถึงปัจจัยผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมส่งผลให้ต้องมีการปรับเปลี่ยนแนวทางการบริหารจัดการของแผนพัฒนาแหล่งน้ำที่มีอยู่เดิมให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นนั่นเอง ซึ่งวิธีที่ไม่ใช้สิ่งก่อสร้าง และสามารถทำได้ทันทีนั่นคือ ซึ่งหนึ่งในแนวทางการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำแบบไม่ใช้สิ่งก่อสร้างที่เข้ามามีบทบาทและเป็นประโยชน์อย่างมากในช่วงเวลาปัจจุบันนี้คือ ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support System) ซึ่งจะเป็นระบบที่เป็นการบูรณาการระหว่างเทคโนโลยีและการจัดการข้อมูล นำมาสร้างเป็นระบบเพื่อเป็นตัวช่วยในการอธิบายปัญหา ผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นในเหตุการณ์หรือสถานการณ์ และการตัดสินใจคัดเลือกแนวทางในการปฏิบัติ เป็นระบบที่เหมาะสมกับปัญหาที่มีโครงสร้างไม่แน่นอนหรือปัญหาแบบกึ่งโครงสร้าง ซึ่งระบบทรัพยากรน้ำนั้นเป็นระบบที่มีความซับซ้อน ระบบสนับสนุนการตัดสินใจเลยถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านแหล่งน้ำเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ

แบบเครือข่าย ที่ต้องมีการพิจารณาปัจจัยและความสัมพันธ์ต่าง ๆ ดังนั้นระบบสนับสนุนการตัดสินใจ นี้ จึงเป็นตัวช่วยที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้ในการนำมาสร้างทางเลือกจากสถานการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้น ด้วยการประเมินผลลัพธ์เบื้องต้นเพื่อช่วยตัดสินใจในการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ

การบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir management) คือการวางแผนและการจัดการ อ่างเก็บน้ำให้บรรลุวัตถุประสงค์ พร้อมทั้งพิจารณาปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำให้มีความสมดุลกับ ความต้องการใช้น้ำท้ายอ่าง ซึ่งปัญหาหลักของการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ คือจะทำอย่างไรให้ ปริมาณน้ำต้นทุนที่มีอยู่ สามารถที่จะตอบสนองความต้องการน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ กันได้อย่างเป็นที น่าพอใจและยั่งยืน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาน้ำท่วมหรือการขาดแคลนน้ำ จากนิยามของการขาด แคลนน้ำ คือการที่ปริมาณน้ำที่ปล่อยไปใช้ตามความต้องการน้อยกว่าปริมาณความต้องการใช้น้ำ ซึ่ง เป็นเรื่องยากที่จะปล่อยน้ำได้ตามความต้องการใช้น้ำท้ายอ่างอยู่เสมอ เนื่องจากปริมาณน้ำต้นทุนที่ เหลืออยู่ในอ่างเก็บน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ ไม่เท่ากัน ซึ่งปัญหาในส่วนนี้ทำให้เกิดช่องว่างในการบริหาร จัดการอ่างเก็บน้ำในการปฏิบัติงานจริง จึงต้องมีการวางแผนการปล่อยน้ำเพื่อให้ประชาชนผู้ใช้น้ำท้าย อ่างได้รับประโยชน์สูงสุด และป้องกันการเกิดผลกระทบจากปัญหาด้านปริมาณน้ำให้ได้มากที่สุด เช่นเดียวกัน

การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation) คือหน่วยย่อยในการบริหารจัดการอ่าง เก็บน้ำ นิยมนำมาใช้จำลองการเลียนแบบอ่างเก็บน้ำเพื่อจำลองการดำเนินการของระบบอ่างเก็บน้ำ ด้วยวิธีต่าง ๆ โดยจะใช้ร่วมกับเกณฑ์ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operating rules) ซึ่งมี อยู่ด้วยกันหลากหลายเกณฑ์ ไม่ว่าจะเป็น Pack rule, Space rule และ Standard operating rule หรือเกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน เป็นเกณฑ์การปล่อยน้ำที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งเกณฑ์นี้จะทำการ ปล่อยน้ำจากความต้องการใช้น้ำจากปริมาณน้ำที่ใช้การได้ ซึ่งเหมาะสำหรับอ่างเก็บน้ำที่มีระดับน้ำ ปานกลางไปจนถึงมาก สามารถตอบสนองความต้องการใช้น้ำได้อย่างเพียงพอ แต่อย่างไรก็ตาม ในทางกลับกัน อาจไม่เหมาะสำหรับอ่างเก็บน้ำที่มีช่วงเวลาในน้ำขาดแคลนอย่างรุนแรง หรืออ่างเก็บ น้ำที่มีปริมาณน้ำไหลเข้ามาเพียงเล็กน้อยแต่มีความต้องการใช้น้ำสูง ส่งผลให้ไม่สามารถตอบสนอง ความต้องการได้ ทำให้เกิดการขาดน้ำอย่างรุนแรง ซึ่งอาจต้องใช้เกณฑ์การดำเนินงานอ่างเก็บน้ำอื่น เพื่อช่วยในการจัดการ อย่างไรก็ตาม มีอีกหนึ่งเกณฑ์ที่นำมาใช้จำลองการปล่อยน้ำเหมาะสำหรับอ่างที่ มีสภาวะขาดแคลนน้ำที่ส่งผลกระทบรุนแรง คือเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule (Javad and Mojtaba, 2019) คือเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่พยายามลดการส่งน้ำในบางช่วงเวลาเพื่อเก็บ กักน้ำไว้ใช้ในเวลาลัดไป โดยที่ แม้ว่าปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ในอ่างจะสามารถตอบสนองต่อ

ปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายได้อย่างเต็มศักยภาพก็ตาม อาจกล่าวได้ว่าเกณฑ์การปฏิบัติการแบบ Hedging rule เป็นความพยายามที่จะลดปัญหาการขาดน้ำอย่างรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต ด้วยการกระจายการขาดน้ำในเวลาปัจจุบันไปล่วงหน้า (Men et al., 2019) ซึ่งเหมาะอย่างยิ่งสำหรับระบบที่มีความต้องการใช้น้ำสูง แต่ประสบปัญหาในด้านความผันแปรของข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ ซึ่งจะมีความซับซ้อนมากขึ้นอีก เมื่อต้องนำมาปรับใช้กับอ่างเก็บน้ำที่ทำงานร่วมกันเป็นระบบที่ตอบสนองความต้องการใช้น้ำร่วมกัน (Hong-bin et al., 2014)

การปล่อยน้ำไปใช้ตามความต้องการใช้น้ำทำอย่างไร เราเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การจัดสรรน้ำ (Water allocation) คือการนำน้ำใช้ประโยชน์ทั้งทางด้านอุปโภค-บริโภค ด้านการเกษตร เป็นต้น ซึ่งเครื่องมือที่สำคัญที่ช่วยประกอบการตัดสินใจเพื่อที่จะจัดสรรน้ำคือ โค้งควบคุมการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Rule Curves) ซึ่งใช้เป็นโค้งรายเดือน ประกอบไปด้วย โค้งควบคุมเส้นบน (Upper Rule Curves) และโค้งควบคุมเส้นล่าง (Lower Rule Curves) ซึ่งเป็นเส้นที่บ่งบอกถึงระดับของขอบเขตบนและล่างของระดับควบคุมอ่างเก็บน้ำ โดยการบริหารอ่างเก็บน้ำนั้นจะพยายามควบคุมระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำให้อยู่ภายใต้โค้งควบคุมนี้ให้ได้มากที่สุด ซึ่งโค้งควบคุมนี้เรียกว่าเป็นการบริหารจัดการน้ำในระยะยาว เมื่อใช้ไประยะหนึ่งประสิทธิภาพก็จะด้อยลง จึงจำเป็นต้องปรับปรุงโค้งควบคุมให้มีประสิทธิภาพใหม่ (อนงค์ฤทธิ์, 2551)

การปรับปรุงโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำก็คือการปรับค่าระดับบนและล่างของแต่ละเดือนทั้งหมด 24 จุด ร่วมกับแบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำ เพื่อหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมต่อสถานการณ์อ่างเก็บน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งในแบบจำลองการเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำนั้น จะเป็นการจำลองลักษณะทางกายภาพของอ่าง เช่นความจุอ่าง อัตราการปล่อยน้ำ เป็นต้น ในช่วงอดีตที่ผ่านมา การค้นหาคำตอบของโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำจะค้นหาด้วยวิธีการลองผิดลองถูก (Trial and Error) เพื่อหาคำตอบของโค้งควบคุมที่ดีที่สุด ซึ่งจะเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ระบบของอ่างเก็บน้ำ วิเคราะห์หาปริมาตรกักเก็บขั้นต่ำที่อ่างเก็บน้ำต้องการ และสมมติโค้งควบคุมที่เป็นไปได้ เช่น Jain et al., 1998) ได้พัฒนาแบบจำลองที่ใช้เทคนิคการศึกษาเลียนแบบเพื่อหาโค้งควบคุมรายเดือนที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำอนุภาคประสงคของประเทศอินเดีย โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการค้นหาคำตอบคือเพื่อให้เกิดการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด โดยการสมมุติโค้งควบคุมเริ่มต้นที่เป็นไปได้ (Initial Feasible Rule Curves) และปรับโค้งควบคุมนี้แบบลองผิดลองถูก (Trial and Error) จนกระทั่งได้โค้งควบคุมที่เหมาะสม (Chaiyasong, 1997) ก็ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง HEC-5 หาโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์โดยการสร้างโค้งควบคุมย่อยสำหรับวัตถุประสงค์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า การ

ชลประทานและการป้องกันน้ำท่วม แล้วจึงนำโค้งควบคุมย่อยเหล่านั้นมาจำลองกับระบบอ่างเก็บน้ำ เพื่อหาโค้งควบคุมที่ให้ค่าการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด โดยการปรับระดับเก็บกักในแต่ละเดือนแบบลองผิดลองถูก (Trial and Error) เพื่อให้เกิดการขาดแคลนและการระบายน้ำล้นน้อยที่สุดเช่นกัน ต่อมา ในปี 2004 ไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ, 2547) ซึ่งเป็นผู้ดูแลอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่เกือบทั้งหมดของประเทศ ทำการค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้แบบจำลอง HEC-3 ในการทำปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการค้นหาคำตอบคือเพื่อให้เกิดการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ซึ่งจะสมมุติโค้งควบคุมเริ่มต้นที่เป็นไปได้ และปรับโค้งควบคุมนี้แบบลองผิดลองถูก จนกระทั่งได้โค้งควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งให้การขาดแคลนนํ้าในระยะยาวน้อยที่สุดตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด ซึ่งวิธีนี้ กฟผ. ได้ใช้ในการหาโค้งควบคุมรายเดือนของอ่างเก็บน้ำ เช่น เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนอุบลรัตน์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการหาโค้งควบคุมโดยวิธีการศึกษาเลียนแบบข้างต้นนี้จะซับซ้อนสำหรับกรณีหลายอ่างเก็บน้ำในระบบเดียวกัน ยิ่งไปกว่านั้นเนื่องจากกระบวนการในการค้นหาคำตอบต้องอาศัยประสบการณ์ของวิศวกรผู้คำนวณคำตอบที่ได้จึงไม่สามารถที่จะมั่นใจได้ว่าจะเป็นโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุดจริงหรือไม่

ต่อมาในปีได้มีการพัฒนาโปรแกรมเชิงพลวัตแบบมีเงื่อนไข (Conditional Dynamic Programming, CDP) ให้เป็นทางเลือกในการค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสม (Chaleeraktragoon and Kangrang., 2005) โดยประยุกต์ใช้ค้นหาคำตอบโค้งควบคุมรายเดือนที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ เทคนิค CDP เป็นเทคนิคสำหรับปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ที่มีการค้นหาคำตอบเป็นขั้น ๆ (Stage) ซึ่งทำให้เหมาะสำหรับนำมาใช้หาโค้งควบคุมที่ละช่วงเวลา อย่างไรก็ตาม CDP ก็มีขีดจำกัดตรงที่ว่าเมื่อตัวแปรอธิบายสภาพระบบ (State Variables) มากจะทำให้การคำนวณค้นหาคำตอบด้วย DP ยากขึ้น และต่อมาจึงได้นิยามที่จะนำเทคนิคการค้นหาค่าที่เหมาะสม มาช่วยในการค้นหาคำตอบ เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถหาคำตอบได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ ต่อมาได้มีการค้นหาโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำโดยใช้ Genetic Algorithm (GA) ร่วมกับการเชื่อมต่อกับวิธีแบบจำลองสถานการณ์ ซึ่งได้นำไปประยุกต์ใช้กับอ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ ในลุ่มน้ำเจ้าพระยา ซึ่งเป็นอ่างเก็บน้ำที่เป็นระบบเดียวกัน (Kangrang & Chaleeraktragoon., 2015) และได้กำหนดค่าความขาดแคลนนํ้าเฉลี่ยเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ พบว่าโค้งควบคุมที่สร้างจาก GA สามารถทำให้ช่วยบรรเทาสถานการณ์การขาดแคลนนํ้าและการปล่อยน้ำที่เหมาะสมกว่าโค้งควบคุมที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันของอ่างเก็บน้ำนั้น

ในเวลาต่อมา เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมก็ได้รับความนิยมนำมาประยุกต์ใช้งานกับด้านแหล่งน้ำมากขึ้น เช่น เจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) เทคนิคอาณานิคมมด (Ant Colony Algorithm) เทคนิคทาบู (Tabu search) เทคนิคเจเนติกโปรแกรมมิ่ง (Genetic Programming) (รัตน์สุตา, 2561) เทคนิค Wind Driven Optimization (WDO) และเทคนิคการถ่ายละอองเรณูดอกไม้ (Flower Pollination Algorithm) ซึ่งได้มีผู้วิจัยที่นำเทคนิคต่าง ๆ เหล่านี้มาปรับใช้ในการค้นหาค่าตอบของโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ อย่างไรก็ตาม เทคนิคบางอย่างมีข้อจำกัดในตัวเอง ในขณะที่บางเทคนิคก็มีระบบที่ซับซ้อนและใหญ่เกินไป นอกจากนี้ เทคนิคบางอย่างมีพารามิเตอร์มากเกินไปซึ่งทำให้ยากต่อการใช้งาน ด้วยเหตุนี้นักวิจัยจึงพยายามที่จะพัฒนาเทคนิคการค้นหาค่าที่เหมาะสมใหม่ ๆ ที่สามารถหาค่าตอบได้อย่างแม่นยำและง่ายมากยิ่งขึ้นคำตอบสำหรับปัญหาเหล่านี้

เมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้มีอีกหนึ่งเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาค่าตอบที่เหมาะสม คือเทคนิค Harris Hawks Optimization (HHO) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับแรงบันดาลใจจากการล่าเหยื่อของเหยี่ยวแฮร์ริสซึ่งเป็นนกที่ฉลาดที่สุดในธรรมชาติ และล่าสุตร่วมกันเป็นทีมโดยใช้กลยุทธ์การจู่โจมโดยที่เหยื่อไม่ทันตั้งตัว เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ลู่เข้าหาค่าตอบได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ (Heidari et al., 2019) เหมาะที่จะเลือกนำมาประยุกต์ใช้ในการหาโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ เทคนิค HHO มีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่เป็นที่รู้จักมากมาย เช่น เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพของอนุภาคฝูง (Particle Swarm Optimization), เทคนิคหมาป่าสีเทา (Grey Wolf Optimizer), ค้นหาแบบนกกาเหว่า (Cuckoo search), Moth-Flame Optimization, เทคนิควิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์ (DE), เทคนิคค้างคาว (BA) และอัลกอริทึมการเพิ่มประสิทธิภาพวาฬ (WOA) ในแง่ของประสิทธิภาพการเริ่มต้น (Xinming & Shaochen., 2021) เทคนิค HHO ได้มีการปรับค่าคำตอบให้เหมาะสมตามกลุ่มอื่น ๆ โดยไม่จำเป็นต้องเริ่มต้นพารามิเตอร์ใด ๆ นอกเหนือจากประชากรเริ่มต้นของฝูง ไม่มีสมการอนุพันธ์ ทั้งยังใช้งานง่าย และครอบคลุม มีความสมดุลระหว่างการสำรวจและการค้นหาค่าตอบ เป็นคุณลักษณะที่โดดเด่นที่สุดของ HHO และเป็นเทคนิคใหม่ที่ยังไม่นิยมนำมาใช้ในการค้นหาโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำ

การปรับปรุงการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายด้วยการค้นหาโค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบต่าง ๆ โดยนำมาสร้างเป็นชุดคำตอบทางเลือกในการตัดสินใจภายใต้สถานการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น จะช่วยให้ผู้ใช้งานหรือผู้ตัดสินใจสามารถที่จะนำเอาแนวทางเหล่านี้ไปเลือกปฏิบัติตามความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรม ซึ่งจะทำให้ช่วยในการแก้ไขปัญหาของเก็บน้ำมีประสิทธิภาพมากขึ้นและตรงประเด็นปัญหาจากชุดทางเลือกที่มีหลากหลาย และนำไปตัดสินใจ

ร่วมกับการจัดการน้ำในด้านอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นทางด้านเศรษฐศาสตร์ สิ่งแวดล้อม และสังคม เป็นต้น เพื่อให้การตัดสินใจครบถ้วนทุกมิติและมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะสร้างทางเลือกการตัดสินใจจากชุดคำตอบทางด้านวิศวกรรมจากสถานการณ์ต่าง ๆ ด้วยการค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิค Harris Hawks Optimization (HHO) เปรียบเทียบกับเทคนิค GA และ WDO เชื่อมต่อกับแบบจำลองเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำ โดยใช้เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ Hedging rule ในระบบอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายที่ทำงานร่วมกัน คืออ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์เพื่อที่จะใช้เป็นตัวช่วยในการสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่าย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาทางเลือกระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับการจัดการน้ำทางวิศวกรรมของอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่าย
2. เพื่อค้นหาโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายที่เหมาะสม โดยใช้เทคนิค Harris Hawks Optimization (HHO) ด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging rule

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา

ในการศึกษารั้ครั้งนี้ได้เลือกอ่างเก็บน้ำที่ทำงานร่วมกันเป็นระบบเพื่อตอบสนองความต้องการใช้น้ำทำอ่างร่วมกัน ได้แก่ อ่างเก็บน้ำภูมิพลในลุ่มน้ำปิง ร่วมกับอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ ในลุ่มน้ำ่าน ซึ่งส่งน้ำช่วยพื้นที่ชลประทานในแผนเจ้าพระยา และความต้องการใช้น้ำเพื่อกิจกรรมต่าง ๆ ในลุ่มน้ำเจ้าพระยา

2. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 2.1 โปรแกรม Matlab เวอร์ชัน 6.1
- 2.2 ใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Harris Hawks Optimization (HHO), Genetic Algorithm (GA) และ Wind Driven Optimization (WDO) สำหรับการปรับปรุงโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ

3. ข้อมูลช่วงปีฐานสำหรับข้อมูลปริมาณน้ำท่า

- 3.1 อ่างเก็บน้ำภูมิพล จำนวน 57 ปี คือระหว่างปี พ.ศ. 2507– 2563
- 3.2 อ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ จำนวน 47 ปี คือระหว่างปี พ.ศ. 2517– 2563

4. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

4.1 ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด

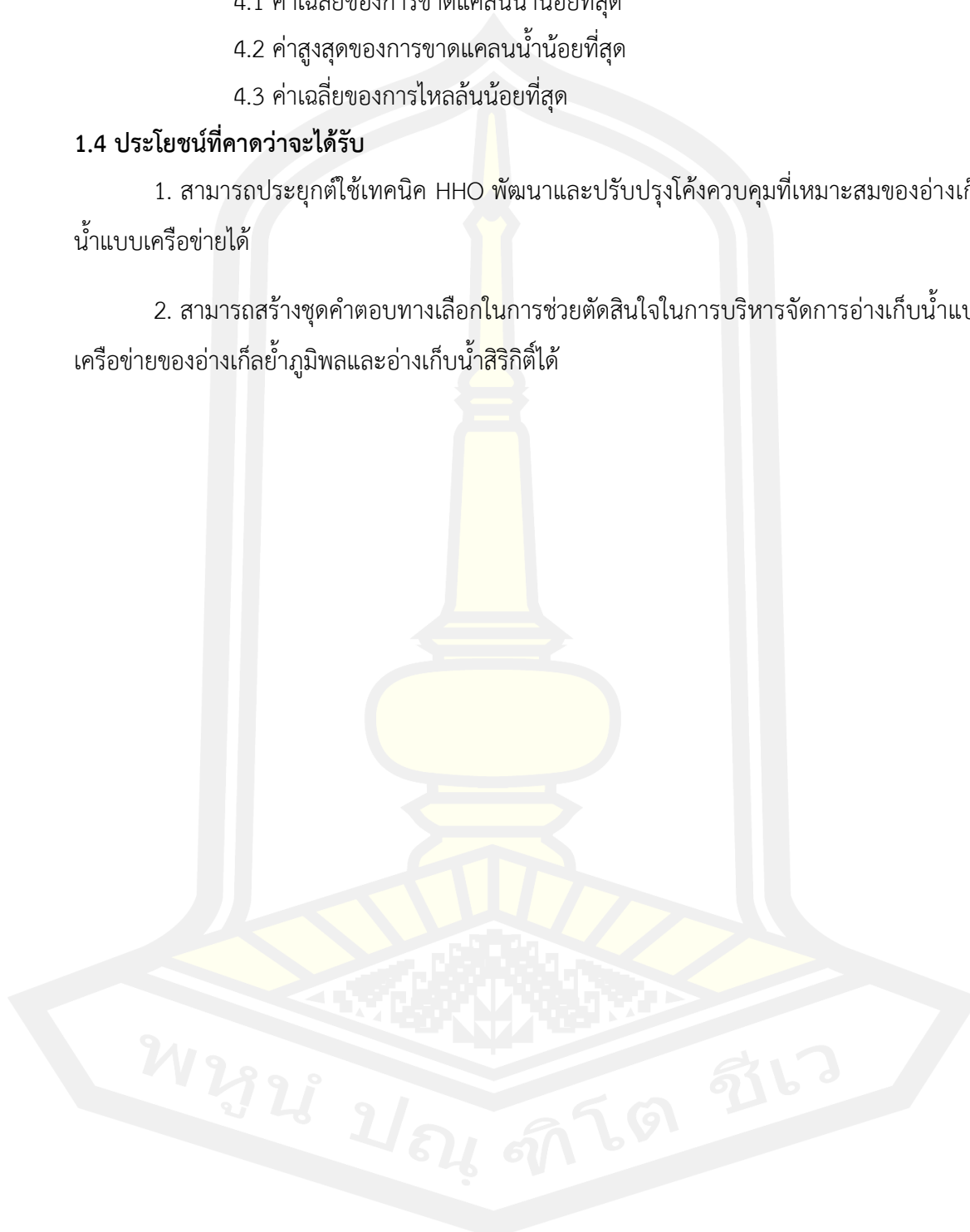
4.2 ค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด

4.3 ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถประยุกต์ใช้เทคนิค HHO พัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างที่เหมาะสมของอ่างเก็บนํ้าแบบเครือข่ายได้

2. สามารถสร้างชุดคำตอบทางเลือกในการช่วยตัดสินใจในการบริหารจัดการอ่างเก็บนํ้าแบบเครือข่ายของอ่างเก็บนํ้าภูมิพลและอ่างเก็บนํ้าสิริกิติ์ได้



บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

ในบทนี้เป็นการศึกษาถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เกิดความเข้าใจ จึงขอแนะนำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามลำดับหัวข้อต่อไปนี้

1. ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ
2. การจัดการน้ำ
3. การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ
4. การปรับปรุงโครงสร้างควบคุม
5. เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิค Harris Hawks Optimization
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รายละเอียดของแต่ละหัวข้อจะอธิบายดังต่อไปนี้

2.1 ระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision Support System)

2.1.1 ความหมายของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ

DSS เป็นซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการตัดสินใจเกี่ยวกับการจัดการ การรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล และสร้างตัวแบบที่ซับซ้อนภายใต้ซอฟต์แวร์เดียวกัน นอกจากนั้น DSS ยังเป็นการประสานการทำงานระหว่างบุคลากรกับเทคโนโลยีทางด้านซอฟต์แวร์ โดยเป็นการกระทำโต้ตอบกัน เพื่อแก้ปัญหาแบบไม่มีโครงสร้าง และอยู่ภายใต้การควบคุมของผู้ใช้ตั้งแต่เริ่มต้นถึงสิ้นสุดขั้นตอนหรืออาจกล่าวได้ว่า DSS เป็นระบบที่โต้ตอบกันโดยใช้คอมพิวเตอร์ เพื่อหาคำตอบที่ง่าย สะดวก รวดเร็วจากปัญหาที่ไม่มีโครงสร้างที่แน่นอน

2.1.2 การจัดการกับการตัดสินใจ

การจัดการ (Management) หมายถึงการบริหารอย่างเป็นระบบ ประกอบด้วยกิจกรรมของกลุ่มบุคคลที่ร่วมมือกันดำเนินงานเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ โดยใช้กระบวนการและทรัพยากรอย่างเหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุด

2.1.2.1 ระดับการจัดการ

การจัดการภายในองค์กร โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ระดับ การจัดการระดับสูง (Upper level management) การจัดการระดับกลาง (Middle-level Management) การจัดการระดับต้น (Lower-level Management) ซึ่งผู้บริหารแต่ละระดับมีหน้าที่และความรับผิดชอบที่ต่างกัน



ภาพประกอบ 1 ระดับของการจัดการ

(ที่มา : <http://www.surachet-r.net/is60/chapter7.pdf>)

1. การจัดการระดับสูง (Upper-level Management) ผู้บริหารระดับสูงเป็นผู้กำหนดวิสัยทัศน์ นโยบาย เป้าหมาย วัตถุประสงค์ รวมถึงวางแผนกลยุทธ์และแผนระยะยาวขององค์กร จึงมีความต้องการสารสนเทศที่มีขอบเขตกว้างและสารสนเทศเกี่ยวกับแนวโน้มต่าง ๆ จากทั้งภายในองค์กรและสิ่งแวดล้อมภายนอก

2. การจัดการระดับกลาง (Middle-level Management) ผู้บริหารระดับกลางมีหน้าที่วางแผนยุทธวิธี (Tactical Planning) และประสานงานระหว่างผู้บริหารระดับสูง และผู้บริหารงานระดับต้นหรือหัวหน้างาน เพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างราบรื่นและสามารถปฏิบัติงานตามนโยบายหรือแผนงานที่กำหนดโดยผู้บริหารระดับสูง

3. การจัดการระดับต้น (Lower-level Management) ผู้บริหารงานระดับต้นหรือหัวหน้างานมีหน้าที่ควบคุม ดูแลการปฏิบัติงานประจำวัน (Operational Control) ซึ่งขั้นตอนการทำงานมีรูปแบบที่แน่นอนและทำงานใกล้ชิดกับผู้ปฏิบัติงาน เพื่อให้การทำงานเป็นไปตามแผนที่กำหนด

2.1.2.2 การตัดสินใจ (Decision Making)

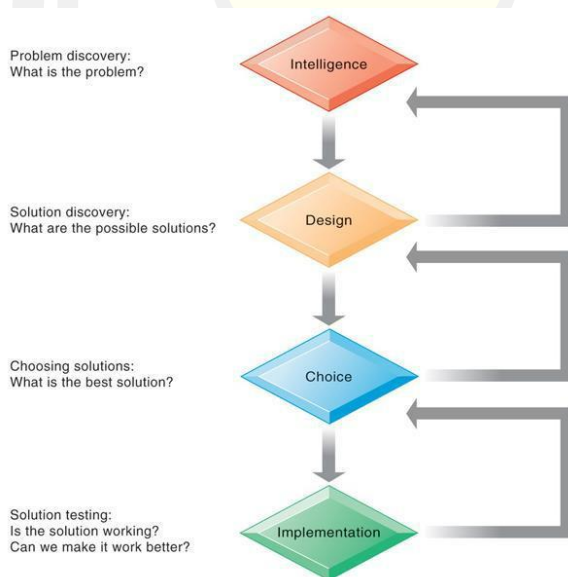
กระบวนการตัดสินใจประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

1. การใช้ความคิดประกอบเหตุผล (Intelligence) เป็นขั้นตอนที่รับรู้และตระหนักถึงปัญหาหรือโอกาสที่เกิดขึ้น ทำการรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัญหา นำมาวิเคราะห์ข้อมูลและตรวจสอบเพื่อแยกแยะ กำหนดรายละเอียดของปัญหาหรือโอกาส

2. การออกแบบ (Design) เป็นขั้นตอนของการพัฒนาและวิเคราะห์ทางเลือกในการปฏิบัติที่เป็นไปได้ รวมถึงการตรวจสอบและประเมินทางเลือกในการแก้ปัญหา ซึ่งอาจใช้ตัวแบบเพื่อสร้างทางเลือกต่าง ๆ ในการแก้ปัญหา หรือออกแบบหนทางแก้ปัญหาที่ดีที่สุด

3. การคัดเลือก (Choice) ผู้ตัดสินใจจะเลือกแนวทางเลือกที่เหมาะสมกับปัญหาและสถานการณ์มากที่สุด โดยอาจใช้เครื่องมือมาช่วยวิเคราะห์ คำนวณค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนของแต่ละแนวทาง เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าได้เลือกแนวทางที่ดีที่สุด

4. การนำไปใช้ (Implementation) เป็นขั้นตอนที่นำผลการตัดสินใจไปปฏิบัติและติดตามผลของการปฏิบัติ เพื่อตรวจสอบว่าการดำเนินงานมีประสิทธิภาพหรือมีข้อขัดข้องประการใดจะต้องแก้ไขหรือปรับปรุงให้สอดคล้องและเหมาะสมกับสถานการณ์อย่างไร



ภาพประกอบ 2 ขั้นตอนของการตัดสินใจ

(ที่มา : <http://www.surachet-r.net/is60/chapter7.pdf>)

2.1.2.3 ระดับของการตัดสินใจภายในองค์กร

การตัดสินใจสามารถถูกจำแนกให้สอดคล้องกับระดับของการจัดการ ออกเป็น 3 ระดับ

1. การตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ (Strategic Decision Making) การตัดสินใจเชิงกลยุทธ์เป็นการตัดสินใจของผู้บริหารระดับสูง ที่ให้ความสนใจในอนาคต เช่น การกำหนดวิสัยทัศน์ขององค์กร การกำหนดนโยบายและการวางแผนระยะยาว เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่กำหนด

2. การตัดสินใจเชิงยุทธวิธี (Tactical Decision Making) การตัดสินใจเชิงยุทธวิธีเป็นการตัดสินใจของผู้บริหารระดับกลาง ซึ่งจะเกี่ยวกับการจัดการเพื่อให้การดำเนินงานบรรลุตามเป้าหมายและวัตถุประสงค์ตามที่ผู้บริหารระดับสูงกำหนดไว้

3. การตัดสินใจเชิงปฏิบัติการ (Operational Decision Making) การตัดสินใจเชิงปฏิบัติการ เป็นการตัดสินใจของผู้บริหารระดับปฏิบัติการหรือหัวหน้างาน ซึ่งเกี่ยวข้องกับงานประจำหรือการปฏิบัติงานเฉพาะด้านต่าง ๆ

2.1.2.4 ประเภทของการตัดสินใจ

ประเภทของการตัดสินใจมี 3 ประเภท ได้แก่

1. การตัดสินใจแบบโครงสร้าง (Structure Decision) บางครั้งเรียกว่าแบบกำหนดไว้ล่วงหน้าแล้ว (programmed) เป็นการตัดสินใจเกี่ยวกับปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นประจำ จึงมีมาตรฐานในการตัดสินใจแก้ปัญหาอยู่แล้ว โดยวิธีการในการแก้ปัญหาที่ดีที่สุดจะถูกกำหนดไว้อย่างชัดเจน ตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

2. การตัดสินใจแบบไม่เป็นโครงสร้าง (Unstructured Decision) บางครั้งเรียกว่าแบบไม่เคยกำหนดล่วงหน้ามาก่อน (Non-programmed) เป็นการตัดสินใจเกี่ยวกับปัญหาซึ่งมีรูปแบบไม่ชัดเจน หรือมีความซับซ้อน ไม่มีแนวทางในการแก้ปัญหาที่แน่นอน

3. การตัดสินใจแบบกึ่งโครงสร้าง (Semi-Structure Decision) เป็นการตัดสินใจแบบผสมระหว่างแบบโครงสร้าง และแบบไม่เป็นโครงสร้าง คือบางส่วนสามารถตัดสินใจแบบโครงสร้างได้ แต่บางส่วนไม่สามารถทำได้ โดยปัญหาแบบกึ่งโครงสร้างนี้จะใช้วิธีแก้ปัญหาแบบมาตรฐาน



ภาพประกอบ 3 ประเภทของการตัดสินใจ

(ที่มา : <http://www.surachet-r.net/is60/chapter7.pdf>)

2.1.3 ส่วนประกอบของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ

2.1.3.1 ส่วนจัดการข้อมูล (Data Management Subsystem)

ประกอบด้วยฐานข้อมูล ระบบจัดการฐานข้อมูล ส่วนสอบถามข้อมูล สารบัญข้อมูล ส่วนการดึงข้อมูลและข้อมูลที่ได้รับจากแหล่งต่าง ๆ ทั้งจากภายในและภายนอกองค์กร ระบบ DSS อาจเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลขององค์กรหรือคลังข้อมูล (Data Warehouse) เพื่อดึงหรือกรองข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสถานการณ์ในการตัดสินใจมาใช้

2.1.3.2 ส่วนจัดการโมเดลหรือส่วนจัดการแบบจำลอง (Model Management Subsystem)

ฐานแบบจำลอง (Model Base) จัดเก็บแบบจำลองต่าง ๆ ที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ เช่น แบบจำลองทางการเงิน ทางคณิตศาสตร์ ทางสถิติ หรือแบบจำลองเชิงปริมาณ เป็นต้น และมีระบบจัดการฐานแบบจำลอง ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ในการสร้างและจัดการแบบจำลองรวมถึงอำนวยความสะดวกให้ผู้ใช้สามารถเรียกใช้แบบจำลองที่เหมาะสม ตัวอย่างของแบบจำลอง มีดังนี้

1. แบบจำลองทางสถิติ (Statistic Model) ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลรูปแบบต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์ความถดถอย หรือการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ

2. แบบจำลองทางการเงิน (Financial Model) ใช้แสดงรายได้ รายจ่าย และกระแสการไหลของเงินสด ฯลฯ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนทางการเงิน

3. แบบจำลองเพื่อหาจุดเหมาะสมที่สุด (Optimization Model) เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตัวแปร ตามเงื่อนไขที่กำหนด เช่น การหาผลตอบแทนที่สูงที่สุดโดยคำนึงถึงค่าใช้จ่ายต่ำสุด

4. แบบจำลองสถานการณ์ (Simulation Model) เป็นตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ใช้การสร้างชุดของสมการเพื่อแทนสภาพของระบบที่จะทำการศึกษาแล้วทำการทดลองจากตัวแบบเพื่อศึกษาสิ่งที่จะเกิดขึ้นกับระบบ

2.1.3.3 ส่วนการจัดการโต้ตอบ (Dialogue Management Subsystem)

ส่วนจัดการโต้ตอบหรืออาจเรียกว่าส่วนจัดการประสานผู้ใช้ (User Interface Management) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างผู้ใช้กับระบบ เพื่อให้การติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้กับระบบเป็นไปด้วยความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน ผู้ใช้สามารถควบคุมข้อมูลนำเข้า และรูปแบบจำลองรวมอยู่ในการวิเคราะห์ได้ เช่น การใช้เมาส์, การใช้ระบบสัมผัสในการติดต่อกับระบบ, การแสดงข้อมูลในลักษณะหน้าต่าง (Window), การนำเสนอข้อมูลในรายละเอียดเจาะลึก (Drill-down) และการนำเสนอข้อมูลด้วยสื่อประสมหรือมัลติมีเดีย เช่น กราฟิก หรือ รูปภาพ

ชนิดหลักของส่วนต่อประสานผู้ใช้ ได้แก่ ส่วนต่อประสานแบบแสดงรายการเลือก (Menu-driven Interface) ส่วนต่อประสานโดยใช้คำสั่ง (Command-driven Interface) และส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (Graphical-user Interface)

สำหรับ DSS ชั้นสูง จะมีส่วนจัดการความรู้ (Knowledge-based Management Subsystem) เป็นอีกส่วนประกอบหนึ่ง

2.2 การจัดการน้ำ

การจัดการน้ำ คือการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในลุ่มน้ำ ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด กล่าวคือ การจัดการน้ำต้นทุน หรือเรียกว่าการจัดการด้านอุปทาน (Supply Management) และการจัดการด้านความต้องการสำหรับกิจกรรมการใช้น้ำ หรือที่เรียกว่าการจัดการด้านอุปสงค์ (Demand Management) ในการจัดการด้านอุปทาน จะต้องพยายามใช้น้ำต้นทุนที่มีอยู่ ทำให้เกิดประสิทธิภาพประกอบสูงสุด โดยพยายามใช้น้ำต้นทุนนั้น ให้สอดคล้องกับความต้องการใช้น้ำ ในปัจจุบันปริมาณทรัพยากรน้ำมีอยู่อย่างจำกัด ทำให้ต้องมีการวางแผนการจัดการอย่างรอบคอบ เพื่อไม่ทำให้เกิดวิกฤตการณ์น้ำ โดยมีงานหลายสาขาที่เกี่ยวข้อง เช่น ไฮดรอลิก การจัดการแหล่งน้ำ รวมทั้งด้าน

สิ่งแวดล้อม ร่วมกับการใช้ทรัพยากรด้านอื่น เช่น การใช้ที่ดิน แร่ธาตุ และการขยายตัวของชุมชน เป็นต้น เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด อนึ่งเพื่อป้องกันปัญหาทางด้านแหล่งน้ำ ที่จะส่งผลกระทบต่อปัญหาด้านอื่น ๆ เช่น กระบวนการผลิตอาหาร การเพาะปลูก การเลี้ยงสัตว์ และอุตสาหกรรมที่มีความจำเป็นต้องใช้น้ำเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งผลิตพลังงาน และรักษาสมดุลของสภาพสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ความต้องการน้ำที่มีมากขึ้น ทำให้ต้องมีการบริหารจัดการน้ำ เพื่ออุปโภค บริโภค มากขึ้น จากการเสด็จพระราชดำเนินไปเยี่ยมเยียนพสกนิกรนับตั้งแต่ทรงขึ้นครองราชย์ ทำให้ทรงตระหนักว่าภัยแล้ง และน้ำเพื่อการเกษตรและบริโภคอุปโภคเป็นปัญหาที่รุนแรงและสำคัญที่สุด การจัดการทรัพยากรน้ำและการพัฒนาแหล่งน้ำเพื่อการเพาะปลูกและบริโภคอุปโภค นับว่าเป็นงานที่มีความสำคัญ และมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับประชาชนส่วนใหญ่ของประเทศในการช่วยให้เกษตรกรทำการเพาะปลูกได้อย่างสมบูรณ์ตลอดปี ในปัจจุบันพื้นที่การเพาะปลูกส่วนใหญ่ทุกภาคของประเทศเป็นพื้นที่เพาะปลูกนอกเขตชลประทาน ซึ่งต้องอาศัยเพียงน้ำฝน และน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติเป็นหลัก ทำให้พืชได้รับน้ำไม่สม่ำเสมอตามที่ต้องการ เป็นผลให้ผลผลิตที่ได้รับไม่เต็มที่ควร พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ทรงใฝ่พระราชหฤทัยเกี่ยวกับการจัดการพัฒนาแหล่งน้ำเป็นอย่างยิ่ง มีพระราชดำริน้ำคือปัจจัยสำคัญต่อมนุษย์และบรรดาสสิ่งมีชีวิตอย่างถ่องแท้ ดังพระราชดำรัส ณ สวนจิตรลดา เมื่อวันที่ 17 มีนาคม พ.ศ. 2529 ความตอนหนึ่งว่า " หลักสำคัญว่าต้องมีน้ำบริโภค น้ำใช้น้ำเพื่อการเพาะปลูก เพราะว่าชีวิตอยู่ที่นั่น ถ้ามีน้ำคนอยู่ได้ ถ้าไม่มีน้ำ คนอยู่ไม่ได้ ไม่มีไฟฟ้าคนอยู่ได้ แต่ถ้ามีไฟฟ้าไม่มีน้ำคนอยู่ไม่ได้ " ในการจัดการทรัพยากรน้ำนั้นทรงมุ่งขจัดปัญหาความแห้งแล้งอันเนื่องมาจากสภาพของป่าไม้ต้นน้ำเสื่อมโทรม ลักษณะดินเป็นดินปนทราย หรือการขาดแหล่งน้ำจืด การจัดการทรัพยากรน้ำโดยการพัฒนาแหล่งน้ำอันเนื่องมาจากพระราชดำรินั้น มีหลักและวิธีการที่สำคัญ ๆ คือ การพัฒนาแหล่งน้ำจะเป็นรูปแบบใด ต้องเหมาะสมกับรายละเอียดสภาพภูมิประเทศแต่ละท้องที่เสมอ และการพัฒนาแหล่งน้ำต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมในด้านเศรษฐกิจ และสังคมของท้องถิ่น หลีกเลี่ยงการเข้าไปสร้างปัญหาความเดือดร้อนให้กับคนกลุ่มหนึ่ง โดยสร้างประโยชน์ให้กับคนอีกกลุ่มหนึ่ง ไม่ว่าประโยชน์ทางด้านเศรษฐกิจเกี่ยวกับการลงทุนนั้นจะมีความเหมาะสมเพียงใดก็ตาม ด้วยเหตุนี้การทำงานโครงการพัฒนาแหล่งน้ำทุกแห่งจึงพระราชทานพระราชดำริไว้ว่า ราษฎรในหมู่บ้าน ซึ่งได้รับประโยชน์จะต้องดำเนินการแก้ไขปัญหาเรื่องที่ดิน โดยจัดการช่วยเหลือผู้ที่เสียประโยชน์ตามความเหมาะสมที่จะตกลงกันเอง เพื่อให้ทางราชการสามารถเข้าไปใช้ที่ดินทำการก่อสร้างได้ โดยไม่ต้องจัดซื้อที่ดิน ซึ่งเป็นพระบรมราโชบายที่มุ่งหวังให้ราษฎรมีส่วน

ร่วมกับรัฐบาล และช่วยเหลือเกื้อกูลกันภายในสังคมของตนเอง และมีความห่วงแหน ที่จะต้องดูแลบำรุงรักษาสิ่งก่อสร้างนั้นต่อไป

การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในลุ่มน้ำ ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จำเป็นต้องจัดหาทั้งระบบซึ่งการบริหารทรัพยากรน้ำไม่ใช่เป็นเรื่องที่ทำกันวันต่อวันหรือปีต่อปี แต่ต้องเป็นการบริหารระยะยาวหลายปี มีการวางแผนล่วงหน้า โดยมีหลักการกระจายน้ำจากพื้นที่ส่วนเกินไปยังพื้นที่ขาดแคลนในจังหวะเวลาที่พอดี ซึ่งก็คือ ต้องมีฐานข้อมูลปริมาณน้ำและความต้องการใช้น้ำในอดีตและปัจจุบัน จำแนกตามพื้นที่ ฤดูกาล ลักษณะการใช้ และผู้ใช้อย่างละเอียด รวมทั้งมีการคำนวณถึงภาวะในอนาคต แล้วมีโครงการต่าง ๆ มารองรับ

การจัดการน้ำต้นทุน หรือเรียกว่าการจัดการด้านอุปทาน (Supply Management) และการจัดการด้านความต้องการสำหรับกิจกรรมการใช้น้ำ หรือที่เรียกว่าการจัดการด้านอุปสงค์ (Demand Management)

2.2.1 การจัดการด้านน้ำต้นทุน

การจัดการบริหารน้ำต้นทุนจะต้องพยายามใช้น้ำต้นทุนที่มีอยู่ ทำให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงสุด โดยพยายามใช้น้ำต้นทุนนั้น ให้สอดคล้องกับความต้องการใช้น้ำ อย่างไรก็ตามถ้าขนาดของต้นทุนไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้น้ำจะต้องพยายามหาหาน้ำมาเพิ่มเติมให้แก่ลุ่มน้ำก่อน เช่น การผลิตฝนหลวงเพื่อปริมาณน้ำฝนและน้ำท่าในลุ่มน้ำ แต่การเพิ่มปริมาณน้ำให้แก่ลุ่มน้ำโดยการทำฝนหลวง จะมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เฉพาะในกรณีของการขาดแคลนน้ำ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากฝนทิ้งช่วงในฤดูฝนเท่านั้น หรือการสร้างอ่างเก็บน้ำและระบบท่อเพิ่มเติมในพื้นที่ที่จำเป็น นอกจากนี้ยังหาน้ำต้นทุนได้จากแหล่งน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นแหล่งน้ำขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะทำได้เฉพาะพื้นที่ที่น้ำใต้ดินมีคุณภาพเหมาะสมเท่านั้น หรือการจัดตั้งโครงการธนาคารน้ำเป็นการรวบรวมเก็บกักน้ำต้นทุนจากแหล่งน้ำธรรมชาติตามศักยภาพของพื้นที่ไม่ว่าจะเป็นแหล่งน้ำจากน้ำฝน แหล่งน้ำจากน้ำผิวดิน แหล่งน้ำจากน้ำใต้ดิน เพื่อเก็บออมสะสมไว้ใช้ประโยชน์ โดยมีการบริหารจัดการร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นธรรมและยั่งยืน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการจัดการด้านอุปทานในที่นี้ก็คือ การจัดการอ่างเก็บน้ำ แต่ปัจจุบัน การบริหารจัดการน้ำถูกกระจายไปสู่หน่วยงานต่าง ๆ จำนวนมากหลายกรมหลายกระทรวง โดยไม่มีฐานข้อมูลที่เป็นเอกภาพ ไม่มีใครรู้จริงว่า ในแต่ละปี ประเทศไทยมีปริมาณน้ำท่าเท่าใด กระจายในพื้นที่ใดบ้าง ลักษณะการใช้และผู้ใช้เป็นอย่างไร ในปีหน้าและปีต่อ ๆ ไปแต่ละพื้นที่จะมีน้ำพอใช้หรือไม่ แล้วควรจะมีโครงการผันน้ำอย่างไรและที่ใดบ้าง เป็นต้น

ดังนั้นการใช้ทรัพยากรน้ำต้นทุนที่มีอยู่และการเพิ่มปริมาณน้ำต้นทุนให้แก่แหล่งน้ำธรรมชาติและอ่างเก็บน้ำที่ได้ก่อสร้างไว้แล้วให้เกิดประโยชน์สูงสุด นับเป็นอีกหนทางหนึ่งในการพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่แหล่งน้ำที่ควรจะดำเนินการคู่ขนานกันไป นอกจากนี้การกระจายน้ำไปยังพื้นที่ต่าง ๆ ให้แก่ราษฎรอย่างทั่วถึงนับเป็นความจำเป็นอย่างหนึ่งที่จะทำให้ราษฎรในพื้นที่ต่าง ๆ มีโอกาสได้มีน้ำใช้อย่างเพียงพออย่างน้อยเพื่อการอุปโภคบริโภคตลอดทั้งปี อันจะเป็นผลให้ราษฎรมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น

2.2.2 การจัดการด้านความต้องการน้ำ

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการดำรงชีวิต ทั้งเพื่อการอุปโภคบริโภคและเพื่อการเพาะปลูก ปริมาณน้ำที่มีอยู่ตามแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีอยู่เฉพาะในช่วงฤดูฝน แม้ว่าทางหน่วยราชการต่าง ๆ จะได้ก่อสร้างอ่างเก็บน้ำขนาดต่าง ๆ กระจายอยู่ตามพื้นที่ที่มีความเหมาะสม เพื่อเก็บกักน้ำไว้ใช้ในฤดูแล้งให้มากที่สุดก็ตามก็ยังมีน้ำไม่เพียงพอต่อความต้องการ ซึ่งนับวันจะมีความต้องการน้ำเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วจากจำนวนราษฎรที่มากขึ้น และน้ำซึ่งเคยเป็นทรัพยากรที่คิดกันว่ามีมากมายในประเทศไทย ขณะนี้กำลังกลายเป็นทรัพยากรที่มีจำกัดและต้องแย่งชิงกัน ปัญหาเกิดจากความต้องการน้ำของกลุ่มต่าง ๆ ที่เพิ่มมากขึ้นในขณะที่การใช้น้ำยังขาดประสิทธิภาพ ปริมาณน้ำจืดที่หมุนเวียนในกระบวนการอุทกวิทยาตามธรรมชาติลดน้อยลงเนื่องจากการตัดไม้ทำลายป่า น้ำในบางส่วนก็เสื่อมคุณภาพจนยากต่อการนำมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากน้ำเสียจากชุมชนและอุตสาหกรรมตลอดจนสารเคมี (ประกอบ และ ธิรัตน์., 2540)

กลยุทธ์และมาตรการเพื่อการจัดหาน้ำให้เพียงพอต่อความต้องการและควบคุมการใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ เสมอภาค และยุติธรรม จึงมีความสำคัญยิ่งต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ นอกจากนี้การขจัดความขัดแย้งและการประสานการใช้น้ำระหว่างกลุ่มผลประโยชน์ต่าง ๆ อย่างยุติธรรม ยังเป็นฐานรากที่สำคัญสำหรับความมั่นคงของชุมชนและประเทศ

ในปัจจุบัน ชุมชนที่มีความเจริญและมีประชากรหนาแน่นส่วนใหญ่จะอยู่ในเขตพื้นที่ลุ่มที่มีความอุดมสมบูรณ์และน้ำเป็นปัจจัยสำคัญเพื่อการผลิตทางการเกษตร อุตสาหกรรม การคมนาคม ตลอดจนการท่องเที่ยวพักผ่อนหย่อนใจ และกิจกรรมอื่น ๆ ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์ เพื่อหาวิธีที่รัดกุม ในการวางแผนการดำเนินงานอ่างเก็บน้ำแบบรายเดือน สำหรับการใช้ที่ดินในปัจจุบัน และแนวโน้มการใช้ที่ดินในอนาคต และเสนอแผนการผันน้ำ ที่เหมาะสมเมื่อความต้องการใช้น้ำ และปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเปลี่ยนไป ดังนั้นจึงควรมีการวางแผนการเพื่อรับมือและป้องกัน

วิกฤตการณ์การขาดแคลนน้ำจากสาเหตุต่าง ๆ เช่น ความต้องการน้ำใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ความสมดุลของทรัพยากรน้ำระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝนไม่สมดุล รวมถึงการใช้น้ำในกิจกรรมต่าง ๆ ที่ขาดแผนการใช้ที่รัดกุมและเหมาะสม รวมทั้งขาดองค์กรระดับชาติที่จะเข้ามาบริหารจัดการแหล่งน้ำ ตลอดจนแหล่งน้ำที่มีอยู่ในปัจจุบันมีสภาพเสื่อมโทรม เน่าเสีย คุณภาพไม่เหมาะสม ไม่สามารถนำมาใช้ได้ จากปัญหาที่กล่าวมานี้ เกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น

2.1 สภาพแหล่งต้นน้ำลำธารถูกทำลาย การบุกรุกทำลายแหล่งน้ำ ส่งผลให้ พื้นที่ต้น

น้ำลำธารอันเป็นแหล่งกำเนิดน้ำ ไม่สามารถดูดซับหรือชะลอน้ำไว้ในดิน เมื่อเกิดฝนตกหนักจึงทำให้น้ำไหลบ่าลงมาท่วมพื้นที่ตอนล่างอย่างรวดเร็วและรุนแรง

2.2 สภาพน้ำท่า เนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่ตกชุก ในทุก ๆ ภาคของประเทสมิ ปริมาณน้อยกว่าเกณฑ์เฉลี่ย โดยเฉพาะในภาคเหนือ ภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้ปริมาณน้ำท่ามีปริมาณลดลงไปด้วย

2.3 การใช้น้ำและความต้องการเพิ่มขึ้นทุกกลุ่มน้ำ กิจกรรมต่าง ๆ ทั้งทาง อุตสาหกรรม เกษตรกรรม อุปโภคและบริโภค การท่องเที่ยว ตลอดจนการพัฒนาด้านสังคมและวัฒนธรรมล้วนเป็นกิจกรรมที่ก่อให้เกิดความต้องการใช้น้ำเพิ่มมากขึ้น

2.4 การบุกรุกทำลายพื้นที่ชุ่มน้ำ การขยายตัวของบ้านจัดสรรโรงงานอุตสาหกรรม การพัฒนาการคมนาคมขนส่ง โดยขาดการวางแผนก่อให้เกิดการบุกรุกทำลายพื้นที่ชุ่มน้ำหรืออาจทำให้มีการปนเปื้อนของสารพิษลงสู่แหล่งน้ำ เป็นต้น

2.3 การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operations)

การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำหมายถึง การเก็บกักน้ำในอ่างเก็บน้ำและการส่งน้ำไปใช้ในวัตถุประสงค์ต่าง ๆ โดยมีการวางแผนไว้ล่วงหน้า ว่าควรเก็บกักและส่งน้ำในแต่ละเดือนเท่าใด โดย การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ จะดำเนินการตามแผนที่วางไว้ หากสภาพที่คาดการณ์ไว้มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำท่าและการใช้น้ำด้านต่าง ๆ ก็จะมีการปฏิบัติการแตกต่างกันออกไปจากแผนที่วางไว้เพื่อลดสถานการณ์การขาดแคลนน้ำหรือการน้ำไหลล้น

2.3.1 ประเภทของอ่างเก็บน้ำ

อ่างเก็บน้ำถ้าแบ่งตามวัตถุประสงค์ของการใช้น้ำจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ อ่างเก็บน้ำเอกประสงค์ (Single purpose reservoir) และอ่างเก็บน้ำเอนกประสงค์ (multipurpose reservoir)

1. อ่างเก็บน้ำเอกประสงค์

เป็นอ่างเก็บน้ำที่ทำหน้าที่เก็บน้ำไว้ใช้สำหรับวัตถุประสงค์เพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งเท่านั้น เช่น การเกษตร หรือการอุปโภค-บริโภค หรือการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งการบริหารจัดการน้ำในอ่างเก็บน้ำจะง่ายที่สุด เช่น อ่างเก็บน้ำสิรินธรมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว อ่างเก็บน้ำลำประเทวซึ่งมีไว้เพื่อทำการชลประทาน เป็นต้น

1.2 อ่างเก็บน้ำเอนกประสงค์

เป็นอ่างเก็บน้ำที่ทำหน้าที่เก็บน้ำไว้ใช้สำหรับหลายวัตถุประสงค์พร้อมกัน เช่น การเกษตร การอุปโภค-บริโภค การอุตสาหกรรม การคมนาคม เป็นต้น ดังนั้นการบริหารจัดการน้ำย่อมมีความสลับซับซ้อนและยุ่งยากมากขึ้นกว่าอ่างเก็บน้ำเอกประสงค์ เช่น อ่างเก็บน้ำภูมิพล อ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ ที่สร้างขึ้นมาเพื่อวัตถุประสงค์หลายอย่าง เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้า การชลประทาน การเกษตร และอุตสาหกรรมบางประเภท

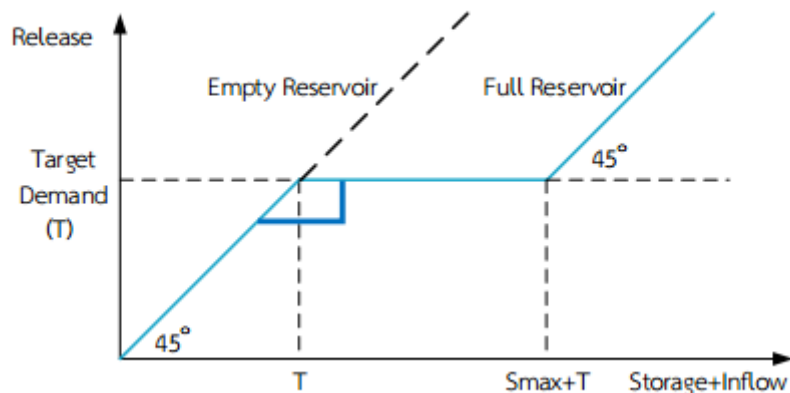
2.3.2 หลักการเกณฑ์การปล่อยน้ำของอ่างเก็บน้ำ

เกณฑ์ในการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำรูปแบบต่าง ๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับใช้ปฏิบัติงานกับระบบอ่างเก็บน้ำโดยมีวัตถุประสงค์หลักก็เพื่อลดปริมาณการขาดน้ำที่คาดว่าจะเกิดขึ้นให้น้อยที่สุด ซึ่งเกณฑ์เหล่านี้ อาจอธิบายแนวคิดในการปล่อยน้ำหรือแสดงในรูปของระดับน้ำเก็บกักเป้าหมายของอ่างเก็บน้ำทั้งระบบเพื่อหลีกเลี่ยงสถานการณ์ที่จำเป็นต้องปล่อยน้ำส่วนเกินผ่านทางระบายน้ำล้นออกไป นอกจากนี้ ยังสามารถลดความรุนแรงของการขาดน้ำในระบบให้น้อยลงได้ด้วยการควบคุมของปริมาณน้ำที่ไหลล้นอ่างให้เกิดขึ้นน้อยที่สุดสำหรับเก็บกักน้ำบางส่วนไว้ในระบบนั่นเอง ด้วยเหตุนี้หลักการเกณฑ์การปล่อยน้ำของอ่างเก็บน้ำจึงถูกพัฒนามาใช้งานอย่างหลากหลายเช่น

2.3.2.1 เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating Policy)

เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating Policy, SOP) เป็นเกณฑ์การปล่อยน้ำที่ง่ายที่สุด บางครั้งอาจเรียกว่าเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบเชิงเส้นมาตรฐาน (Standard Linear Operating Policy, SLOP) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.4 โดยในช่วงที่ปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำมีน้อยกว่าปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมาย (Target Demand) ปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ในอ่างจะถูกปล่อยไปใช้ทั้งหมดในขณะที่หากปริมาณน้ำเก็บกักในอ่างเก็บน้ำมีมากกว่าปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายแต่น้อยกว่าผลรวมของปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายและปริมาณน้ำเก็บกักสูงสุด จะทำการปล่อยน้ำเท่ากับความต้องการน้ำเป้าหมาย สำหรับปริมาณน้ำส่วนเกินจะเก็บกักไว้ในอ่างเก็บน้ำและในกรณีที่ปล่อยน้ำเท่ากับความต้องการน้ำเป้าหมายไปแล้ว แต่ไม่มีปริมาณอ่างมีพื้นที่ไม่เพียงพอที่จะเก็บกักน้ำส่วนเกินนี้ไว้ ปริมาณน้ำส่วนที่เกินความจุเก็บกักสูงสุดของอ่างเก็บน้ำจำเป็นต้องปล่อยออกไปในท้ายที่สุด หรือสามารถเขียนในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ (Jain & Singh, 2003)

การปล่อยน้ำที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่างเส้นแสดงสถานะว่างและสถานะของน้ำเต็มความจุของอ่างเก็บน้ำอาจกล่าวได้ว่าการกำหนดการปล่อยน้ำในช่วงเวลาใด ๆ ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐานจะไม่สัมพันธ์กับการกำหนดการปล่อยน้ำในช่วงเวลาอื่น ๆ เลย หรือเป็นแนวทางการปล่อยน้ำที่มีลักษณะแตกต่างกันไปตามช่วงเวลา ถึงแม้ว่านโยบายนี้จะถูกนำมาใช้ในการศึกษาเพื่อวางแผนการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ อย่างไรก็ตามเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐานไม่เหมาะสมสำหรับการปฏิบัติการระยะสั้นวันต่อวัน และอาจจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนแนวทางปฏิบัติเพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ถ้าปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ในอ่างเก็บน้ำในขณะนั้นน้อยกว่าความต้องการน้ำในปัจจุบันและอีก 3 เดือนข้างหน้า ผู้ปฏิบัติงานอาจจำกัดปริมาณน้ำที่ปล่อยให้ลดลงจากความต้องการน้ำเป้าหมายเดิมในช่วงเวลาดังกล่าวได้ ทั้งนี้การจำกัดปริมาณน้ำที่ปล่อยให้ได้จะขึ้นอยู่กับสถานะของน้ำในอ่างเก็บน้ำนั้น ๆ ด้วยหรืออาจกำหนดในลักษณะเป็นระดับน้ำหลาย ๆ ชั้นโดยการนำเทคนิคการจำลองระบบมาประยุกต์ใช้เพื่อหาจำนวนชั้นระดับน้ำที่เหมาะสมเพื่อจำกัดปริมาณน้ำที่ปล่อยได้จากอ่างตามระดับน้ำเก็บกักที่มีในอ่างหรือเรียกว่า เกณฑ์การจำกัดการปล่อยน้ำ (Rationing Rule) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.12



ภาพประกอบ 4 เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน

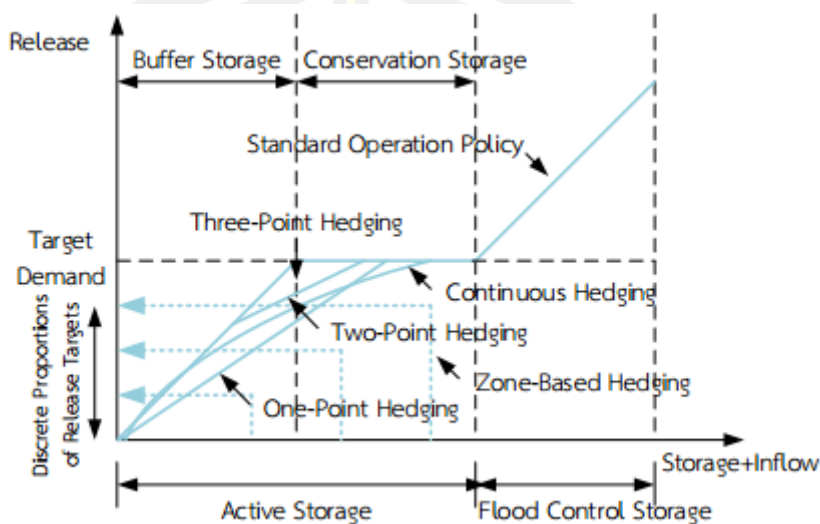
ที่มา : Jain & Singh (2003)

2.3.2.2 เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging (Hedging Rules)

เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging น้ำเสนอเกณฑ์การปล่อยน้ำที่พยายามลดการส่งน้ำในบางช่วงเวลาเพื่อเก็บกักน้ำไว้ใช้ในเวลาลัดไป แม้ว่าปริมาณน้ำเก็บกักที่มีอยู่ในอ่างจะสามารถตอบสนองต่อปริมาณความต้องการน้ำเป้าหมายได้อย่างเต็มศักยภาพก็ตามอาจกล่าวได้ว่าเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging เป็นความพยายามที่จะลดปัญหาการขาดน้ำอย่างรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต ด้วยการกระจายการขาดน้ำในเวลาปัจจุบันล่วงหน้าซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับระบบที่มีความต้องการใช้น้ำสูง แต่ประสบปัญหาในด้านความผันแปรของข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ (Neelakantan & Pundarikanthan, 2000) โดยทั่วไปแล้วเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging จะปรากฏในรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 5 (Draper & Lund, 2004) ดังนี้

1. One-Point Hedging การปล่อยน้ำจะเริ่มต้นจากจุดกำเนิดและจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเส้นตรงที่มีความชันน้อยกว่า 1 จนกระทั่งไปตัดเส้นระดับเป้าหมายของการปล่อยน้ำ
2. Two-Point Hedging เป็นเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงตัดผ่านจุดตัด 2 จุด คือ จุดแรกจะอยู่สูงกว่าจุดกำเนิดขึ้นไปและอยู่บนเส้นนโยบายการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบมาตรฐานในช่วงที่เกิดการขาดน้ำและจุดที่สองจะเป็นจุดตัดที่อยู่บนเส้นระดับเป้าหมายของการปล่อยน้ำโดยเส้นตรงที่ตัดผ่านนี้จะมีค่าความชันน้อยกว่า 1
3. Three-Point Hedging เป็นเกณฑ์ที่เพิ่มจุดตรงกลางขึ้นอีกหนึ่งจุดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Two-Point Hedging
4. Continuous Hedging สัดส่วนความชันของเกณฑ์การปฏิบัติอ่างเก็บน้ำในรูปแบบนี้จะมีลักษณะต่อเนื่อง

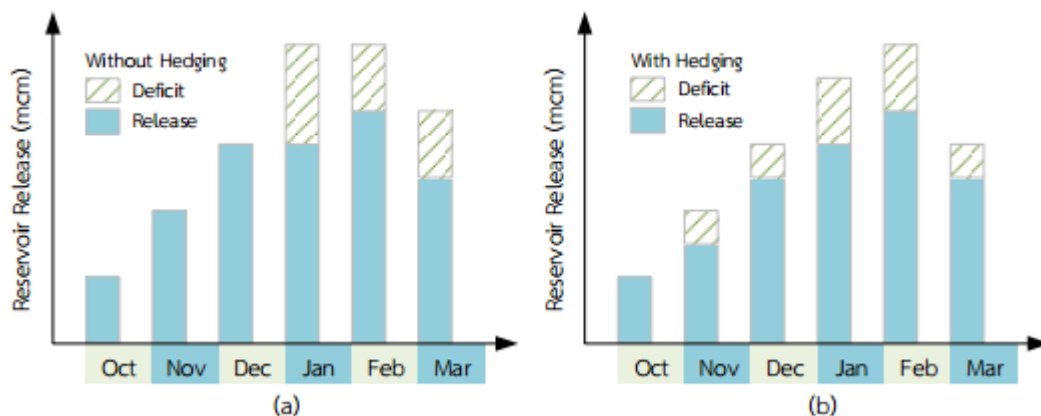
5. Multiple/Zone-Based Hedging กำหนดสัดส่วนการปล่อยน้ำในแต่ละโซน
 เก็บกักเทียบกับปริมาณความต้องการน้ำตามเป้าหมายของระบบในลักษณะของสัดส่วนการปล่อยน้ำ
 แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Proportion)



ภาพประกอบ 5 เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging

ที่มา : Draper & Lund (2004)

วัตถุประสงค์หลักของเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging ก็คือการกระจายการขาดน้ำล่วงหน้าอย่างสม่ำเสมอเพื่อลดความรุนแรงของการขาดน้ำ ณ เวลาปัจจุบันลง กล่าวคือยอมที่จะให้เกิดการขาดน้ำครั้งละน้อย ๆ ได้เพื่อลดโอกาสความน่าจะเป็นของการขาดน้ำรุนแรงหรือผลิตพลังงานไฟฟ้าได้น้อยลง ดังแสดงผลกระทบของการปล่อยน้ำเพื่อการชลประทานและจัดหาน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคแบบไม่ใช้และใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging ในภาพประกอบ 2.6 จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำที่ปล่อยทั้งหมดจากอ่างเก็บน้ำและปริมาณการขาดน้ำทั้งหมดยังคงมีค่าเท่ากัน อย่างไรก็ตามผลจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบอื่นโดยไม่ใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging ทำให้ปริมาณการขาดน้ำสูงสุดเกิดขึ้นในเดือนมกราคม รองลงมาเกิดขึ้นในเดือนกุมภาพันธ์และมีนาคม ซึ่งผู้ปฏิบัติงานสามารถกระจายการขาดน้ำล่วงหน้าในเดือนพฤศจิกายนและธันวาคมโดยอาศัยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging ส่งผลให้ความรุนแรงของการขาดน้ำในเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์ลดความเสียหายน้อยลง ถึงแม้ว่าปริมาณการขาดน้ำทั้งหมดยังคงเท่าเดิมก็ตาม (Jain & Singh, 2003)



ภาพประกอบ 6 แนวทางการปล่อยน้ำด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging

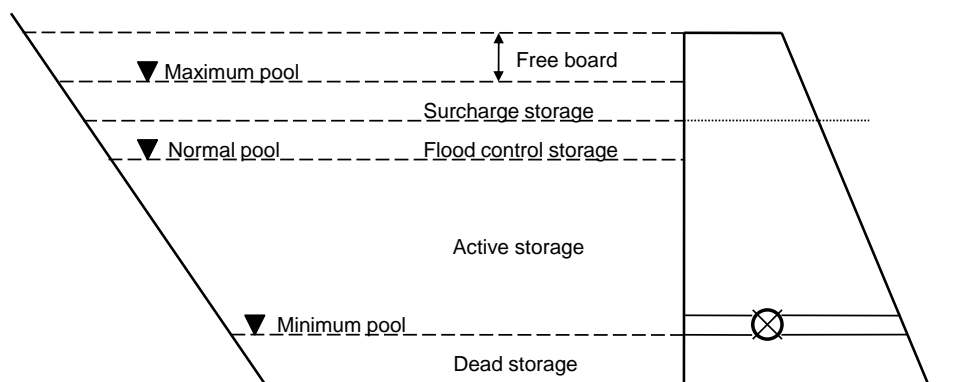
ที่มา : Jain & Singh (2003)

2.3.3 หลักการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำด้วยโคงควบคุม

อ่างเก็บน้ำ คือ กลไกที่มนุษย์สร้างขึ้นมา เพื่อทำหน้าที่ควบคุมปริมาณน้ำที่ไหลมาตามธรรมชาติ เพื่อวัตถุประสงค์อย่างใดอย่างหนึ่ง (Single Purpose Reservoir) หรือหลายอย่าง (Multipurpose Reservoir) เช่น การชลประทาน การอุปโภค-บริโภค การผลิตไฟฟ้า การท่องเที่ยว การรักษาระบบนิเวศ เป็นต้นอ่างเก็บน้ำประกอบด้วย ตัวอ่างเก็บน้ำ ทางระบายน้ำล้น และอาคารทางออก

ตัวอ่างเก็บน้ำ เกิดจากการสร้างสันเขื่อนกั้นน้ำ ขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศ ชนิดและความสูงของเขื่อนเพิ่มขึ้นและเก็บกักน้ำเอาไว้ ตัวอ่างจะมีการเก็บกักในส่วนต่าง ๆ ซึ่งแสดงไว้ในภาพประกอบที่ 7 ดังนี้ ระดับต่ำสุด (Minimum Pool level) ระดับเก็บกักปกติ (Normal Pool level)

ระดับสูงสุด (Maximum level) และฟรีบอร์ด (Freeboard) ทางระบายน้ำล้นเป็นอาคารที่ทำหน้าที่ระบายน้ำส่วนเกินในยามที่คลื่นน้ำท่วมขนาดใหญ่เคลื่อนตัวผ่านอ่างเก็บน้ำ และอาคารทางออก เป็นอาคารที่ทำหน้าที่ควบคุมการปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำเพื่อนำไปใช้ในวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ความสัมพันธ์ระหว่างความจุและผลผลิตของอ่างเก็บน้ำ จะบอกให้รู้ว่าความจุของอ่างเก็บน้ำที่ต่างกันย่อมมีผลผลิตที่แตกต่างกันด้วย ดังนั้นผลผลิตของอ่างเก็บน้ำจึงเป็นปริมาณน้ำที่จะสามารถนำไปใช้จากอ่างเก็บน้ำได้ในช่วงระยะเวลาที่กำหนด โดยปกติช่วงระยะเวลาที่

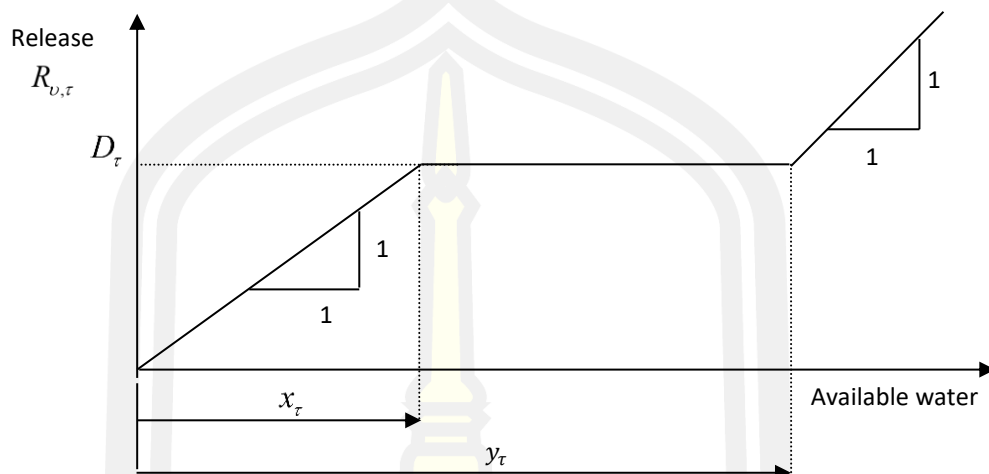


ภาพประกอบ 7 การแบ่งปริมาตรอ่างเก็บน้ำ

ที่มา: อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง (2551)

กำหนดคือ 1 ปี และผลผลิตของอ่างเก็บน้ำที่มีขนาดความจุที่กำหนดจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ ซึ่งจะมีการผันแปรในแต่ละปี ดังนั้นในการออกแบบเพื่อความปลอดภัยจึงใช้ผลผลิตที่แน่นอน (Firm Yield) เป็นผลผลิตที่น้อยที่สุด ซึ่งจะเป็นปริมาณน้ำที่มากที่สุดที่จะประกันได้ว่าสามารถนำไปใช้จากอ่างเก็บน้ำที่มีความจุที่กำหนดไว้ในช่วงเวลาที่วิกฤต (Critical Period) ซึ่งช่วงเวลาที่วิกฤตคือช่วงที่มีความแตกต่างของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำกับความต้องการใช้น้ำมากที่สุดซึ่งก็คือฤดูแล้ง ดังนั้นผลผลิตที่แน่นอนคือผลผลิตที่มีค่าน้อยที่สุดในช่วงอายุการใช้งานของอ่างเก็บน้ำ ดังนั้นในปีที่แล้งที่สุดสามารถประกันได้ว่าจะมีน้ำใช้อย่างเพียงพอสำหรับความต้องการน้ำประเภทต่าง ๆ และหากมีปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำมากจะให้ผลผลิตมากกว่าผลผลิตที่แน่นอน ซึ่งส่วนนั้นเรียกว่าผลผลิตรอง (Secondary Yield) สามารถจะนำไปใช้กับวัตถุประสงค์อื่นที่รองลงมาได้ และอ่างเก็บน้ำไม่ว่าจะสร้างให้มีความจุขนาดใหญ่ได้เพียงใด ผลผลิตที่แน่นอนก็จะไม่มากเกินกว่าผลผลิตที่เป็นไปได้สูงสุด (Maximum Possible Yield) ซึ่งผลผลิตที่เป็นไปได้สูงสุดจะเท่ากับปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเฉลี่ย (Mean Flow) หักด้วยการสูญเสียต่าง ๆ จากอ่างเก็บน้ำ หลังจากการก่อสร้างอ่างเก็บน้ำแล้วเสร็จ เพื่อที่จะให้บรรลุวัตถุประสงค์และใช้ประโยชน์อย่างเต็มศักยภาพ การบริหารจัดการน้ำจากอ่างเก็บน้ำจึงมีความสำคัญยิ่ง ดังนั้นเพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้ควบคุมการใช้อ่างเก็บน้ำและปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ดังที่กล่าวมา และก่อให้เกิดผลผลิตในเชิงเศรษฐศาสตร์มากที่สุด จึงจำเป็นต้องมีการวางกฎการปฏิบัติงานของอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operating Rules) ซึ่งกฎนี้จะใช้ในช่วงเวลาการปฏิบัติงานตามปกติ ไม่ใช่ช่วงหลังการก่อสร้างเสร็จใหม่ ๆ หรือช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงวัตถุประสงค์การใช้อ่างเก็บน้ำ ในการเริ่มต้นคำนวณสภาพสมมูลน้ำของแต่ละอ่างจากโค้งควบคุม จะกำหนดให้ปริมาตรเก็บกักเริ่มต้นของอ่างที่ระดับเต็มอ่างหรือ

ระดับเก็บกักสูงสุด (Full capacity) ส่วนปริมาณน้ำระบายจะหาได้ตามเกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน (Standard operating rule) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 8 และสมการที่ 2.1



ภาพประกอบ 8 เกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน
ที่มา: อนุศักดิ์ฤทธิ์ แข็งแรง (2551)

$$R_{v,\tau} = \begin{cases} D_{\tau} + W_{v,\tau} - y_{\tau}, & \text{for } W_{v,\tau} \geq y_{\tau} + D_{\tau} \\ D_{\tau}, & \text{for } x_{\tau} \leq W_{v,\tau} < y_{\tau} + D_{\tau} \\ D_{\tau} + W_{v,\tau} - x_{\tau}, & \text{for } x_{\tau} - D_{\tau} \leq W_{v,\tau} < x_{\tau} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.1)$$

เมื่อ $R_{v,\tau}$ คือปริมาณน้ำที่ระบายออกจากอ่างเก็บน้ำในช่วงปี v ของเดือน τ ($\tau = 1$ ถึง 12 แทนเดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม) D_{τ} เป็นความต้องการใช้น้ำทำอ่างของเดือน τ , x_{τ} เป็นขอบเขตล่างของโค้งควบคุมของเดือน τ , y_{τ} เป็นขอบเขตบนของโค้งควบคุมของเดือน τ และ $W_{v,\tau}$ เป็นปริมาณน้ำต้นทุนที่มีอยู่ของอ่างในเดือน τ จากนั้นคำนวณหาปริมาณน้ำต้นทุนที่มีอยู่ของอ่างเก็บน้ำในเดือนถัดไป โดยใช้หลักสมการสมดุลน้ำต่อไปนี้

$$W_{v,\tau+1} = S_{v,\tau} + Q_{v,\tau} - R_{v,\tau} - E_{\tau} - DS \quad (2.2)$$

เมื่อ $S_{v,\tau}$ เป็นปริมาณน้ำเก็บกักของอ่างเมื่อสิ้นสุดเดือน τ , $Q_{v,\tau}$ เป็นปริมาณน้ำท่ารายเดือนที่ไหลเข้าอ่างในเดือน τ ปี v , E_{τ} เป็นค่าการระเหยรายเดือนเฉลี่ยเดือน τ และ DS เป็นปริมาณเก็บกักที่ไม่ได้ใช้การ (dead storage) เมื่อทำการจำลองสภาพสมดุลน้ำโดยใช้แบบจำลองการ

เลียนแบบสภาพสมมูลน้ำที่สร้างขึ้นจนครบจำนวนปีที่มีข้อมูลแล้ว ก็จะได้ผลการจำลองเป็นสถานการณ์ขาดแคลนน้ำ และสถานการณ์ที่เกิดน้ำส่วนเกินได้ (ความถี่ ขนาด ช่วงเวลา) จากนั้นก็ทำการบันทึกข้อมูลดังกล่าวไว้สำหรับกฎการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ ซึ่งมีหลายแบบแต่จะบอกปริมาณน้ำที่ต้องปล่อยจากอ่างเก็บน้ำหรือไม่ก็บอกปริมาณน้ำที่ต้องการเก็บกักในอ่างเก็บน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ ของปีซึ่งเรียก โค้งกฎการปฏิบัติงาน (Rule Curves) และ หนึ่งในจำนวนที่มากมายของเครื่องมือที่มีประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำคือ โค้งกฎการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Operation Rule Curves) โค้งกฎการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำหรือบางครั้งเรียกว่าโค้งแนวปฏิบัติ (guide curves) ซึ่งจะได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางอุทกวิทยาในอดีต (historical data) ซึ่งมีเงื่อนไขต่าง ๆ กันร่วมกับความต้องการน้ำในการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำโดยเฉพาะอ่างเก็บน้ำแบบเอนกประสงค์นั้นจำเป็นต้องมีเกณฑ์ในการปฏิบัติงานแบบหลายเกณฑ์ร่วมกัน เช่น เกณฑ์ทางด้านสังคม เศรษฐศาสตร์และวิศวกรรมเป็นต้น ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์มีความยุติธรรมและประสิทธิภาพมากที่สุด หลังจากนั้นจึงสร้างเป็นกฎการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ และพัฒนาให้เป็นเครื่องมืออย่างง่ายในการปฏิบัติคือ โค้งกฎการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำซึ่งหลักการของการพัฒนาโค้งกฎการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ คือในช่วงฤดูฝนจะพร่องน้ำจากอ่างเก็บน้ำในแต่ละช่วงเวลาที่กำหนดในปริมาณเท่าใด เพื่อให้มีปริมาตรว่างสำหรับรับปริมาณน้ำหลากที่จะไหลเข้าอ่างเก็บน้ำโดยไม่เกิดการไหลล้นอ่าง ซึ่งจะก่อให้เกิดอุทกภัยในบริเวณด้านท้ายอ่างเก็บน้ำ หรือหากเกิดการไหลล้นอ่างเก็บน้ำก็ให้น้อยที่สุด และในขณะเดียวกันต้องรักษาปริมาณน้ำไว้ในอ่างเก็บน้ำสำหรับใช้ในฤดูแล้ง ซึ่งเส้นโค้งของกฎการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำเส้นนี้เรียกว่า Upper Rule Curve (URC) และในช่วงฤดูแล้งจะรักษาปริมาณน้ำไว้ในอ่างเก็บน้ำในแต่ละช่วงเวลาที่กำหนดไว้เท่าใดจึงจะลดความเสี่ยงต่อการเกิดน้ำแห้งอ่างเก็บน้ำ ซึ่งโค้งของกฎการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำเส้นนี้เรียกว่า Lower Rule Curve (LRC)

2.4 การปรับปรุงโค้งควบคุม

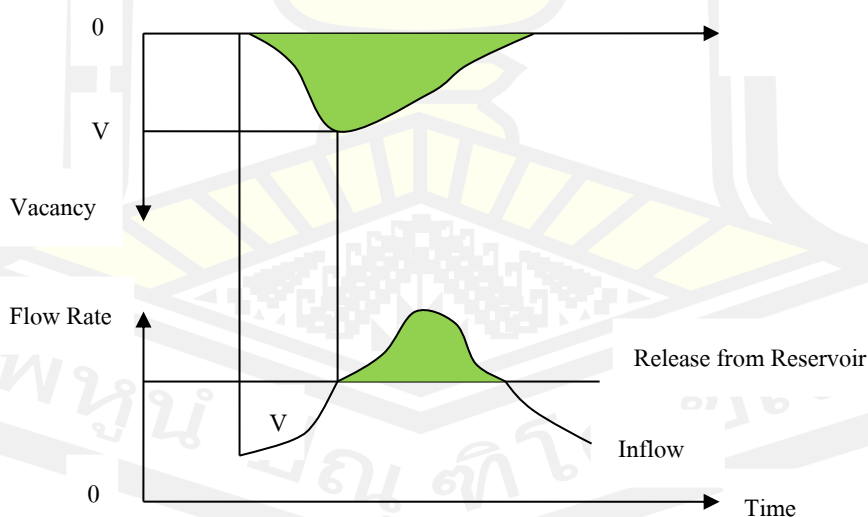
เทคนิคการหาเหมาะสมที่สุดสำหรับหาโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำ มีด้วยกันอยู่หลากหลายวิธีการศึกษาเลียนแบบ (Simulation) โปรแกรมเชิงพลวัต (Dynamic programming) เจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) ซึ่งรายละเอียดของแต่ละเทคนิคจะอธิบายดังต่อไปนี้

2.4.1 เทคนิคการหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีการศึกษาเลียนแบบ (SM)

วิธีการศึกษาเลียนแบบเป็นกระบวนการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบ จากกฎของการจัดการและควบคุม แต่ไม่สามารถประกันได้ว่ากฎของการจัดการและการควบคุมนั้นดีที่สุด ซึ่งในการพัฒนาโค้งของกฎการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำที่ใช้วิธีนี้ได้แก่

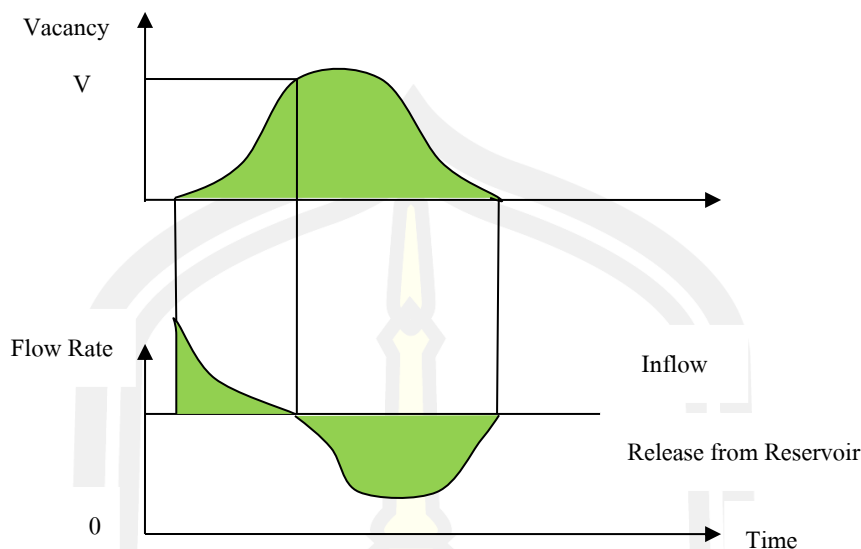
1) การวิเคราะห์ระบบอ่างเก็บน้ำสำหรับการเก็บกักน้ำ (Reservoir System Analysis for Conservation) เป็นการจำลองพฤติกรรมของระบบอ่างเก็บน้ำจากกฎต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ว่าจะผันน้ำหรือขาดน้ำในช่วงใด เท่าใด เป็นต้น ซึ่งสามารถนำผลการวิเคราะห์จากระบบอ่างเก็บน้ำมาสร้างโค้งกฎการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำได้ โดยทั่วไปก็คือโปรแกรม HEC-3

2) Vacancy-Minimum Storage Requirements Rule Curve จะอาศัยแนวคิดที่ว่า ปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำที่จะเต็มอ่างพอดีเมื่อสิ้นฤดูฝน ในขณะที่เดียวกันเมื่อสิ้นสุดฤดูแล้งปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำจะแห้งอ่างเก็บน้ำพอดี ดังนั้นในช่วงเริ่มต้นฤดูฝนจะต้องมีการพร่องน้ำในอ่างเก็บน้ำไว้เพื่อรองรับน้ำที่คาดว่าจะไหลเข้าอ่างเก็บน้ำตลอดช่วงฤดูฝนดังใน ภาพประกอบที่ 2.9 โดยปล่อยน้ำในอัตราที่เพิ่มขึ้น และในช่วงเริ่มต้นฤดูแล้งจะต้องสำรองน้ำในอ่างเก็บน้ำไว้เพียงพอกับความต้องการตลอดช่วงฤดูแล้งดังในภาพประกอบที่ 10



ภาพประกอบ 9 การพร่องน้ำในช่วงเริ่มต้นฤดูฝน

ที่มา: อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง (2551)



ภาพประกอบ 10 การสำรองน้ำในช่วงฤดูแล้ง
ที่มา: อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง (2551)

3) Standard Operating Policy เป็นเกณฑ์ที่ค่อนข้างง่าย โดยจะปล่อยน้ำให้เป็นไปตามความต้องการทุก ๆ ช่วงเวลา ดังนั้นหากปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำไม่เพียงพอตามความต้องการ ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำก็จะลดลงเรื่อย ๆ ขณะเดียวกันในช่วงฤดูฝนที่มีน้ำมาก ระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำก็จะเพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งปล่อยน้ำให้ไหลล้นอ่างเก็บน้ำต่อไปหรืออาจกล่าวได้ว่าเกณฑ์การปฏิบัติงานโดยวิธี Standard Operating Policy นี้เป็นเกณฑ์ที่มีศักยภาพมากในการลดประมาณการขาดน้ำทั้งหมด (Total deficit) ในช่วงเวลาที่พิจารณา

4) Probability Based Rule Curves เป็นวิธีที่ใช้หลักการของทฤษฎีความน่าจะเป็นเพื่อพิจารณาการเก็บกักและการระบายน้ำที่ความเสี่ยงต่าง ๆ โดยในฤดูน้ำหลากจะพิจารณาว่า จะรักษาระดับน้ำหรือปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำที่มากที่สุดที่จะทำให้ความเสี่ยงต่อการที่อ่างเก็บน้ำมีปริมาณไม่พอที่จะรับน้ำนองอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ในทางตรงข้ามฤดูแล้งจะพิจารณาว่า ควรจะรักษาระดับน้ำหรือปริมาณน้ำไว้เพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงต่อการขาดแคลนน้ำในอนาคต หรือความเสี่ยงต่อการขาดแคลนน้ำในอนาคตอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5) Optimization เป็นกระบวนการหาคำตอบที่ดีที่สุด จากการจัดการตามวัตถุประสงค์ (objectives) และข้อจำกัด (Constraint) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้เพราะสามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ตามวัตถุประสงค์และข้อจำกัดต่าง ๆ แต่อย่างไรก็ตามการใช้วิธีการหาคำตอบที่ดี

ที่สุดจำเป็นที่จะต้องจำลองระบบเสียก่อนซึ่งในการพัฒนาโด่งกฎการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำที่ใช้วิธีนี้ได้แก่ Chance-Constrained Model with Linear Decision Rule เป็นการพัฒนากฎการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำด้วยแบบจำลอง โอกาส-ข้อจำกัด ร่วมกับกฎการตัดสินใจเชิงเส้น

2.4.2 เทคนิคการหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีโปรแกรมเชิงพลวัต

วิธีการศึกษาการหาค่าเหมาะสมด้วยวิธีโปรแกรมเชิงพลวัตกับระบบทรัพยากรน้ำได้นำมาใช้กันอย่างกว้างขวางซึ่งเป็นรหัสเฉพาะปัญหา โดยโปรแกรมเชิงพลวัตจะแปลงปัญหาต่อเนื่องหรือการตัดสินใจหลายเป้าหมายซึ่งมีตัวแปรตัดสินใจที่สัมพันธ์กันไปสู่อนุกรมของปัญหาเป้าหมายเดียว โดยแต่ละปัญหาจะมีตัวแปรตัดสินใจตัวแปรเดียวหรือน้อยตัว หรืออีกนัยหนึ่งเทคนิคนี้ จะแตกตัวปัญหาตัวแปรตัดสินใจ N ไปสู่การแบ่ง N ตัว แต่เป็นการตัดสินใจเดียวของของปัญหาย่อย ที่เรียกว่าวิธีการแตกสลาย (Decomposition) ซึ่งเป็นประโยชน์มากในการแก้ปัญหา ซึ่งมีความสลับซับซ้อนโดยปัญหาขนาดใหญ่ นั้นไปสู่อนุกรมของปัญหาย่อยซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเพื่อหาผลลัพธ์ของปัญหาใหญ่ทั้งหมดซึ่งคุณลักษณะการดำเนินงานของโปรแกรมเชิงพลวัตมีดังต่อไปนี้

- 1) ปัญหาจะแบ่งออกเป็นขั้นตอนโดยมีตัวแปรตัดสินใจอยู่ทุกขั้นตอน
- 2) แต่ละขั้นตอนมีจำนวนของเป้าหมายเกี่ยวข้องกับมัน
- 3) ผลการตัดสินใจแต่ละขั้นตอนจะมีผลตอบแทนโดยขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการตอบแทนของขั้นตอน และโอนถ่ายจากตัวแปรเป้าหมายปัจจุบันไปสู่ตัวแปรเป้าหมายขั้นถัดไป โดยใช้ฟังก์ชันการโอนถ่ายเป้าหมาย
- 4) กำหนดเป้าหมายปัจจุบัน นโยบายความเหมาะสมของขั้นตอนที่เหลืออยู่เป็นอิสระของนโยบายขั้นตอนก่อน หลักการนี้เรียกว่าหลักการของ Bellman's ในการหาความเหมาะสมโดยทำหน้าที่เป็นหลักใหญ่ของโปรแกรมเชิงพลวัต
- 5) การหาผลลัพธ์เริ่มโดยการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมของแต่ละเป้าหมายที่เป็นไปได้ในขั้นตอนสุดท้ายเรียกว่าการย้อนกลับทางหลังหรือในขั้นตอนแรกเรียกว่าการย้ายไปข้างหน้า ขั้นตอนไปข้างหน้าคำนวณจากขั้นตอนแรกไปสู่ขั้นตอนสุดท้าย ขณะเดียวกันการคำนวณย้อนกลับเริ่มจากขั้นตอนสุดท้ายไปสู่ขั้นตอนแรก

6) ความสัมพันธ์ของ Recursive ชี้ให้เห็นถึงนโยบายการหาความเหมาะสมของแต่ละเป้าหมายของขั้นตอน n ใด ๆ ซึ่งสามารถพัฒนาได้ กำหนดนโยบายเหมาะสมของแต่ละเป้าหมายที่ขั้นตอนถัดไป $n + 1$

ถึงแม้ว่าขบวนการของโปรแกรมเชิงพลวัตจะมีข้อดีหลายอย่างในการหาผลลัพธ์ของปัญหาทรัพยากรน้ำโดยเฉพาะการวิเคราะห์ที่เกี่ยวกับขบวนการหลาย ๆ ขั้นตอนจะใช้ได้ดีเป็นพิเศษแต่ยังมีข้อเสียอยู่ 2 ข้อใหญ่ คือ หน่วยความจำในคอมพิวเตอร์และเวลาที่ต้องการ ข้อเสียสองข้อนี้จะมีผลสำคัญเป็นพิเศษภายใต้ 3 สถานการณ์ คือ เมื่อมีจำนวนของตัวแปรเป้าหมายมีมาก เมื่อโปรแกรมเชิงพลวัตประยุกต์ใช้กับแพชชั่นไม่ต่อเนื่อง (Discrete fashion) ต่อปริภูมิเป้าหมายต่อเนื่องกับปัญหาที่เกี่ยวข้องจะมีความยุ่งยากในการหาผลลัพธ์ของความเหมาะสมจริง และการเพิ่มจำนวนของความไม่ต่อเนื่อง (Discretization) หรือตัวแปรเป้าหมายเพิ่มจำนวนการประเมินของสูตรทำให้หน่วยความจำในคอมพิวเตอร์ต่อขั้นตอนปัญหาต้องใช้เวลาในการประเมินมากขึ้นเพราะว่าการเพิ่มหน่วยความจำตามความต้องการของปัญหาในคอมพิวเตอร์มีผลทำให้เกิดความจำที่มีอยู่ในคอมพิวเตอร์ทำให้ปัญหาไม่สามารถหาผลลัพธ์ได้

2.4.3 เทคนิคการหาค่าเหมาะสมด้วยเทคนิคเจเนติกอัลกอริทึม

พันธุกรรมทางคอมพิวเตอร์ หรือ Genetic Algorithms (GA) เป็นปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้ในการค้นหาค่าสูงสุด ต่ำสุด หรือค่าอุดมภาพ (Optimization Problem) ของฟังก์ชันใด ๆ ที่ต้องการไม่ว่าฟังก์ชันดังกล่าวจะเป็นแบบเส้นตรง (Linear) หรือไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear) ก็ตาม (กัมปนาท ภัคติกุล, 2544) GA ถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรกโดย John Holland ในปี ค.ศ. 1971 และตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือชื่อ "Adaptation in Natural and Artificial Systems" ในปี ค.ศ. 1975 และมีการนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการหาความเหมาะสมในหลาย ๆ แขนงวิชาเรื่อยมา ไม่ว่าจะเป็นวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ การวิจัยดำเนินการ อุตสาหกรรม ชีววิทยา ฟิสิกส์ การแพทย์ การบริหารธุรกิจ เป็นต้น วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่เลียนแบบกลไกการคัดเลือกตามธรรมชาติซึ่งมีรากฐานมาจากทฤษฎีวิวัฒนาการทางธรรมชาติ กล่าวคือตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) ของปัญหาจะถูกแทนค่าโดยแถวของตัวเลข (String) หรือเรียกโดยคำศัพท์ทางชีววิทยาว่าโครโมโซม (Chromosome) GA จะทำการสร้างโครโมโซมขึ้นมาชุดหนึ่ง เรียกว่า Population โดยแต่ละโครโมโซมจะประกอบไปด้วยบล็อกหรือยีน (Gene) ที่แทนค่าตัวแปรตัดสินใจแต่ละตัว ยีนในยุคเริ่มแรกของ GA จะประกอบไปด้วยตัวเลขไบนารี (Binary Bits) คือ 0 และ 1 แต่ละยีนประกอบไปด้วยเลขไบนารี 3 ตัวหรือเรียกว่า 3 อัลลีลส์ (Alleles) ซึ่งเมื่อถอดรหัสแล้วจะได้ค่าของตัวแปรตัดสินใจออกมาซึ่งอาจจะเป็นจำนวนจริง

(Real-value) จำนวนเต็ม (Integer) เซต (Set) หรือเมตริกซ์ (Matrix) ก็ได้ ขึ้นอยู่กับผู้ศึกษาเป็นผู้กำหนดให้เหมาะสมกับปัญหา แต่ GA ในยุคหลังนิยมใช้จำนวนจริง (Real-value) แทนการใช้เลขแบบไบนารี ทำให้โครโมโซมสั้นลงเพราะไม่ต้องแบ่งเงินเป็นหลาย ๆ อัลลีลส์ เมื่อทำการถอดรหัสเงินทุกตัวในโครโมโซมออกมาเป็นตัวแปรและทำการแทนค่าตัวแปรเหล่านั้นลงไปในฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) แล้ว โครโมโซมหนึ่งก็จะให้ผลลัพธ์ออกมาเรียกว่าค่า Fitness ของโครโมโซม นั้น ซึ่งค่า Fitness ของโครโมโซมแต่ละตัวใน Population นี้เป็นเพียงค่าที่เป็นไปได้ (Possible Solution) แต่อาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา โครโมโซมเหล่านี้จะต้องผ่านกระบวนการของ GA ซึ่งเป็นกระบวนการที่เลียนแบบกลไกการคัดเลือกตามธรรมชาติอีก 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการคัดเลือก (Selection Operation) ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนเงิน (Crossover Operation) และขั้นตอนการดัดแปลงเงิน (Mutation Operation)

1) ขั้นตอนการคัดเลือก (Selection Operation)

หลักการของขั้นตอนการคัดเลือกก็คือ โครโมโซมที่มีค่า Fitness ดีที่สุดใน Population (สูงสุดหรือต่ำสุดแล้วแต่ประเภทของปัญหา) จะมีโอกาสถูกคัดเลือกให้เข้าไปสู่กระบวนการในขั้นตอนถัดไปมากที่สุด วิธีที่ใช้กันโดยทั่วไป เรียกว่า Proportional Selection (Goldberg, 1989) ซึ่งกำหนดค่าความเป็นไปได้ในการถูกคัดเลือก (Probability of Selection, P_i) ให้กับแต่ละโครโมโซมเท่ากับสัดส่วนของค่า Fitness ของโครโมโซมนั้นเทียบกับผลรวมของค่า Fitness ของโครโมโซมทั้งหมดใน Population นอกจากนี้ยังมีวิธีการคัดเลือกแบบอื่นที่นิยมใช้กัน

2) ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนเงิน (Crossover Operation)

ขั้นตอนนี้จะทำการสุ่มเลือกโครโมโซมใน Population นั้นมาทำการจับคู่แลกเปลี่ยนเงินกัน โดยโอกาสที่แต่ละโครโมโซมจะถูกสุ่มขึ้นมาจับคู่กันขึ้นอยู่กับค่า Probability of Crossover ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ผู้ศึกษานำเข้าสู่กระบวนการ ส่วนประเภทของ Crossover จำแนกไว้มีอยู่ 3 ประเภทคือ 1) Crossover 1 ตำแหน่ง (One-point Crossover) ซึ่งจะทำการแลกเปลี่ยนเงินของโครโมโซมที่ถูกจับคู่กัน ณ ตำแหน่งเงินที่ถูกสุ่มขึ้นมาจนถึงเงินในตำแหน่งสุดท้าย 2) Crossover 2 ตำแหน่ง (Two-point Crossover) จะทำการแลกเปลี่ยนเงินที่อยู่ระหว่างตำแหน่งทั้ง 2 ที่ถูกสุ่มขึ้นมา และ 3) Crossover หลายตำแหน่ง (Uniform Crossover) นั้น เงินที่อยู่ในตำแหน่งเดียวกันของโครโมโซมที่ถูกจับคู่กันจะถูกสุ่มให้มีการแลกเปลี่ยนกันแบบเงินต่อเงิน

3) ขั้นตอนการดัดแปลงเงิน (Mutation Operation)

ขั้นตอนเงินจะถูกสุ่มดัดแปลงให้ผิดแผกไปจากเดิมโดยสิ้นเชิง และความเป็นไปได้ที่เงินจะถูกสุ่มขึ้นมาทำการดัดแปลงนั้นขึ้นอยู่กับค่า Probability of Mutation ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ผู้ศึกษานำเข้าสู่กระบวนการ ใน GA ที่ใช้รหัสแบบไบนารี การดัดแปลงเงินจะกระทำโดยการเปลี่ยนค่า 0 เป็น 1 หรือ 1 เป็น 0

สำหรับ GA ที่ใช้รหัสแบบจำนวนจริง (Real-value Coding) นั้น มีรูปแบบการดัดแปลงเงินที่มีรายละเอียดมากกว่าแบบไบนารีมากมาย โดย Michalewicz (1996) ได้จำแนกไว้ 3 แบบคือ 1) Uniform Mutation ซึ่งค่าของเงินจะถูกดัดแปลงภายในพิสัย (Range) ที่กำหนด 2) Non-uniform Mutation ซึ่งจะดัดแปลงเงินด้วยค่าที่ค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ ใน Generation ถัด ๆ ไปของกระบวนการ GA และ 3) Modified Uniform Mutation ซึ่งค่าของเงินจะถูกดัดแปลงโดยค่าคงที่เพียงค่าเดียว เมื่อผ่านขั้นตอนทั้งสามเรียบร้อยแล้วจะได้โครโมโซมชุดใหม่ที่แตกต่างไปจากเดิม โครโมโซมชุดนี้จะถูกนำไปแทนที่โครโมโซมชุดเดิมกลายเป็น Population ใหม่ กระบวนการทั้งหมดนี้เรียกว่าเป็นหนึ่ง Generation จากนั้น GA จะดำเนินการกระบวนการทั้งหมดกับ Population ใหม่นี้ อีกครั้งหนึ่ง และกระทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะครบตามจำนวน Generation ที่ผู้ศึกษากำหนด และได้ชุดของโครโมโซมที่ให้ค่า Fitness ที่ดีที่สุดในตอนท้ายของกระบวนการ GA

2.5 เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิค Harris Hawks Optimization (HHO)

2.5.1 ความเป็นมา

ในปี 1997 Louis Lefebvre เสนอวิธีการในการวัด 'IQ' โดยมีพื้นฐานจากนวัตกรรมการสังเกตได้จากพฤติกรรมกินอาหารจากการศึกษาของเขา เขื่อยสามารถระบุได้ว่าเป็นนกที่ฉลาดที่สุดในธรรมชาติ เขื่อยแฮร์ริส (Parabuteo unicinctus) เป็นนกล่าเหยื่อที่รู้จักกันดีว่ามีชีวิตรอดในกลุ่มที่ค่อนข้างคงที่ซึ่งพบในภาคใต้ของรัฐแอริโซนา การรวมตัวกันของสัตว์หลายชนิดเกิดขึ้นเพื่อจับเหยื่อ จากนั้นการแบ่งปันสัตว์ที่ถูกสังหารนั้นเป็นที่ดึงดูดใจสำหรับสัตว์กินเนื้อ โดยเฉพาะสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เขื่อยแฮร์ริสมีความโดดเด่นเนื่องจากกิจกรรมการหาอาหารแบบมีส่วนร่วมที่เป็นเอกลักษณ์ร่วมกับสมาชิกครอบครัวคนอื่น ๆ ที่อาศัยอยู่ในกลุ่มเดียวกันในขณะที่ผู้ล่าคนอื่น ๆ มักจะโจมตีเพื่อค้นหาและจับเหยื่อโดยลำพัง นกล่าเหยื่อเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการไล่ล่าของทีมที่มีวิวัฒนาการในการติดตาม, ล้อมรอบ, การไล่ล่าและในที่สุดก็โจมตีเป้าหมายที่มีศักยภาพ นกที่ฉลาดเหล่านี้สามารถจัดงานเลี้ยงอาหารค่ำซึ่งประกอบด้วยบุคคลหลายคนในฤดูที่ไม่ผสมพันธุ์ พวกมัน

เป็นที่รู้จักในฐานะนักล่าที่ร่วมมือกันอย่างแท้จริงในดินแดนผู้ล่า พวกมันเริ่มภารกิจของทีมในยามเช้า โดยออกจากที่พักและมักจะเกาะอยู่บนต้นไม้ยักษ์หรือเสาไฟฟ้าในดินแดนบ้านของพวกมัน พวกมัน รู้จักสมาชิกครอบครัวและพยายามระวังการเคลื่อนไหวในระหว่างการโจมตี เมื่อรวมตัวกันและเริ่ม ปาร์ตี้กันแล้วเหยี่ยวบางตัวก็จะออกทัวร์ระยะสั้น ๆ จากนั้นก็ขึ้นที่สูง ในลักษณะนี้เหยี่ยวบางครั้งจะ ทำการเคลื่อนที่แบบ "leapfrog" ทั่วพื้นที่เป้าหมายและพวกมันจะเข้าร่วมและแยกหลายครั้งเพื่อ ค้นหาสัตว์ที่เป็นอาหารซึ่งมักจะเป็นกระต่าย

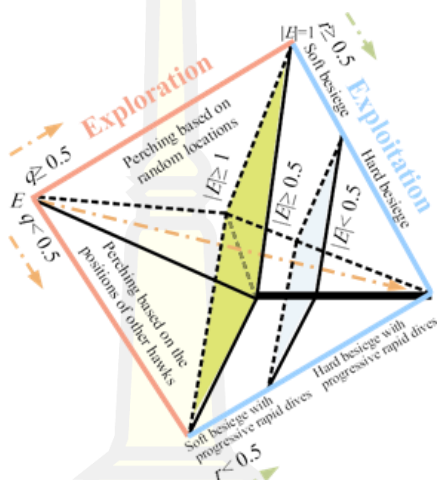
กลยุทธ์หลักของแฮร์ริสที่จะจับเหยื่อคือ "surprise pounce" ซึ่งรู้จักกันในชื่อกลยุทธ์ " seven kills " ในกลยุทธ์อันชาญฉลาดนี้เหยี่ยวหลายตัวพยายามโจมตีจากทิศทางที่แตกต่างกันอย่าง ร่วมมือกันและมาบรรจบกับกระต่ายที่หนีออกมาจากที่กำบัง การโจมตีอาจเสร็จสิ้นอย่างรวดเร็วโดย การจับเหยื่อที่ตกใจในไม่กี่วินาที แต่บางครั้งก็เกี่ยวกับความสามารถในการหลบหนีและพฤติกรรมของ เหยื่อการสังหารทั้งเจ็ดนั้นอาจรวมถึงการพุ่งเข้าหาหลายครั้งในระยะเวลายาว ๆ เหยี่ยวแฮร์ริสสามารถ แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการไล่ล่าที่หลากหลายขึ้นอยู่กับลักษณะของสถานการณ์และรูปแบบการ หลบหนีจากเหยื่อ ชั้นเชิงการสลับเกิดขึ้นเมื่อเหยี่ยว (ผู้นำ) ที่ดีที่สุดก้มลงที่เหยื่อการไล่ล่าจะ ดำเนินการต่อโดยหนึ่งในสมาชิกในทีม กิจกรรมการสลับเหล่านี้สามารถสังเกตได้ในสถานการณ์ที่ แตกต่างกันไปเพราะเป็นประโยชน์สำหรับการทำให้กระต่ายสับสน ข้อได้เปรียบที่สำคัญของกลยุทธ์ ความร่วมมือเหล่านี้คือเหยี่ยวแฮร์ริสสามารถไล่ตามกระต่ายที่ถูกหมายหัวเพื่อให้อ่อนเพลียซึ่งจะเพิ่ม ความเสี่ยง ยิ่งไปกว่านั้นด้วยการทำให้เหยื่อที่หลบหนีไม่สามารถกู้คืนความสามารถในการป้องกันได้ และในที่สุดก็ไม่สามารถหลบหนีจากการเผชิญหน้ากับการล้อมของทีม เพราะเหยี่ยวแฮร์ริสเป็นสัตว์ที่ ทรงพลังและมีประสบการณ์ที่สุด เหยี่ยวแฮร์ริสและพฤติกรรมหลักสามารถเห็นได้ในธรรมชาติตามที่ แสดงไว้ในภาพประกอบที่ 11



ภาพประกอบ 11 Harris's hawk.

2.5.2 Harris hawks optimization (HHO)

ในส่วนนี้เราจำลองขั้นตอนการสำรวจและการเสาะแสวงของ HHO ที่เสนอโดยได้แรงบันดาลใจจากการสำรวจเหยื่อการโจมตีอย่างฉับพลันและกลยุทธ์การโจมตีที่แตกต่างกันของแฮร์ริสเหยี่ยว HHO เป็นเทคนิคการค้นหาที่เหมาะสมแบบที่อิงฐานประชากรไม่ใช้ข้อมูลเกรเดียนต์ ดังนั้นมันสามารถนำไปใช้กับปัญหาการค้นหาที่เหมาะสมใด ๆ ที่อยู่ภายใต้การกำหนดที่เหมาะสม ภาพประกอบที่ 12 แสดงขั้นตอนทั้งหมดของ HHO ซึ่งจะอธิบายไว้ในส่วนย่อยต่อไป



ภาพประกอบ 12 ขั้นตอนของ HHO

1. ขั้นตอนการสำรวจ

ในส่วนนี้มีการเสนอกลไกการสำรวจของ HHO หากเราพิจารณาลักษณะของเหยี่ยวแฮร์ริส พวกเขาสามารถติดตามและตรวจจับเหยื่อด้วยดวงตาที่ทรงพลัง แต่บางครั้งก็มองไม่เห็นเหยื่อได้ง่าย ดังนั้นเหยี่ยวจึงคอยเฝ้าสังเกตและเฝ้าดูพื้นที่ทะเลทรายเพื่อตรวจจับเหยื่อหลังจากผ่านไปหลายชั่วโมง ใน HHO เหยี่ยวแฮร์ริสเป็นตัวเลือกของทางออกที่ดีที่สุดในแต่ละขั้นตอนนั้นถือว่าเป็นเหยื่อที่หมายหัวหรือเกือบจะเหมาะสมที่สุด ใน HHO เหยี่ยวแฮร์ริสเกาะสุมในบางพื้นที่และรอการตรวจจับเหยื่อจากสองกลยุทธ์ หากเราพิจารณาโอกาสที่เท่าเทียมกัน q สำหรับแต่ละกลยุทธ์การเกาะพวกเขาจะยึดตามตำแหน่งของสมาชิกครอบครัวคนอื่น ๆ (ใกล้พอที่จะโจมตีพวกเขา) และกระต่ายซึ่งเป็นแบบจำลองในสมการที่ 2.7 สำหรับสภาพของ $q < 0.5$ หรือเกาะอยู่บนต้นไม้สูงสุม (สถานที่สุมภายในช่วงของกลุ่ม) ซึ่งเป็นแบบจำลองสมการที่ 2.7 สำหรับสภาพของ $q \geq 0.5$

$$X(t + 1) = \begin{cases} X_{rand}(t) - r_1 |X_{rand}(t) - 2r_2 X(t)| & q \geq 0.5 \\ (X_{rabbit}(t) - X_m(t)) - r_3(LB + r_4(UB - LB)) & q < 0.5 \end{cases} \quad (2.7)$$

โดยที่ $X(t + 1)$ เป็นตำแหน่งเวกเตอร์ของเหยี่ยวในซ้ำต่อไป t , $X_{rabbit}(t)$ คือตำแหน่งของกระต่าย $X(t)$ เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งปัจจุบันของเหยี่ยว, r_1, r_2, r_3, r_4 และ q เป็นตัวเลขสุ่มภายใน $(0, 1)$ ซึ่งได้รับการปรับปรุงในแต่ละการวนซ้ำ LB และ UB แสดงขอบเขตของตัวแปรบนและล่าง $X_{rand}(t)$ เป็นเหยี่ยวที่สุ่มเลือกจากประชากรปัจจุบันและ X_m คือตำแหน่งเฉลี่ยของประชากรเหยี่ยวในปัจจุบันเราเสนอรูปแบบง่าย ๆ ในการสร้างสถานที่แบบสุ่มภายในขอบเขตของกลุ่ม (LB, UB) กฎข้อแรกสร้างวิธีแก้ไขตามสถานที่สุ่มและเหยี่ยวอื่น ๆ ในกฎข้อที่สองของ สมการที่ 2.7 มีความแตกต่างของตำแหน่งที่ดีที่สุดจนถึงและตำแหน่งเฉลี่ยของกลุ่มรวมถึงองค์ประกอบแบบสุ่มตามช่วงของตัวแปรในขณะที่ r_3 เป็นสัมประสิทธิ์การปรับปรุงเพื่อเพิ่มลักษณะการสุ่มของกฎอีกครั้ง r_4 รับค่าใกล้เคียงกับ 1 และอาจเกิดรูปแบบการกระจายที่คล้ายกันในกฎนี้เราเพิ่มความยาวการเคลื่อนไหวแบบสเกลแบบสุ่มไปยัง LB จากนั้นเราพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การปรับแบบสุ่มสำหรับส่วนประกอบเพื่อให้แนวโน้มการกระจายมากขึ้นและสำรวจภูมิภาคต่าง ๆ ของพื้นที่คุณลักษณะ เป็นไปได้ที่จะสร้างกฎการอัปเดตที่แตกต่างกัน แต่เราใช้กฎที่ง่ายที่สุดซึ่งสามารถเลียนแบบพฤติกรรมของเหยี่ยวได้ ตำแหน่งเฉลี่ยของเหยี่ยวบรรลุได้โดยใช้สมการที่ 2.8

$$X_m(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t) \quad (2.8)$$

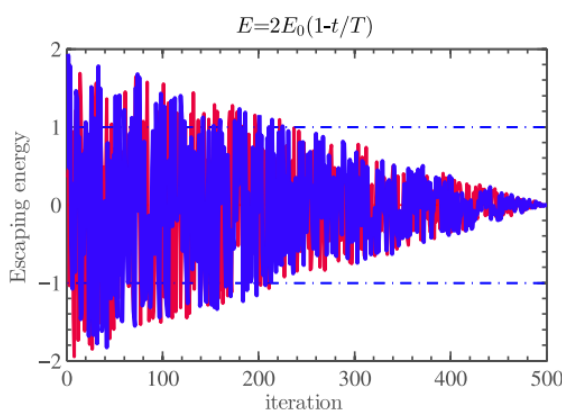
โดยที่ $X_i(t)$ ระบุตำแหน่งของเหยี่ยวแต่ละตัวในการวนซ้ำ t และ N แสดงจำนวนเหยี่ยวทั้งหมด เป็นไปได้ที่จะได้รับตำแหน่งเฉลี่ยในรูปแบบต่าง ๆ แต่เราใช้กฎที่ง่ายที่สุด

2. การเปลี่ยนจากการสำรวจเป็นการเสาะแสวง

อัลกอริทึม HHO สามารถถ่ายโอนจากการสำรวจเป็นการเสาะแสวงจากนั้นเปลี่ยนพฤติกรรมการแสวงหาประโยชน์ที่แตกต่างตามพลังงานที่หลบหนีของเหยื่อ พลังงานของเหยื่อลดลงอย่างมากระหว่างพฤติกรรมหลบหนี ในการสร้างแบบจำลองความจริงนี้พลังงานของเหยื่อถูกจำลองเป็น:

$$E = 2E_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (2.9)$$

โดยที่ E บ่งบอกถึงพลังงานที่หลบหนีของเหยื่อ T คือจำนวนการวนซ้ำสูงสุดและ E_0 เป็นสถานะเริ่มต้นของพลังงานใน HHO, E_0 แบบสุ่ม การเปลี่ยนแปลงภายในช่วงเวลา $(-1, 1)$ ในแต่ละรอบซ้ำ เมื่อค่าของ E_0 ลดลงจาก 0 เป็น -1 กระจายจะตั้งค่าสถานะทางกายภาพในขณะที่เมื่อค่าของ E_0 เพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 1 แสดงว่ากระจายมีความเข้มข้น พลังงานการหลบหนีแบบไดนามิก E มีแนวโน้มลดลงในระหว่างการทำซ้ำ เมื่อพลังงานที่หลบหนี $|E| \geq 1$ เหยื่อค้นหาตามพื้นที่ต่าง ๆ เพื่อสำรวจตำแหน่งกระจาย ดังนั้น HHO จึงทำการสำรวจระยะและเมื่อ $|E| < 1$ อัลกอริทึมพยายามใช้ประโยชน์จากพื้นที่ใกล้เคียงของโซลูชันในระหว่างขั้นตอนการใช้ประโยชน์ ในระยะสั้นการตรวจสอบข้อเท็จจริงที่เกิดขึ้นเมื่อ $|E| \geq 1$ ในขณะที่การเสาะแสวงที่เกิดขึ้นในขั้นตอนต่อมาเมื่อ $|E| < 1$ พฤติกรรมที่ซับซ้อนกว่าของ E ยังจะแสดงให้เห็นในภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 การเปลี่ยนแปลงของ E ระหว่างการวิ่งสองรอบและการทำซ้ำ 500 ครั้ง

3. ขั้นตอนการเสาะแสวง

ในนี้แฮร์ริสเหยื่อจะทำการจู่โจมอย่างฉับพลัน (*seven kills*) โดยโจมตีเหยื่อที่ถูกตรวจพบในระยะก่อนหน้า อย่างไรก็ตามเหยื่อมักพยายามหลบหนีจากสถานการณ์อันตราย ดังนั้นรูปแบบการไล่ที่แตกต่างกันจึงเกิดขึ้นในสถานการณ์จริง ตามพฤติกรรมหลบหนีของกลยุทธ์การล่าเหยื่อและการไล่ล่าของเหยื่อแฮร์ริสมีการเสนอกยุทธ์ที่เป็นไปได้สี่อย่างใน HHO เพื่อจำลองสถานการณ์การโจมตี เหยื่อพยายามหลบหนีจากสถานการณ์ที่คุกคามอยู่เสมอ

สมมติว่า r คือโอกาสที่เหยื่อจะหลบหนีได้สำเร็จ ($r < 0.5$) หรือหนีไม่สำเร็จ ($r \geq 0.5$) ก่อนการจู่โจมอย่างฉับพลัน เหยื่อจะทำการโจมตีอย่างหนักหน่วงหรือนุ่มนวลเพื่อจับเหยื่อ หมายความว่าพวกมันจะล้อมรอบเหยื่อจากทิศทางที่ต่างกันอย่างนุ่มนวลหรือหนักหน่วง ขึ้นอยู่กับพลังงานสะสม

ของเหยื่อ ในสถานการณ์จริงเหยี่ยวจะเข้าใกล้เหยื่อที่ตั้งใจไว้มากขึ้นเพื่อเพิ่มโอกาสในการฆ่ากระต่าย ด้วยการจู่โจมอย่างตกใจ หลังจากผ่านไปหลายนาทีเหยื่อที่หลบหนีจะสูญเสียพลังงานมากขึ้นเรื่อย ๆ จากนั้นเหยี่ยวจะเพิ่มความหนักหน่วงของกระบวนการล่อมเพื่อจับเหยื่อที่อ่อนล้าได้อย่างง่ายดาย ในการสร้างแบบจำลองกลยุทธ์นี้และเปิดใช้งาน HHO เพื่อสลับระหว่างกระบวนการปิดล้อมแบบนุ่มนวล และหนักหน่วง E พารามิเตอร์จะถูกใช้เมื่อ $|E| \geq 0.5$ การล่อมแบบนุ่มนวลเกิดขึ้นและเมื่อ $|E| < 0.5$ การล่อมยากเกิดขึ้น

3.1 ล่อมแบบนุ่มนวล

เมื่อ $r \geq 0.5$ และ $|E| \geq 0.5$ กระต่ายยังคงมีพลังงานเพียงพอและพยายามหลบหนีด้วยการกระโดดที่ทำให้หลอกตา แต่ในที่สุดมันก็ไม่สามารถทำได้ ในระหว่างความพยายามเหล่านี้เหยี่ยวแฮร์ริสล่อมรอบมันเบา ๆ เพื่อให้กระต่ายอ่อนล้ามากขึ้นจากนั้นจึงทำการจู่โจมอย่างตกใจ พฤติกรรมนี้เป็นแบบจำลองโดยกฎต่อไปนี้:

$$X(t+1) = \Delta X(t) - E |X_{rabbit}(t) - X(t)| \quad (2.10)$$

$$\Delta X(t) = X_{rabbit}(t) - X(t) \quad (2.11)$$

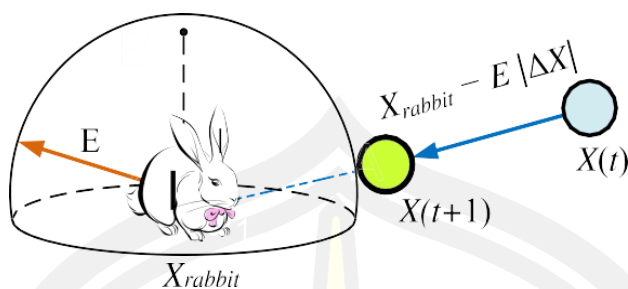
โดยที่ $\Delta X(t)$ คือความแตกต่างระหว่างเวกเตอร์ตำแหน่งของกระต่ายและตำแหน่งปัจจุบัน ในการทำซ้ำ t , r_5 คือตัวเลขสุ่มภายใน $(0, 1)$ และ $J = 2(1 - r_5)$ แสดงถึงพลังการกระโดดแบบสุ่มของกระต่ายตลอดกระบวนการหลบหนี J ค่าเปลี่ยนแปลงแบบสุ่มในแต่ละซ้ำเพื่อจำลองลักษณะของการเคลื่อนไหวของกระต่าย

3.2 ล่อมแบบหนักหน่วง

เมื่อ $r \geq 0.5$ และ $|E| < 0.5$ เหยื่อหมดลงและมีพลังงานหลบหนีต่ำ นอกจากนี้เหยี่ยวแฮร์ริสแทบจะไม่ได้ล่อมรอบเหยื่อที่ตั้งใจจะทำการจู่โจม ในสถานการณ์นี้ตำแหน่งปัจจุบันจะถูกอัปเดตโดยใช้สมการ 2.12

$$X(t+1) = X_{rabbit}(t) - E |\Delta X(t)| \quad (2.12)$$

ตัวอย่างง่าย ๆ ของขั้นตอนนี้แสดงไว้ในภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 ตัวอย่างของเวกเตอร์โดยรวมในกรณีของ hard besiege

3.3 ล้อมแบบนุ่มนวลกับการพุ่งเข้าหาอย่างรวดเร็ว

เมื่อ $|E| \geq 0.5$ แต่ $R < 0.5$ กระต่ายมีพลังงานมากพอที่จะหลบหนีได้สำเร็จและยังคงมีการปิดล้อมที่นุ่มนวลก่อนที่จะตีด้วยความตกใจ ขั้นตอนนี้อาจเร็วกว่ากรณีก่อนหน้านี้

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรูปแบบการหลบหนีของการเคลื่อนไหวของเหยื่อและการก้าวกระโดด the levy flight (LF) ถูกใช้ในอัลกอริทึม HHO LF ถูกนำมาใช้เพื่อเลียนแบบการเคลื่อนไหวที่หลอกลวงซิกแซกของเหยื่อ (กระต่ายพิเศษ) ในระหว่างการหลบหนีการติดปีกดิ้นพลัน, และการพุ่งเข้าหาอย่างรวดเร็วของเหยี่ยวรอบ ๆ เหยื่อ ที่อันจจริงแล้วเหยี่ยวทำการพุ่งเข้าหารอบ ๆ ทีมอย่างรวดเร็วและพยายามแก้ไขตำแหน่งและทิศทางของพวกมันอย่างต่อเนื่องโดยคำนึงถึงการเคลื่อนไหวของเหยื่อที่หลอกลวง กลไกนี้ยังได้รับการสนับสนุนจากการสังเกตการณ์จริงในสถานการณ์การแข่งขันอื่น ๆ ในธรรมชาติ ได้รับการยืนยันแล้วว่ากิจกรรมบนพื้นฐานของ LF เป็นกลยุทธ์การค้นหาที่ดีที่สุดสำหรับนักล่า / ผู้ล่าในสถานะที่ไม่ทำลายนอกจากนี้ยังได้รับการตรวจพบที่สามารถตรวจพบรูปแบบพื้นฐานของ LF ในกิจกรรมการไล่ล่าสัตว์เช่นลิงและฉลามดังนั้นการเคลื่อนไหวที่ใช้ LF ถูกนำมาใช้ในขั้นตอนของเทคนิค HHO นี้

แรงบันดาลใจจากพฤติกรรมที่แท้จริงของเหยี่ยวเราคิดว่าพวกเขาสามารถเลือกพุ่งเข้าหาที่ดีที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ต่อเหยื่อเมื่อพวกเขาต้องการจับเหยื่อในสถานการณ์การแข่งขัน ดังนั้นเพื่อทำการล้อมที่นุ่มนวลเราคิดว่าเหยี่ยวสามารถประเมิน (ตัดสินใจ) การเคลื่อนไหวครั้งต่อไปของพวกเขาตามกฎต่อไปนี้ในสมการ 2.13

$$Y = X_{rabbit}(t) - E |X_{rabbit}(t) - X(t)| \quad (2.13)$$

จากนั้นพวกเขาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ของการเคลื่อนไหวดังกล่าวกับการพุ่งเข้าหาหน้า มันจะเป็นการพุ่งเข้าหาที่ดีหรือไม่ หากไม่สมเหตุสมผล (เมื่อเห็นว่าเหยื่อมีการเคลื่อนไหวที่หลอกลวงมากขึ้น) พวกเขาก็เริ่มทำการพุ่งเข้าหาที่ผิดปกติฉับพลันและรวดเร็วเมื่อเข้าใกล้กระต่าย เราคิดว่าพวกมันจะพุ่งเข้าหาตามรูปแบบที่ใช้ LF โดยใช้กฎต่อไปนี้

$$Z = Y + S \times LF(D) \quad (2.14)$$

โดยที่ D คือมิติของปัญหาและ S เป็นเวกเตอร์สุ่มตามขนาด $1 \times D$ และ LF เป็นฟังก์ชัน Levy flight ซึ่งคำนวณโดยใช้สมการ 2.15

$$LF(x) = 0.01 \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{\frac{1}{\beta}}}, \sigma = \left(\frac{\Gamma(1 + \beta) \times \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\Gamma(\frac{1+\beta}{2}) \times \beta \times 2^{(\frac{\beta-1}{2})}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.15)$$

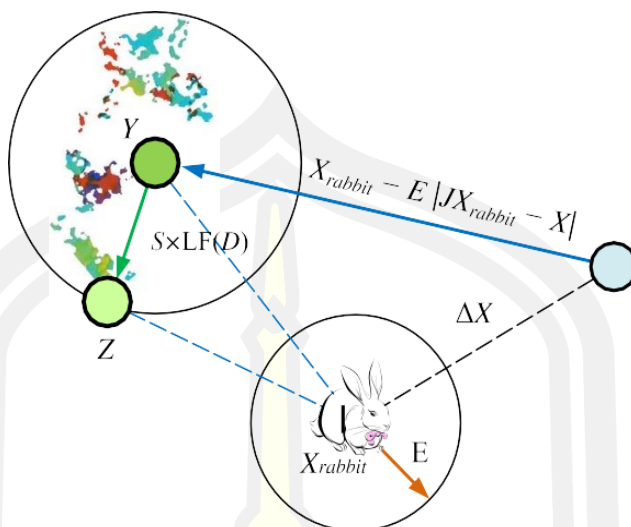
โดยที่ u, v เป็นค่าสุ่มภายใน $(0,1)$, β คือค่าคงที่เริ่มต้นที่ตั้งไว้ที่ 1.5

ดังนั้นกลยุทธ์ขั้นสุดท้ายสำหรับการอัปเดตตำแหน่งของเหยื่อในเฟสการล้อมรอบที่นุ่มนวลสามารถดำเนินการได้โดยสมการ 2.16

$$X(t + 1) = \begin{cases} Y & \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z & \text{if } F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (2.16)$$

โดยที่ Y และ Z จะหาได้โดยใช้สมการ 2.13 และ 2.14

ภาพประกอบง่าย ๆ ของขั้นตอนนี้สำหรับเหยื่อหนึ่งตัวแสดงให้เห็นในภาพประกอบที่ 15 โปรดทราบว่าประวัติตำแหน่งของรูปแบบการเคลื่อนไหวแบบก้าวกระโดด LF ที่ใช้ในระหว่างการทำซ้ำบางอย่างจะถูกบันทึกและแสดงในภาพประกอบนี้ จุดสีเป็นรูปแบบการระบุตำแหน่งของรูปแบบที่ใช้ LF ในการทดลองหนึ่งครั้งจากนั้น HHO จะไปถึงตำแหน่ง Z ในแต่ละขั้นตอนเฉพาะตำแหน่ง Y หรือ Z ที่ดีกว่าเท่านั้นที่จะถูกเลือกเป็นตำแหน่งถัดไป กลยุทธ์นี้ใช้กับตัวแทนการค้นหาทั้งหมด



ภาพประกอบ 15 ตัวอย่างของเวกเตอร์โดยรวมในกรณีของ soft besiege และ progressive rapid dives

3.4 ล้อมรอบแบบหนักหน่วงกับการพุ่งเข้าหาอย่างรวดเร็วที่ก้าวหน้า

เมื่อ $|E| < 0.5$ และ $r < 0.5$ กระต่ายมีพลังงานไม่เพียงพอที่จะหลบหนีและการโจมตีอย่างหนักหน่วงถูกสร้างขึ้นก่อนที่จะมีการจู่โจมอย่างฉับพลันเพื่อจับและฆ่าเหยื่อ สถานการณ์ของขั้นตอนนี้นำด้านเหยื่อนั้นคล้ายกับในช่วงปิดล้อม แต่คราวนี้เหยื่อพยายามลดระยะทางของตำแหน่งเฉลี่ยของพวกเขาด้วยการหลบหนีเหยื่อ ดังนั้นกฎดังต่อไปนี้จะถูกดำเนินการในสภาพการปิดล้อมอย่างหนักหน่วง:

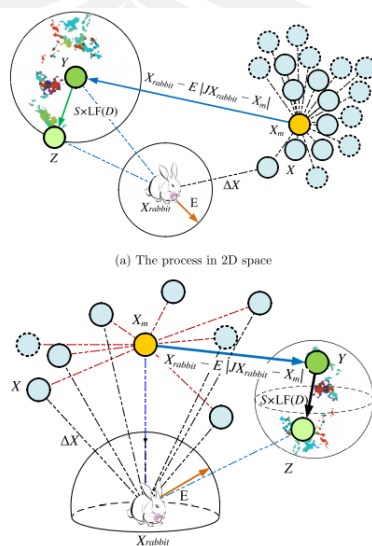
$$X(t+1) = \begin{cases} Y & \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z & \text{if } F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (2.17)$$

โดยที่ Y และ Z จะหาได้จากสมการใหม่ในสมการ 2.18 และ 2.19

$$Y = X_{rabbit}(t) - E |JX_{rabbit}(t) - X_m(t)| \quad (2.18)$$

$$Z = Y + S \times LF(D) \quad (2.19)$$

โดยที่ $X_m(t)$ ได้มาโดยใช้สมการ 2.8 ตัวอย่างง่าย ๆ ของขั้นตอนนี้จะแสดงให้เห็นในภาพประกอบ 16 โปรดทราบว่าจุดสีคือส่วนที่ติดตั้งของรูปแบบที่ใช้ LF ในการทดลองหนึ่งครั้งและมีเพียง Y หรือ Z เท่านั้นที่จะเป็นตำแหน่งถัดไปสำหรับการทำซ้ำใหม่



ภาพประกอบ 16 ตัวอย่างของเวกเตอร์โดยรวมในกรณีของhard besiege และ progressive rapid dives ในพื้นที่ 2D และ 3D

4. Pseudocode ของ HHO

Pseudocode ของอัลกอริทึม HHO ที่นำเสนอแสดงในภาพประกอบที่ 17

Algorithm 1 Pseudo-code of HHO algorithm

Inputs: The population size N and maximum number of iterations T
Outputs: The location of rabbit and its fitness value
 Initialize the random population $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$
while (stopping condition is not met) **do**
 Calculate the fitness values of hawks
 Set X_{rabbit} as the location of rabbit (best location)
 for (each hawk (X_i)) **do**
 Update the initial energy E_0 and jump strength J ▷
 $E_0 = 2 \text{rand}() - 1, J = 2(1 - \text{rand}())$
 Update the E using Eq. (3)
 if ($|E| \geq 1$) **then** ▷ Exploration phase
 Update the location vector using Eq. (1)
 if ($|E| < 1$) **then** ▷ Exploitation phase
 if ($r \geq 0.5$ and $|E| \geq 0.5$) **then** ▷ Soft besiege
 Update the location vector using Eq. (4)
 else if ($r \geq 0.5$ and $|E| < 0.5$) **then** ▷ Hard besiege
 Update the location vector using Eq. (6)
 else if ($r < 0.5$ and $|E| \geq 0.5$) **then** ▷ Soft besiege
 with progressive rapid dives
 Update the location vector using Eq. (10)
 else if ($r < 0.5$ and $|E| < 0.5$) **then** ▷ Hard besiege
 with progressive rapid dives
 Update the location vector using Eq. (11)
 Return X_{rabbit}

ภาพประกอบ 17 รหัสคอมพิวเตอร์ของ HHO

5. ความซับซ้อนในการคำนวณ

โปรดทราบว่าความซับซ้อนในการคำนวณของ HHO นั้นขึ้นอยู่กับสามกระบวนการคือการเริ่มต้นการประเมินความเหมาะสมและการปรับปรุงเหยี่ยว โปรดทราบว่า N เหยี่ยวความซับซ้อนในการคำนวณของกระบวนการเริ่มต้นคือ $O(N)$ ความซับซ้อนในการคำนวณของกลไกการอัปเดตคือ $O(T \times N) + O(T \times N \times D)$ ซึ่งประกอบด้วยการค้นหาตำแหน่งที่ดีที่สุดและการอัปเดตเวกเตอร์ตำแหน่งของเหยี่ยวทั้งหมดโดยที่ T คือจำนวนการทำซ้ำสูงสุดและ D คือมิติ ของปัญหาเฉพาะ ดังนั้นความซับซ้อนในการคำนวณของ HHO คือ $O(N \times (T + TD + 1))$

2.6 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 การประยุกต์ใช้วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำและการปรับปรุงโครงสร้างอ่างเก็บน้ำ

งานวิจัยที่ผ่านมาด้านการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำต่าง ๆ พบว่า (Neelakantan and Pundarikanthan., 2000) ได้ศึกษาการใช้ น้ำของอ่างเก็บน้ำสำหรับการผลิตประปาที่เมืองเซินไน (Chennai City) ประเทศอินเดีย โดยกล่าวถึงการนำผลที่ได้จากเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำรูปแบบหนึ่งที่เรียกว่า หลักการอนุรักษ์น้ำ (Hedging Rule) ซึ่งเป็นวิธีการที่ยอมให้เกิดการขาดน้ำขึ้นทีละน้อยตั้งแต่ในช่วงระยะเวลาแรก ๆ ของการส่งน้ำเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการขาดน้ำอย่างรุนแรงในภายหลังเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเกณฑ์การปฏิบัติงานมาตรฐาน (Standard Operating Rule) ซึ่งเป็นวิธีการส่งน้ำตามความต้องการ โดยในช่วงฤดูแล้งยอมให้มีการใช้น้ำจกอ่างเก็บน้ำแห้งได้ หรือในช่วงฤดูฝนมีปริมาณน้ำท่ามากจะยอมให้น้ำท่าไหลเข้าอ่างเก็บน้ำจนกระทั่งเต็มและส่วนที่เกินสามารถไหลล้นออกไปจากอ่างเก็บน้ำได้ (วิธีการนี้มีความเหมาะสมในกรณีที่ต้องการผลรวมของการขาดแคลนน้ำตลอดช่วงเวลาน้อยที่สุด) ผลการศึกษาพบว่า เกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำโดยอาศัยหลักการอนุรักษ์น้ำสามารถลดดัชนีการขาดน้ำ (Overall Deficit Index) ซึ่งเป็นผลรวมของการขาดน้ำยกกำลังสองได้ดีกว่าการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำตามเกณฑ์การปฏิบัติงานมาตรฐาน

(Hong-bin FANG et al., 2014) ได้ประยุกต์เกณฑ์ปฏิบัติการการอ่างเก็บน้ำภายใต้เกณฑ์ water diversion rule, a hedging rule based on an aggregated reservoir and a storage allocation rule เพื่อหาเกณฑ์การปฏิบัติการที่เหมาะสมสำหรับอ่างเก็บน้ำสองอ่างเก็บน้ำที่ขนานกัน มีการผันน้ำและมีความต้องการใช้น้ำร่วมกัน โดยประยุกต์ใช้เทคนิค improved particle swarm optimization (IPSO) ในพื้นที่ศึกษาคืออ่างเก็บน้ำ Biliuhe และ อ่างเก็บน้ำ Yingnahe ตั้งอยู่ในมณฑลเหอหนิง ประเทศจีน โดยทำการเสนอค่าเกณฑ์การค้นหาแตกต่างกันไปทั้งหมด 5 สถานการณ์ ผลการศึกษาพบว่า เกณฑ์การปฏิบัติการที่ได้นำเสนอโดยการประยุกต์ใช้ 3 เกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำร่วมกันนี้ มีประสิทธิภาพในการลดการขาดแคลนน้ำและมีการแจกจ่ายน้ำอย่างเป็นระบบมากกว่าการใช้เกณฑ์ใดเกณฑ์หนึ่งในการดำเนินการอ่างเก็บน้ำ

(Javad and Mojtaba., 2019) ได้ประยุกต์ใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule มาดำเนินการอ่างเก็บน้ำเขื่อน Zhaveh เพื่อค้นหาการดำเนินการอ่างเก็บน้ำที่ดีที่สุดของเขื่อน Zhaveh โดยใช้อัลกอริทึม ค้างควว เนื่องจากเขื่อน Zhaveh เป็นเขื่อนที่สำคัญของอิหร่าน มีการใช้น้ำทำอย่าง

ที่ยากต่อการจัดการ ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะเลือกมาประเมินในการศึกษานี้โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือลดการขาดแคลนน้ำ โดยจะทำการเปรียบเทียบกันกับกับเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน โดยพื้นที่ศึกษาคือ อ่างเก็บน้ำ Zhaveh ตั้งอยู่บนแม่น้ำ Sirvan ทางตะวันตกของอิหร่าน ความจุ สูงสุดของอ่างเก็บน้ำอยู่ที่ 169 ล้านลูกบาศก์เมตร (MCM) ต่ำสุด 27 ล้านลูกบาศก์เมตร มีปริมาณน้ำท่าไหลเข้าเฉลี่ยปีละ 8.11 ล้านลูกบาศก์เมตร เลือกใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำ 2 แบบคือ Standard operating policy และ Hedging rule ด้วย Bat Algorithm ผลการศึกษาพบว่า การใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule จะมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้ลดปริมาณการขาดแคลนน้ำลงได้อย่างมาก และ Bat Algorithm สามารถค้นหาค่าที่เหมาะสมสูงสุดในปัญหาการดำเนินการอ่างเก็บน้ำนี้ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อนำมาเปรียบเทียบผลลัพธ์จากวิธี NLP ที่หาค่าคำตอบได้อย่างแม่นยำ การใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule สามารถลดปริมาณการขาดแคลนน้ำได้ดีกว่าเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน

(Men, B. et al., 2019) งานวิจัยนี้วิเคราะห์และปรับปรุงเกี่ยวกับเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ Hedging rule และวิเคราะห์เหตุผลของการจำกัดการจ่ายน้ำตามความแตกต่างระหว่างผู้ใช้น้ำเมื่อเกิดการขาดแคลนน้ำ จากเดิมที่ HR จะลดการขาดแคลนน้ำในช่วงเวลาปัจจุบันลงโดยการทำให้เกิดการขาดแคลนน้ำล่วงหน้าทีละน้อย ๆ แต่ไม่ได้คำนึงถึงการลดการใช้น้ำที่ลดการขาดแคลนนั้นว่านำไปใช้ด้วยวัตถุประสงค์ใด ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียจากการขาดแคลนน้ำขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จะปรับปรุง HR ให้สามารถแจกจ่ายน้ำได้โดยคำนึงถึงลำดับความสำคัญของการใช้น้ำ โดยเลือกใช้พื้นที่ศึกษาคือ โดยจะทำการเปรียบเทียบกันระหว่าง HR ที่ปรับปรุง, HR แบบดั้งเดิม และ Standard operating Policy ผลการศึกษาพบว่า HR ทั้งสองแบบนี้ สามารถลดการขาดแคลนน้ำอย่างรุนแรงได้ดีกว่า SOP แต่ HR ที่ปรับปรุง สามารถลดการสูญเสียจากการขาดแคลนน้ำได้ดีกว่า HR แบบดั้งเดิม

ด้านพัฒนาเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization Technique) สำหรับค้นหาโค้งควบคุม ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีได้แก่ วิธีแบบจำลองการเลียนแบบ (Simulation Study Model, SM) วิธีโปรแกรมเชิงพลวัต (Dynamic Programming, DP) และเทคนิคเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) เป็นต้น ซึ่งมีทั้งงานวิจัยที่ดำเนินการในประเทศไทยและต่างประเทศ ส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้หาโค้งควบคุมรายเดือนของอ่างเก็บน้ำโดยใช้ฟังก์ชันของการค้นหาค่าตอบโค้งควบคุมเพียงเกณฑ์ที่แตกต่างกันไปตามบริบทของอ่างเก็บน้ำนั้น ๆ รายละเอียดของงานที่เกี่ยวข้องพอสรุปได้ดังต่อไปนี้

วิธีการศึกษาเลียนแบบ (Simulation) ในประเทศไทยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้ นั้น มีการศึกษาและนำผลมาใช้งานจริงกับอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (Electricity Generating Authority of Thailand--EGAT, 2002; EGAT, 2004) ซึ่งเป็นผู้กำกับดูแลอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่เกือบทั้งหมดของประเทศการค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมของไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) จะใช้แบบจำลอง HEC-3 (U.S. HEC-3, 1974) ในการทำปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการค้นหาคำตอบคือ เพื่อให้เกิดการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ซึ่งในการค้นหาโค้งควบคุมที่ให้ค่าของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดนี้จะสมมุติโค้งควบคุมเริ่มต้นที่เป็นไปได้ (Initial Feasible Rule Curves) และปรับโค้งควบคุมนี้แบบลองผิดลองถูก (Trial and Error) จนกระทั่งได้โค้งควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งให้การขาดแคลนนํ้าในระยะยาวน้อยที่สุดตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด ซึ่งวิธีนี้ กฟผ. ได้ใช้ในการหาโค้งควบคุมรายเดือนของอ่างเก็บน้ำ เช่น เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิติ์ เขื่อนอุบลรัตน์ เขื่อนบางลาง และเขื่อนห้วยกุ่ม เป็นต้น นอกจากนี้ (Chaiyasing, 1997) ก็ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง HEC-5 หาโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์โดยการสร้างโค้งควบคุมย่อยสำหรับวัตถุประสงค์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า การชลประทานและการป้องกันน้ำท่วม แล้วจึงนำโค้งควบคุมย่อยเหล่านั้นมาจำลองกับระบบอ่างเก็บน้ำเพื่อหาโค้งควบคุมที่ให้ค่าการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด โดยการปรับระดับเก็บกักในแต่ละเดือนแบบลองผิดลองถูก (Trial and Error) เพื่อให้เกิดการขาดแคลนและการระบายน้ำล้นน้อยที่สุดเช่นกัน

วิธีการศึกษาเลียนแบบ (Simulation) ในต่างประเทศ (Jain et al., 1998) ได้พัฒนาแบบจำลองที่ใช้เทคนิคการศึกษาเลียนแบบเพื่อหาโค้งควบคุมรายเดือนที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำอเนกประสงค์ในระบบลุ่มน้ำ Sabarmati ของประเทศอินเดีย โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการค้นหาคำตอบคือเพื่อให้เกิดการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด โดยการสมมุติโค้งควบคุมเริ่มต้นที่เป็นไปได้ (Initial Feasible Rule Curves) และปรับโค้งควบคุมนี้แบบลองผิดลองถูก (Trial and Error) จนกระทั่งได้โค้งควบคุมที่เหมาะสมเช่นกัน อย่างไรก็ตามการหาโค้งควบคุมโดยวิธีการศึกษาเลียนแบบข้างต้นนี้จะซับซ้อนสำหรับกรณีหลายอ่างเก็บน้ำในระบบเดียวกัน ยิ่งไปกว่านั้นเนื่องจากกระบวนการในการค้นหาคำตอบต้องอาศัยประสบการณ์ของวิศวกรผู้คำนวณคำตอบที่ได้จึงไม่แน่ว่าจะเป็นโค้งควบคุมที่เหมาะสมหรือไม่

(Chaleeraktragoon and Kangrang., 2015) ศึกษาวิธีการค้นหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มีความเหมาะสมและนำเสนอการใช้ฟังก์ชันความราบเรียบแบบมีข้อจำกัด (Smooth Function Constraint) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้สำหรับการค้นหาโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำที่มีความ

เหมาะสมโดยใช้ GA ร่วมกับการเชื่อมต่อกับวิธีแบบจำลองสถานการณ์สำหรับการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ ซึ่งได้นำไปประยุกต์ใช้กับอ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ ในลุ่มน้ำเจ้าพระยา ซึ่งในการศึกษาได้กำหนดค่าความขาดแคลนน้ำเฉลี่ยเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงสถานการณ์ของการขาดแคลนน้ำและการปล่อยน้ำจากอ่างเก็บน้ำ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าค่าการเคลื่อนที่ของค่าเฉลี่ยที่เป็นเงื่อนไขของการค้นหาสามารถลดการเปลี่ยนแปลงของโค้งควบคุมและเมื่อนำไปประยุกต์ในสำหรับการปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำจริงนั้น พบว่าโค้งควบคุมที่สร้างจาก GA สามารถทำให้ช่วยบรรเทาสถานการณ์การขาดแคลนน้ำและการปล่อยน้ำที่เหมาะสมกว่าโค้งควบคุมที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันนี้ รวมถึงพบว่าการใช้แบบจำลอง GA ร่วมกับการเชื่อมต่อกับวิธีแบบจำลองสถานการณ์ โดยมีฟังก์ชันความราบเรียบแบบมีข้อจำกัดสามารถค้นหาคำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบจำลองที่ไม่มีข้อจำกัด

วิธีโปรแกรมเชิงพลวัต (Dynamic Programming, DP) ซึ่งมีจุดเด่นที่สามารถนำมาใช้ค้นหาตอบสำหรับปัญหาที่ไม่เชิงเส้น และปัญหาที่มีการตัดสินใจหลายขั้นตอน (Bellman, 1959) ดังนั้น DP จึงเหมาะกับปัญหาที่เป็นขั้นตอนอย่างการหาโค้งควบคุมที่เป็นรายเดือนหรือรายสัปดาห์ เพราะคำตอบที่ได้สัมพันธ์กันตลอดทั้งระยะเวลา 12 เดือนที่พิจารณาสำหรับการหาโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำโดยใช้ DP นั้น (Chaleeraktragoon and Kangrang., 2005) ได้พัฒนาโปรแกรมเชิงพลวัตแบบมีเงื่อนไข (Conditional Dynamic Programming, CDP) ให้เป็นทางเลือกในการค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสม โดยประยุกต์ใช้ค้นหาคำตอบโค้งควบคุมรายเดือนที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำภูมิพลและเขื่อนสิริกิติ์ เทคนิค CDP เป็นเทคนิคสำหรับปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) ที่มีการค้นหาคำตอบเป็นขั้น ๆ (Stage) ซึ่งทำให้เหมาะสำหรับนำมาใช้หาโค้งควบคุมที่ระยะเวลาอย่างไรก็ตาม DP ก็มีขีดจำกัดตรงที่ว่าเมื่อตัวแปรอธิบายสภาพระบบ (State Variables) มากจะทำให้การคำนวณค้นหาคำตอบด้วย DP ยากขึ้น

เทคนิคเจเนติกอัลกอริธึม (Genetic Algorithm, GA) ในประเทศไทย (สมฤทัย และ สุวัฒนา., 2547) ได้เสนอวิธี GA สำหรับกำหนดระดับควบคุมที่เหมาะสมในการจัดการอ่างเก็บน้ำเขื่อนลพาวตามความต้องการด้านท้ายน้ำในที่นี้ใช้ค่าสูงสุดของพื้นที่ภายในโค้งควบคุมระดับน้ำสูงสุดและต่ำสุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ อย่างไรก็ตามโค้งควบคุมที่ได้จากเทคนิค GA ร่วมกับแบบจำลองการศึกษาเลียนแบบข้างต้นยังมีความแปรปรวนของโค้งไม่สอดคล้องกับการใช้งานจริง

เทคนิคเจเนติกอัลกอริธึม (Genetic Algorithm, GA) ในต่างประเทศที่ปรากฏนั้น พบว่า (Chang., 2002) ได้ประยุกต์ GA ร่วมกับ HEC-5 เพื่อหาโค้งควบคุมรายเดือนที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำในประเทศไต้หวัน ซึ่งเป็นการเชื่อมการศึกษาเลียนแบบของระบบลุ่มน้ำเข้ากับการค้นหาคำตอบของเทคนิคเจเนติกอัลกอริธึม โดยใช้ดัชนีของการขาดแคลนน้ำ (Shortage Index) น้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาคำตอบ ต่อมา (Chang et al. 2003) ได้ประยุกต์ GA ร่วมกับ HEC-3 เพื่อหาโค้งควบคุมการปล่อยน้ำล้นตะกอนที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำในประเทศไต้หวันอีกเช่นกัน โดยการเชื่อมการศึกษาเลียนแบบของระบบลุ่มน้ำเข้ากับการค้นหาคำตอบของเทคนิคเจเนติกอัลกอริธึม และใช้ดัชนีของการขาดแคลนน้ำ (Shortage Index) น้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาคำตอบเช่นเดียวกัน จากนั้น (Chang, J.F. et al., 2005) ก็ได้พัฒนา GA แบบ Binary Coded และแบบ Real Coded ร่วมกับ HEC-5 เพื่อหาโค้งควบคุมรายเดือนที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำอเนกประสงค์ในประเทศไต้หวันอีก ซึ่งเป็นการเชื่อมการศึกษาเลียนแบบของระบบลุ่มน้ำแบบอ่างเก็บน้ำเดียวเข้ากับการค้นหาคำตอบของเทคนิคเจเนติกอัลกอริธึม โดยใช้ดัชนีของการขาดแคลนน้ำ (Shortage index) น้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหาคำตอบ ซึ่งให้ผลดีกว่าคำตอบเดิม (โค้งควบคุมที่ใช้อยู่เดิม) ขณะที่ GA แบบ Real Coded จะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบ Binary Coded

(Kangrang et al., 2009) ได้ใช้อัลกอริธึมมาประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำอุบลรัตน์สำหรับความต้องการใช้น้ำต่าง ๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมสูงสุดโดยใช้โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำเป็นเครื่องมือขั้นพื้นฐาน ซึ่งโค้งควบคุมดังกล่าวจะแสดงขอบเขตบนและขอบเขตล่างเพื่อให้เกิดการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดในระยะยาวโดยโค้งได้ถูกใช้ร่วมกับเกณฑ์อื่น ๆ ที่พิจารณาในช่วงระยะสั้น ๆ เป็นรายวันหรือรายสัปดาห์โดยปริมาณที่เหลือจะต้องอยู่ภายในช่วงของโค้งควบคุมของเดือนนั้น ๆ ผลการศึกษาพบว่าโค้งควบคุมที่ได้จากแบบจำลองที่เสนอมีลักษณะรูปร่างที่ใกล้เคียงกับโค้งควบคุมเดิม เมื่อนำโค้งควบคุมนี้ไปจำลองสภาพสมดุลของอ่างเก็บน้ำอุบลรัตน์

(วิษณุกรณ์, 2553) ได้ศึกษาโดยใช้โค้งควบคุมรายเดือนที่ได้จากอัลกอริธึมการจำลองการอบเหนียวของอ่างเก็บน้ำสิรินธรซึ่งมีลักษณะไม่สอดคล้องกับโค้งควบคุมเดิมโดยโค้งควบคุมใหม่จะมีลักษณะต่ำลงมาจากโค้งควบคุมเดิม เส้นขอบเขตบนในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนธันวาคมจึงทำให้มีพื้นที่เก็บกักน้ำเพิ่มได้ดีกว่าโค้งควบคุมเดิมในช่วงฤดูน้ำหลาก ส่วนเส้นขอบเขตล่างในช่วงฤดูแล้งสามารถปล่อยน้ำตามความต้องการได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโค้งควบคุมรายเดือนเดิมของอ่างเก็บน้ำสิรินธรและอ่างเก็บน้ำอุบลรัตน์ โค้งควบคุมใหม่ที่ได้เส้นขอบเขตบนระดับเก็บกักสูงชันกว่าโค้งควบคุมเดิมในช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนธันวาคมทำให้โค้งควบคุมที่ได้จากอัลกอริธึมการจำลองการ

อบเหนียวนี้สามารถเก็บกักปริมาณน้ำได้น้อยกว่าโคงควบคุมเดิม แต่ในช่วงเดือนตุลาถึงเดือนธันวาคม โคงควบคุมใหม่สามารถเก็บกักน้ำไว้ใช้ในช่วงฤดูแล้งเพื่อตอบสนองความต้องการใช้น้ำได้ดีกว่าโคงควบคุมเดิม ส่วนเส้นล่างที่ได้จากโคงควบคุมใหม่มีลักษณะสอดคล้องกับโคงควบคุมเดิมแต่ในช่วงฤดูแล้ง โคงควบคุมใหม่มีระดับเก็บกักต่ำกว่าโคงควบคุมเดิมจึงทำให้มีโอกาสที่จะปล่อยน้ำตามความต้องการได้ดีกว่าโคงเดิม และเมื่อนำโคงควบคุมใหม่และโคงควบคุมเดิมของอ่างเก็บน้ำทั้งสองไปจำลองระบบกับข้อมูลสังเคราะห์จำนวน 100 ชุด โดยการลดปริมาณน้ำท่าลง 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ พบว่าโคงควบคุมใหม่ของอ่างเก็บน้ำสิรินธรและอ่างเก็บน้ำอุบลรัตน์ สามารถบรรเทาสถานการณ์ภัยแล้งและอุทกภัยได้ดีกว่าโคงควบคุมเดิม

(รัตนา, 2554) ได้พัฒนาโคงควบคุมโดยใช้วิธีดิฟเฟอร์เรนเชียลเอฟโวลูชันและเมื่อทำการเปรียบเทียบโคงควบคุมอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ด้วยระเบียบวิธีการดิฟเฟอร์เรนเชียลเอฟโวลูชันกับโคงควบคุมอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีการอื่นได้แก่ ระเบียบวิธีการเชิงพันธุกรรม ซึ่งเป็นระเบียบวิธีการล่าสุดที่ลู่อู่เข้าหาคำตอบแบบ Global โดยสามารถแก้ปัญหาที่มีคำตอบอยู่เป็นจำนวนมาก มีขนาดใหญ่และสลับซับซ้อน และหาคำตอบได้รวดเร็วกว่าวิธีการอื่น ๆ พบว่าทั้งสองวิธีให้โคงควบคุมของอ่างเก็บน้ำในลักษณะเหมือนกัน การเกิดการขาดแคลนน้ำและการปล่อยน้ำส่วนเกินเหมือนกันเนื่องจากทั้งสองวิธีเป็นระเบียบวิธีการที่ลู่อู่เข้าหาคำตอบแบบ Global เหมือนกัน ซึ่งแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นด้วยระเบียบวิธีการที่ลู่อู่เข้าหาคำตอบได้รวดเร็วกว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม เนื่องจากมีโครงสร้างของระเบียบวิธีการแตกต่างกันและพารามิเตอร์ที่ใช้ของระเบียบวิธีการดิฟเฟอร์เรนเชียลเอฟโวลูชันเป็นจำนวนจริงจึงทำให้ลู่อู่เข้าหาคำตอบได้รวดเร็วกว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีการเชิงพันธุกรรม ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีดิฟเฟอร์เรนเชียลเอฟโวลูชัน สามารถค้นหาโคงควบคุมของอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมอย่างมีประสิทธิภาพ นำไปใช้ประโยชน์ในการบริหารจัดการน้ำได้ดี

(เชษฐพันธ์, 2555) ได้หาเกณฑ์การจัดสรรน้ำที่เหมาะสมด้วยกระบวนการอาณานิคมมดกรณีศึกษา โครงการส่งและบำรุงรักษาลำปาว ซึ่งการใช้วิธีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์เพื่อคัดเลือกทางเลือกโดยใช้เทคนิคของกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytical Hierarchy; AHP) ในสถานะที่ปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำน้อย จะให้ความสำคัญด้านเศรษฐกิจ 43.1% ด้านความเท่าเทียม 33.2% ด้านความเชื่อมั่น 23.7% ส่งผลให้หากปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำน้อยเจ้าหน้าที่ส่วนใหญ่ที่มีความชำนาญในด้านการบริหารจัดการน้ำ รับผิดชอบพื้นที่ชลประทานและสามารถชี้แจงเหตุผลการจัดสรรน้ำ เลือกที่จะดำเนินการลดพื้นที่การเกษตรลง 3% ประมาณ 7,985 ไร่ คิดเป็นผลตอบแทน

ประมาณ 24,755,298 บาท ลดพื้นที่เพาะเลี้ยงสัตว์น้ำลง 3% ประมาณ 233 ไร่ คิดเป็นผลตอบแทน ประมาณ 4,909,080 บาท และลดปริมาณการจัดสรรน้ำรักษาสมดุลนิเวศวิทยาสูง 3% คิดเป็นเดือน ละประมาณ 0.39 ล้าน ลบ.ม. แสดงว่าโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาลำปาว ให้ความสำคัญด้าน เศรษฐกิจ สังคม และการจัดการ หลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาความขัดแย้งด้านความต้องการใช้น้ำแต่ละ กิจกรรม ตลอดจนตำแหน่งพื้นที่ทำการเกษตร ไม่ว่าจะเป็นช่วงต้นคลอง กลางคลอง และปลายคลอง ปัญหาความขัดแย้งของตำแหน่งพื้นที่ทำการเกษตรค่อนข้างละเอียดอ่อน การแก้ปัญหาการจัดการน้ำ ไม่ว่าจะเป็นเพิ่มหรือลดพื้นที่ทำการเกษตร ควรที่จะมีการสร้างองค์ความรู้กระบวนการชุมชนเข้มแข็ง เป็นแนวทางในการจัดสรรน้ำโดยเกษตรกรมีส่วนร่วม ซึ่งอาจจะต้องใช้กระบวนการมีส่วนร่วมต่าง ๆ อาทิ กระบวนการ PIM (Participatory Irrigation Management 11 ขั้นตอน) กระบวนการ JMC (Joint Management Committee of Irrigation) และกระบวนการชุมชนเข้มแข็งต่าง ๆ มาประยุกต์ ปรับใช้ ตลอดจนการประสานความร่วมมือของคณะกรรมการจัดการชลประทาน ซึ่งประกอบด้วย เกษตรกร กรมชลประทาน องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในด้านต่าง ๆ

(วิทวัส, 2557) ได้หาเกณฑ์การจัดสรรน้ำที่เหมาะสมด้วยเทคนิคคนกุดเหว่าซึ่งจากการ ประเมินประสิทธิภาพของโค้งกฎปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ ของอ่างเก็บน้ำที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ด้วยเทคนิคคนกุดเหว่า (CS) ผลการประเมินพบว่าโค้งกฎปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำจากแบบจำลองที่ พัฒนาขึ้นโดยแบ่งออกเป็นกรณีดังนี้ กรณีที่ 1 ความต้องการใช้น้ำปกติโดยใช้ข้อมูลน้ำไหลเข้าอ่างเก็บ น้ำ 44 ปี (พ.ศ. 2511-2554) สถานการณ์การขาดแคลนน้ำ ความถี่ของปริมาณน้ำที่ขาดแคลน ปริมาณน้ำที่ขาดแคลนเฉลี่ย และช่วงเวลาการขาดแคลนเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ 0.743, 78.194 และ 3.635 ตามลำดับ กรณีที่ 2 ความต้องการใช้น้ำปกติโดยใช้ข้อมูล สังเคราะห์น้ำต้นทุนที่ไหลเข้าอ่าง เก็บน้ำรายเดือนจากข้อมูลเดิม 44 ปี จำนวน 100 ชุดเหตุการณ์ สถานการณ์การขาดแคลนน้ำ ความถี่ ของปริมาณน้ำที่ขาดแคลน ปริมาณน้ำที่ขาดแคลนเฉลี่ย และช่วงเวลาการขาดแคลนเฉลี่ย มีค่าลดลง เท่ากับ 0.763, 84.109 และ 3.980 ตามลำดับ สถานการณ์การไหลล้น พบว่า ความถี่ของการไหลล้น การไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ย และช่วงเวลาการไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ย มีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.929, 917.501 และ 13.624 ตามลำดับ สถานการณ์การไหลล้น พบว่า ความถี่ของการไหลล้น การ ไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ย มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.945, 910.468 และ 16.933 ตามลำดับ กรณีที่ 3 กรณีเพิ่มพื้นที่ชลประทาน 50,000 ไร่ โดยใช้ข้อมูลที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ 44 ปี (พ.ศ. 2511-2554) สถานการณ์การขาดแคลนน้ำ ความถี่ของปริมาณน้ำที่ขาดแคลน ปริมาณน้ำที่ขาดแคลนเฉลี่ย และ ช่วงเวลาการขาดแคลนเฉลี่ย มีค่าลดลงเท่ากับ 0.749, 127.035 และ 3.712 ตามลำดับ สถานการณ์

การไหลล้น พบว่า ความถี่ของการไหลล้น การไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ย และช่วงเวลาการไหลล้น จากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ย มีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.923, 816.966 และ 13.443 ตามลำดับ กรณีที่ 4 กรณี เพิ่มพื้นที่ชลประทาน 50,000 ไร่ โดยใช้ข้อมูลสังเคราะห์น้ำต้นทุนที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายเดือน จาก ข้อมูลเดิม 44 ปี จำนวน 100 ชุดเหตุการณ์ สถานการณ์การขาดแคลนน้ำ ความถี่ของปริมาณน้ำที่ ขาดแคลน ปริมาณน้ำที่ขาดแคลนเฉลี่ย และช่วงเวลาการขาดแคลนเฉลี่ย มีค่าลดลงเท่ากับ 0.800, 144.540 และ 4.765 ตามลำดับ สถานการณ์การไหลล้น พบว่า ความถี่ของการไหลล้น การไหลล้น จากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ย และช่วงเวลาการไหลล้นจากอ่างเก็บน้ำเฉลี่ย มีค่าเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.915, 835.837 และ 11.588 ตามลำดับ

(วิรัตน์, 2557) ผลการศึกษาพบว่าโค้งควบคุมที่ได้จากวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่ม อนุภาคร่วมกับแบบจำลองการเลียนแบบ มีรูปร่างคล้ายคลึงกับโค้งควบคุมเดิม โดยโค้งควบคุมใหม่ เส้นล่างจะสูงกว่าโค้งควบคุมเดิมในช่วงฤดูแล้ง คือตั้งแต่เดือนธันวาคมถึงเดือนพฤษภาคม เพื่อเก็บกัก น้ำไว้ตอบสนองความต้องการใช้น้ำ ส่วนโค้งควบคุมใหม่เส้นบนต่ำกว่าโค้งควบคุมเดิมในช่วงเดือน มิถุนายนถึงสิงหาคม ทำให้ต้องการพร่องน้ำออกจากอ่างเก็บน้ำเพื่อลดความเสี่ยงของโอกาสที่จะเกิด ปัญหาน้ำท่วมในช่วงฤดูฝน ตลอดจนสามารถรองรับน้ำได้เพิ่มขึ้น ส่วนผลการประเมินประสิทธิภาพ ของโค้งควบคุมใหม่ที่ได้พบว่า สถานการณ์น้ำขาดแคลนและน้ำไหลล้นมีค่าลดลงเล็กน้อย และเมื่อ ทดลองเพิ่มพื้นที่ชลประทานเพิ่มอีก 50,000 ไร่ พบว่าโค้งควบคุมใหม่นี้ยังสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการ ปล่อน้ำได้ แต่สถานการณ์น้ำขาดแคลนจะเพิ่มสูงขึ้นอีก โดยสรุปวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบ กลุ่มอนุภาคร่วมกับแบบจำลองการเลียนแบบสามารถประยุกต์ใช้ค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมของ อ่างเก็บน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และโค้งควบคุมใหม่สามารถบรรเทาสถานการณ์น้ำขาดแคลนและ น้ำไหลล้นได้ดีกว่าเดิมด้วย

(เกียรติพงศ์, 2558) ได้ใช้เทคนิคการค้นหาแบบทาบ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ทั้ง 3 รูปแบบข้างต้นนั้นจะได้โค้งควบคุมใหม่ที่มีรูปร่างคล้ายคลึงกับโค้งควบคุมเดิม เนื่องจากอิทธิพลของน้ำท่าในแต่ละฤดูกาลและเงื่อนไขอื่นที่เหมือนกัน เมื่อนำโค้งควบคุมใหม่เหล่านี้ ไปทดสอบและเปรียบเทียบกับโค้งควบคุมเดิมที่ใช้อยู่พบว่าโค้งใหม่ที่หาโดยใช้ค่าเฉลี่ยของการขาด แคลนน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในกระบวนการค้นหาสามารถบรรเทาสภาวะน้ำท่วมและ น้ำขาดแคลนได้ดีกว่าโค้งที่เกิดจากการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์อื่นและยังดีกว่าโค้งควบคุมเดิมด้วย หลังจากนั้นนำโค้งควบคุมที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้อยที่สุดมาทดสอบและเปรียบเทียบกับโค้งควบคุมเดิมเพิ่มเติมอีก โดยการเพิ่มการใช้น้ำชลประทาน 20% และเพิ่มปริมาณฝนใช้การ

20% ใช้ข้อมูลการไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำที่สังเคราะห์ในอดีตจำนวน 47 ปี 100 ชุดข้อมูล พบว่ายิ่งดีกว่า โค้งควบคุมเดิมอีกด้วย

(**ตระการ, 2558**) ได้ใช้เกณฑ์การจัดสรรน้ำที่เหมาะสมด้วยเทคนิควิธีการอาณาจักรผึ้ง ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทั้ง 3 รูปแบบข้างต้นนั้นจะได้โค้งควบคุมใหม่ที่มีรูปร่างคล้ายคลึงกับโค้งควบคุมเดิม เนื่องจากอิทธิพลของน้ำท่าในแต่ละฤดูกาลและเงื่อนไขอื่นที่เหมือนกัน เมื่อนำโค้งควบคุมใหม่เหล่านี้ไปทดสอบและเปรียบเทียบกับโค้งควบคุมเดิมที่ใช้อยู่พบว่าโค้งใหม่ที่หาโดยใช้ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ในกระบวนการค้นหาสามารถบรรเทาสภาวะน้ำท่วมและน้ำขาดแคลนได้ดีกว่าโค้งที่เกิดจากการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์อื่นและยังดีกว่าโค้งควบคุมเดิมด้วย หลังจากนั้นนำโค้งควบคุมที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดมาทดสอบและเปรียบเทียบกับโค้งควบคุมเดิมเพิ่มเติมอีก โดยการเพิ่มการใช้น้ำชลประทาน 20% และเพิ่มปริมาณฝนใช้การ 20% ใช้ข้อมูลการไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำที่สังเคราะห์ในอดีตจำนวน 47 ปี 100 ชุดข้อมูล พบว่ายิ่งดีกว่าโค้งควบคุมเดิมอีกด้วย

(**ปรกรณ์ และปรกรณ์., 2561**) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค้นหาโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ โดยใช้วิธีฮาร์โมนิเซอร์ร่วมกับแบบจำลองการเลียนแบบ โดยพิจารณาปริมาณการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดร่วมกับ ปริมาณน้ำไหลล้นอ่างน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในกระบวนการค้นหาคำตอบ พบว่าโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ ที่ได้จากวิธีหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีฮาร์โมนิเซอร์ร่วมกับแบบจำลองการเลียนแบบมีประสิทธิภาพที่ดีเนื่องจากไม่มีเหตุการณ์น้ำ ขาดแคลนและน้ำไหลล้นอ่างเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ทดสอบจำนวน 216 เดือน เมื่อเทียบกับโค้งกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำเดิมซึ่งมีน้ำขาดแคลนจำนวน 11 ครั้ง โดยโค้งควบคุมเส้นกลางใหม่มีรูปร่างแตกต่างจากโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำ เดิมเล็กน้อยคือในช่วงฤดูแล้ง จะสูงกว่าโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำ เดิมเล็กน้อยเพื่อเก็บกักน้ำ ไว้ตอบสนองความต้องการใช้น้ำส่วนโค้งควบคุมเส้นบนใหม่ จะสูงกว่าโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำเดิม เพื่อกักเก็บน้ำไว้ตอบสนองความต้องการใช้น้ำ

2.6.2 การประยุกต์ใช้เทคนิค Harris Hawks Optimization ในงานอื่น ๆ

(**Heidari et al., 2019**) ได้นำเสนอการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ได้รับแรงบันดาลใจจากธรรมชาติแบบอิงตามฐานประชากร ซึ่งมีชื่อเรียกว่า Harris Hawks Optimizer (HHO) แรงบันดาลใจหลักของ HHO คือพฤติกรรมความร่วมมือและการไล่ล่าเหยื่อของเหยี่ยวแฮร์ริสในธรรมชาติที่เรียกว่า surprise

pounce ในกลยุทธ์ที่ชาญฉลาดนี้เหยี่ยวหลายตัวจะร่วมมือกันจับเหยื่อจากทิศทางที่แตกต่างกันเพื่อพยายามทำให้มันตกใจ เหยี่ยวแฮร์ริส ทำให้เห็นถึงรูปแบบการไล่ล่าหลากหลายรูปแบบตามลักษณะของสถานการณ์และรูปแบบการหลบหนีของเหยื่อ งานวิจัยนี้จึงเลียนแบบรูปแบบและพฤติกรรมทางคณิตศาสตร์เพื่อพัฒนาอัลกอริธึมการค้นหาที่เหมาะสม ประสิทธิภาพของ HHO Optimizer ที่เสนอนั้นได้รับการตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบกับเทคนิคที่ได้รับแรงบันดาลใจจากธรรมชาติอื่น ๆ จากปัญหามาตรฐาน 29 ข้อและปัญหาทางจริงทางวิศวกรรมหกประการ ผลลัพธ์ทางสถิติและการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึม HHO ให้ผลลัพธ์ที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิค metaheuristic อื่น ๆ ที่ได้รับการยอมรับเป็นอย่างดี

(Ahmad et al., 2021) ได้ประยุกต์ใช้อัลกอริธึม HHO นำไปใช้กับครีบบระบายความร้อนแบบไมโครแชนเนลเพื่อลดการสร้างความเอนโทรปี ในการกำหนดรูปแบบการถ่ายเทความร้อนของไมโครแชนเนลได้ทำการพิจารณาถึงขอบเขตของความเร็วในการสิ้นและอุณหภูมิของการสูมอุณหภูมิ วัสดุและเชื้อเพลิงต่าง ๆ ได้รับการประเมินเพื่อพิจารณาการออกแบบที่ดีที่สุดของไมโครแชนเนล เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักของบทความนี้คือการประเมินความสามารถในการค้นหาและสำรวจของอัลกอริทึมแฮร์ริสฮอว์ก ผลการเปรียบเทียบกับ การเพิ่มประสิทธิภาพจับกลุ่มอนุภาคที่ใช้กันทั่วไป ขั้นตอนวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพฝั่งขั้นตอนวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพดั้งเดิม ในที่สุดผลการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์และผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรม ผลลัพธ์แสดงว่าอัลกอริทึมแฮร์ริสฮอว์กมีประสิทธิภาพที่เหนือกว่าในการลดการสร้างความเอนโทรปีของไมโครแชนเนล เมื่อเทียบกับอัลกอริธึมดังกล่าวข้างต้น ยิ่งไปกว่านั้นผลการหาค่าเหมาะที่สุดบ่งชี้ว่าการใช้ทองแดงสำหรับไมโครแชนเนล และแอมโมเนียเนื่องจากสารหล่อเย็นนำไปสู่การสร้างเอนโทรปีที่น้อยที่สุดดังนั้นจึงถือเป็นการออกแบบที่ดีที่สุด

(Rodríguez-Esparza, E., et al., 2020) ได้ค้นหาขั้นตอนที่สำคัญในการประมวลผลภาพ เพราะช่วยให้การแสดงผลภาพง่ายขึ้นและช่วยในการวิเคราะห์ วิธี thresholding หลายระดับนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับการแบ่งกลุ่ม mammograms แบบดิจิทัลเมื่อเทียบกับ thresholding ระดับ bi แบบคลาสสิกเนื่องจากต้องใช้จำนวน intensities ที่สูงขึ้นเพื่อเป็นตัวแทนของภูมิภาคต่าง ๆ ในภาพ ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีเทคนิคมากมายและแตกต่างกันสำหรับการแบ่งส่วนแบบหลายระดับ อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้ส่วนใหญ่ไม่ได้รับการแบ่งภาพที่ดีและราคาสูง เมื่อเร็ว ๆ นี้เกณฑ์ทางสถิติ เช่น Otsu, Kapur และ cross-entropy ได้ถูกนำมาใช้ร่วมกับกลยุทธ์การวิวัฒนาการและการจับกลุ่มเพื่อตรวจสอบค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งส่วนแบบหลายระดับ ในบทความนี้เสนอวิธีการที่มี

ประสิทธิภาพสำหรับการแบ่งส่วนหลายระดับโดยใช้อัลกอริทึม Harris Hawks Optimization (HHO) และข้ามเอนโทรปีขั้นต่ำรายปีเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อยืนยันผลลัพธ์และประสิทธิภาพของเทคนิค HHO ได้รับการทดสอบผ่านชุดข้อมูลอ้างอิงมาตรฐานพร้อมฐานข้อมูลการแบ่งส่วนของ Berkeley และภาพทางการแพทย์ของเครื่องตรวจเต้านมด้วยระบบดิจิทัล ตัวแก้ปัญหาที่ใช้ HHO ที่เสนอนั้น ได้รับการตรวจสอบเปรียบเทียบกับเทคนิคการหาค่าเหมาะสมอื่น ๆ และอัลกอริทึมการเรียนรู้ของสมองกลสองวิธี K-mean และ Fuzzy IterAg ทำการเปรียบเทียบโดยใช้กลุ่มสามกลุ่ม กลุ่มแรกนี้คือ การแสดงความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพของ HHO โดยใช้การทดสอบ Wilcoxon และที่สองคือการตรวจสอบคุณภาพของภาพที่แบ่งกลุ่มโดยใช้การวัด PSNR, SSIM และ FSIM จากนั้นวิธีที่สามคือการตรวจสอบภาพที่แบ่งกลุ่มเมื่อเปรียบเทียบกับความจริงภาคพื้นดินผ่านตัวชี้วัด PRI, GCE และ Vol ผลการทดลองที่ได้รับการตรวจสอบโดยการวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอนั้น ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ในแง่ของคุณภาพความสม่ำเสมอและความแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ วิธีการตาม HHO นี้แนะนำการปรับปรุงวิธีการแบ่งส่วนอื่น ๆ ที่ใช้ใน งานวิจัยในปัจจุบัน

(Hosseini et al., 2019) ได้ศึกษาความมั่นคงของดินลาดเป็นหนึ่งในปัญหาที่ท้าทายที่สุดในโครงการวิศวกรรมโยธา เนื่องจากความซับซ้อนและความไม่เชิงเส้นตรงของปัญหานี้ การใช้แบบจำลองการทำนายอย่างง่ายจึงไม่เป็นไปตามความถูกต้องที่จำเป็นในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาด ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้คือเพื่อแนะนำการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงอภิปัญญาแบบใหม่ ได้แก่ Harris Hawks Optimization (HHO) เพื่อเพิ่มความแม่นยำของเทคนิคฟูเพอร์ตรอนหลายชั้นแบบดั้งเดิมในการทำนายปัจจัยด้านความปลอดภัยต่อหน้าฐานรากแบบแข็ง ด้วยวิธีนี้จะพิจารณาปัจจัยที่มีความเสถียรของความลาดเอียงสี่ประการ ได้แก่ มุมลาดชัน ตำแหน่งของฐานรากที่แข็งแรง ความแข็งแรงของดินและการค้ำยันการเสริมเติม การมีส่วนร่วมที่สำคัญของอัลกอริทึมนี้ต่อปัญหาเสถียรภาพของความลาดชันนั้นคือการปรับน้ำหนักการคำนวณของปัจจัยปรับสภาพเหล่านี้ ผลการวิจัยพบว่าการใช้ HHO ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการทำนายของ ANN สำหรับการวิเคราะห์ความลาดชันด้วยสถานะที่มองไม่เห็น ทำให้นำไปสู่การลดความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของรูทและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ 20.47% และ 26.97% ตามลำดับ นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจริงของปัจจัยด้านความปลอดภัยและผลลัพธ์ของ HHO – ANN ($R^2 = 0.9253$) มีค่ามากกว่า ANN ($R^2 = 0.8220$) ดังนั้น HHO ที่ถูกนำเสนอสามารถนำไปเพื่อใช้สำหรับการใช้งานที่คล้ายกันกับปัญหานี้ได้

(Shauket, S., et al., 2019) ในงานวิจัยนี้ได้นำอัลกอริธึมใหม่มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ Harris hawks optimization (HHO) ในการวิเคราะห์ความอ่อนแอของดินถล่มในอิหร่านตะวันตก ด้วยเหตุนี้ HHO จึงถูกสังเคราะห์ด้วยเครือข่ายประสาทเทียม (ANN) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ประกอบด้วย 208 ดินถล่มในอดีต รวมทั้งปัจจัยการปรับสภาพดินถล่ม 14 แห่ง - ระดับความสูง, ความลาดชัน, ความโค้งของแผน, ความโค้งของโปรไฟล์, ชนิดของดิน, ธรณีวิทยา, ระยะทางจากแม่น้ำ, ระยะห่างจากถนน, ระยะความคลาดเคลื่อน, ระดับความชื้น, ดัชนีพลังงานสตรีม (SPI), ดัชนีความเปียกชื้นของภูมิภาค (TWI), และปริมาณน้ำฝน - ถูกจัดทำขึ้นเพื่อพัฒนาเครื่องมือการทำนาย ANN และ HHO - ANN ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์แบบสัมบูรณ์มีการกำหนดเพื่อวัดความผิดพลาดด้านประสิทธิภาพของแบบจำลองและใช้พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งลักษณะปฏิบัติการ (AUROC) ที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำของแผนที่ความไวที่สร้างขึ้น ผลการวิจัยพบว่าอัลกอริธึม HHO ปรับปรุงประสิทธิภาพของ ANN ทั้งในการรับรู้ (AUROCANN = 0.731 และ AUROCHHO - ANN = 0.777) และการทำนาย (AUROCANN = 0.720 และ AUROCHHO - ANN = 0.773) อย่างมีประสิทธิภาพ



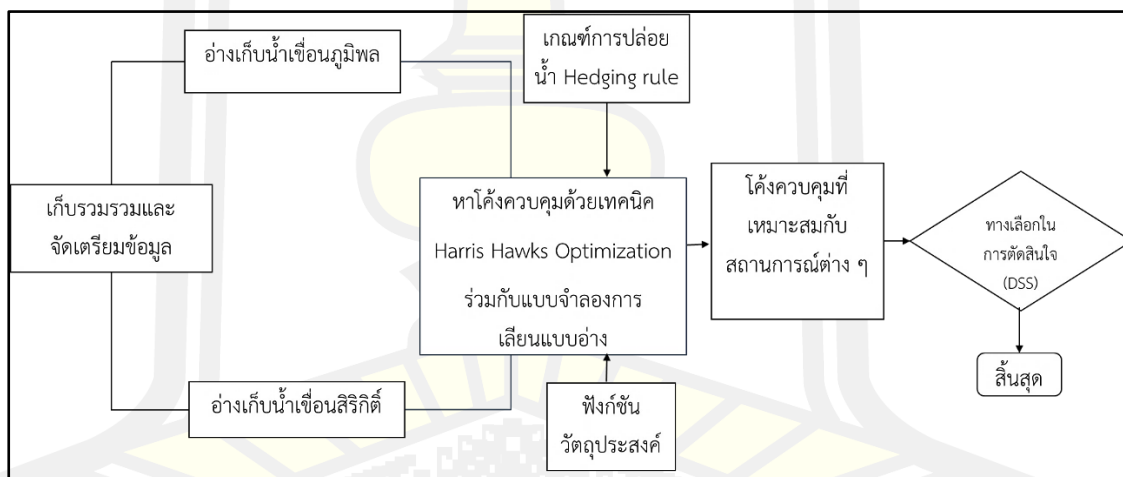
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัยโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะค้นหาแนวทางเลือกสำหรับระบบสนับสนุนการตัดสินใจ โดยจะค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายด้วยเทคนิค Harris Hawks Optimization ซึ่งจะมีหัวข้อและวิธีการดำเนินงาน ดังนี้

1. พื้นที่ศึกษา
2. การสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจ
3. การหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิค Harris Hawks Optimization (HHO)

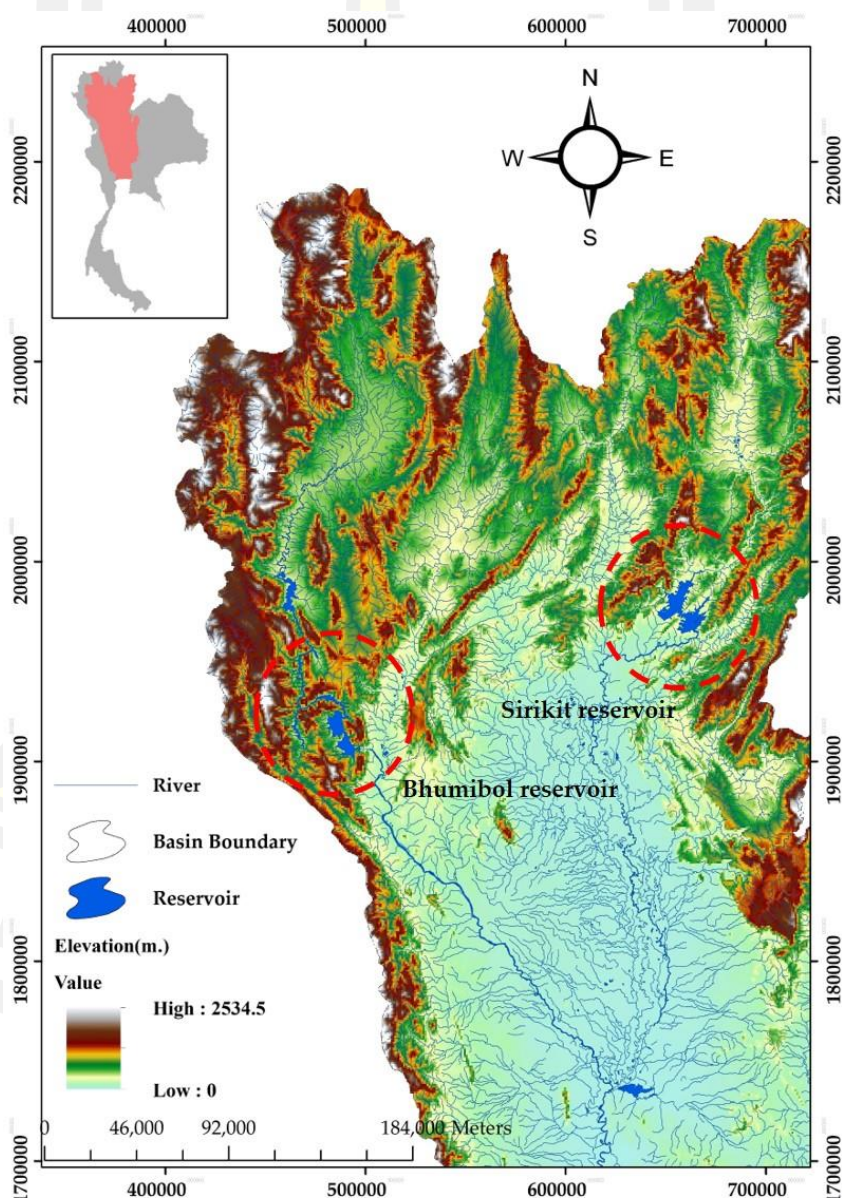
โดยมีแผนผังกระบวนการทำงานดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 แผนผังกระบวนการดำเนินงาน

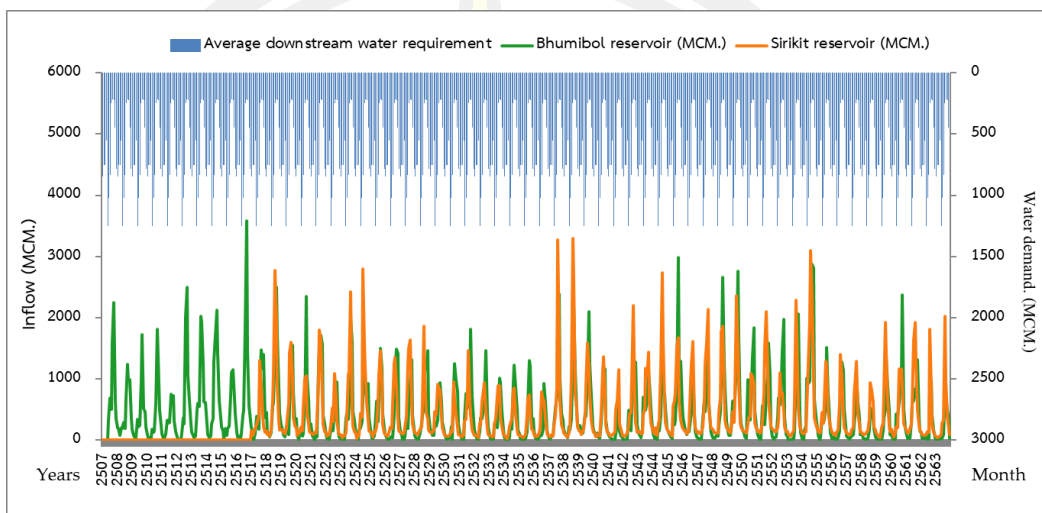
3.1 พื้นที่ศึกษา

ในการทำการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกพื้นที่ศึกษาเป็นอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ 2 แห่ง คืออ่างเก็บน้ำภูมิพล จังหวัดตาก ซึ่งอยู่ในลุ่มน้ำปิง และอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ ซึ่งอยู่ในลุ่มน้ำน่าน ดังภาพประกอบ 19 และมีรายละเอียดของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างดังภาพประกอบ 20 และแผนผังการไหล ดังภาพประกอบ 21 โดยจะศึกษาถึงการจัดสรรน้ำร่วมกันตามความต้องการของผู้ใช้น้ำของอ่างเก็บน้ำตามวัตถุประสงค์ต่าง ๆ

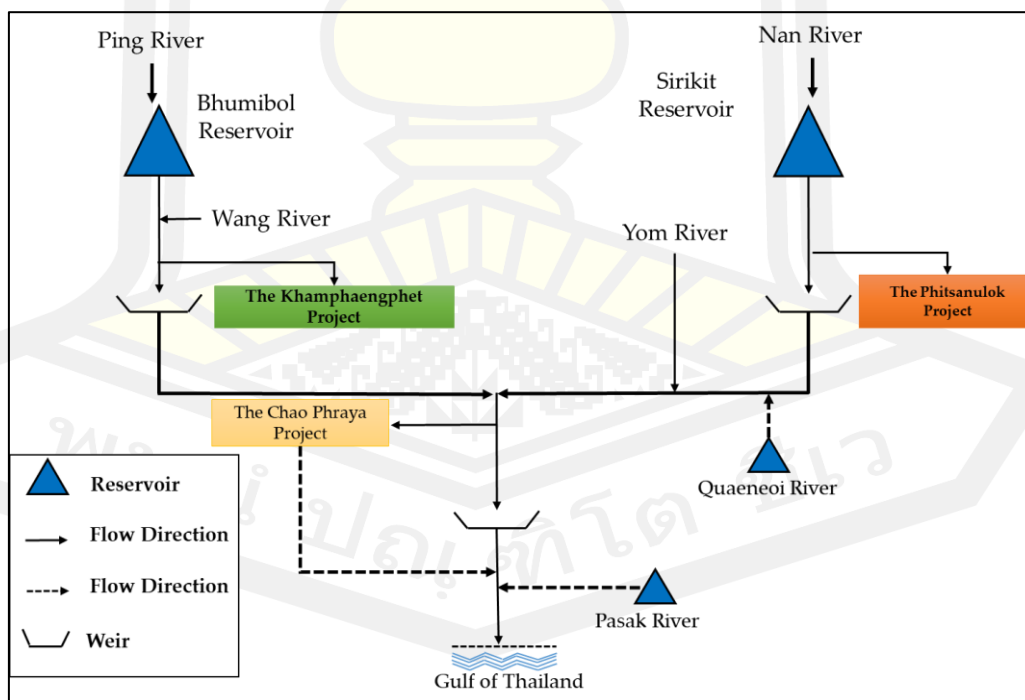


ภาพประกอบ 19 ที่ตั้งพื้นที่ศึกษา อ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์

ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยไหลเข้าอ่างเก็บน้ำภูมิพล อยู่ที่ 5,552 ลบ.ม./ปี ซึ่งจะมีปีที่ปริมาณน้ำทำ น้อยกว่าค่าเฉลี่ยอยู่จำนวน 28 ปี และอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ อยู่ที่ 5,656 ลบ.ม./ปี ซึ่งจะมีปีที่ปริมาณ น้ำทำน้อยกว่าค่าเฉลี่ยอยู่จำนวน 25 ปี ซึ่งปริมาณน้ำไหลเข้าของทั้งสองอ่างเก็บน้ำ จะปล่อยน้ำเพื่อ ตอบสนองความต้องการใช้น้ำทำอย่างร่วมกัน



ภาพประกอบ 20 ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าและความต้องการใช้น้ำ อ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์



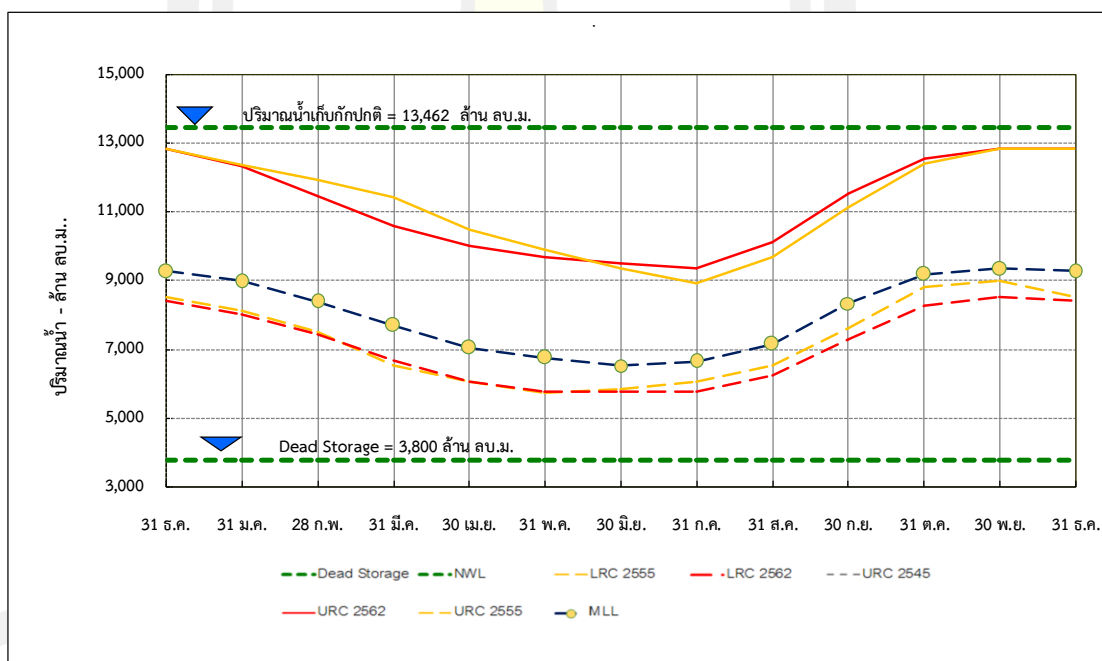
ภาพประกอบ 21 แผนผังการไหล อ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์

3.1.1 อ่างเก็บน้ำภูมิพล

อ่างเก็บน้ำภูมิพล ตั้งอยู่ที่ ตำบลเขาแก้ว อำเภอสามเงา จังหวัดตาก อยู่ที่บริเวณ ละติจูด

17.26 องศาเหนือ ลองจิจูด 98.9 องศาตะวันออก เป็นอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ของกรมชลประทาน

- เป็นเขื่อนคอนกรีตเก็บกักน้ำ ปิดกั้นแม่น้ำปิง
- สูง 154.00 ม. ยาว 486.00 ม.
- ระดับสันเขื่อน + 261.00 ร.ท.ก.
- ปริมาณน้ำที่ระดับเก็บกักสูงสุด 13,462 ล้าน ลบ.ม.
- อาณาเขตรับน้ำ 26,386 ตร.กม.
- พื้นที่อ่าง ๆ ที่ระดับเก็บกักสูงสุด 318 ตร.กม.
- ความจุที่พักตะกอน 3,600 ล้าน ลบ.ม.



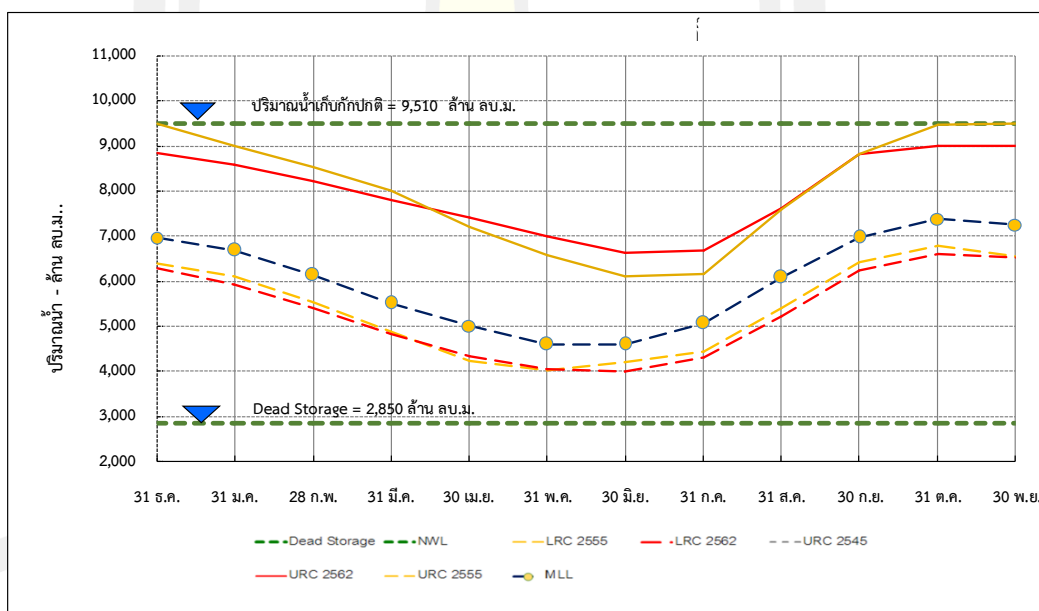
ภาพประกอบ 22 รายละเอียดโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำภูมิพล

ที่มา : (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2562)

3.1.2 อ่างเก็บน้ำสิริกิติ์

อ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ ตั้งอยู่ที่ ตำบลท่าปลา อำเภอท่าปลา จังหวัดอุตรดิตถ์ อยู่ที่บริเวณ ละติจูด 17.88 องศาเหนือ ลองจิจูด 100.462 องศาตะวันออก เป็นอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ของกรมชลประทาน

- เป็นเขื่อนดินเก็บกักน้ำปิดลำน้ำน่าน
- สูง 113.60 ม. ยาว 800 ม.
- ระดับสันเขื่อน + 169.00 ร.ท.ก.
- ระดับเก็บกัก + 162.00 ร.ท.ก. ปริมาณน้ำที่ระดับเก็บกัก 9,510 ล้าน ลบ.ม.
- ระดับเก็บกักสูงสุด + 166.00 ร.ท.ก. ปริมาณน้ำที่ระดับเก็บกักสูงสุด 10,500 ล้าน ลบ.ม.
- ปริมาณน้ำกั้นอ่าง ฯ ที่ระดับ + 105.75 ร.ท.ก. จำนวน 600 ล้าน ลบ.ม.
- ปริมาณน้ำใช้งาน 8,950 ล้าน ลบ.ม. พื้นที่อ่างที่ระดับเก็บกักสูงสุด 240 ตร.กม.

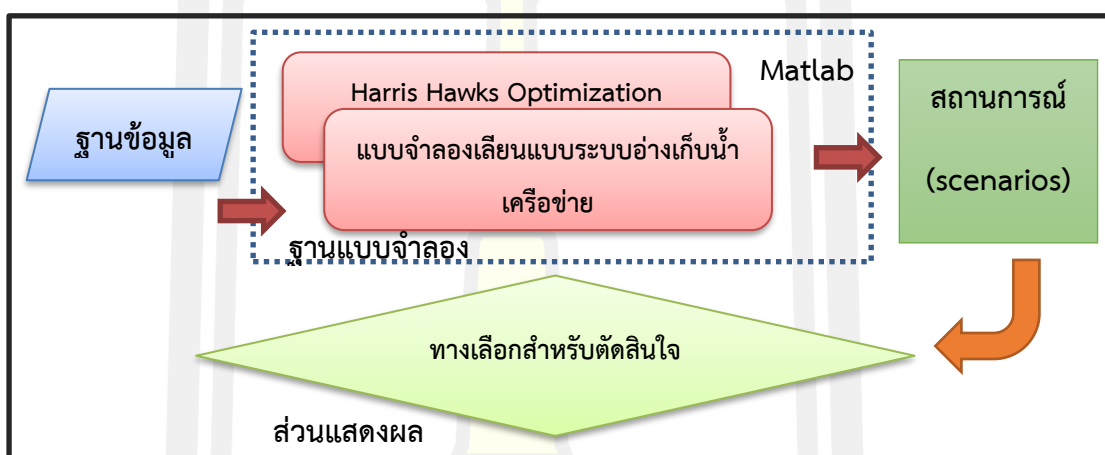


ภาพประกอบ 23 รายละเอียดโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์

ที่มา : (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2562)

3.2 การสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจ

ในการศึกษาวิจัยนี้ จะใช้ทั้งข้อมูลในรูปแบบของฐานข้อมูลเชิงคุณลักษณะที่จะได้จากรายงานการเก็บข้อมูลจริง เอกสารวิชาการต่าง ๆ และมาพัฒนาเป็นฐานข้อมูล และกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์เพื่อนำไปสู่การเสนอแนวทางเลือกในการสนับสนุนการตัดสินใจในการวางแผนการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำเครือข่ายให้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ



ภาพประกอบ 24 ขั้นตอนการสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจของอ่างเก็บน้ำเครือข่าย

3.2.1 การสร้างฐานข้อมูล

ฐานข้อมูลที่จะใช้ประกอบในการค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่าย เพื่อให้ประกอบเป็นทางเลือกในการตัดสินใจในการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ สำหรับในการวิจัยนี้ มีฐานข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 1

ตาราง 1 ฐานข้อมูลที่ใช้ในการค้นหาโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำเครือข่าย

ลำดับที่	ฐานข้อมูล	แหล่งข้อมูล/ที่มา
1	ข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ อ่างเก็บน้ำภูมิพล/สิริกิติ์	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)
2	ข้อมูลความต้องการใช้น้ำทำയാอ่าง อ่างเก็บน้ำภูมิพล/สิริกิติ์	กรมชลประทาน
3	ข้อมูลปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ อ่างเก็บน้ำภูมิพล/สิริกิติ์	กรมอุตุนิยมวิทยา

ลำดับที่	ชั้นฐานข้อมูล	แหล่งข้อมูล/ที่มา
4	ข้อมูลทางอุทกวิทยาของอ่างเก็บน้ำ อ่างเก็บน้ำภูมิพล/สิริกิติ์	กรมอุตุนิยมวิทยา
5	ข้อมูลพื้นฐานของอ่างเก็บน้ำ อ่างเก็บน้ำภูมิพล/สิริกิติ์	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.)
6	ข้อมูลปริมาณน้ำที่ไหลเข้าอ่างสังเคราะห์ 1,000 เหตุการณ์ อ่างเก็บน้ำภูมิพล/สิริกิติ์	HEC-4

3.2.2 การสร้างฐานแบบจำลอง

ฐานแบบที่จะใช้ประกอบในการค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่าย เพื่อให้ประกอบเป็นทางเลือกในการตัดสินใจในการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ สำหรับในการวิจัยนี้ มีชั้นฐานข้อมูลดังแสดงในภาพประกอบที่ 24 ซึ่งทำงานภายใต้โปรแกรม Matlab ประกอบไปด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิค Harris Hawks Optimization เชื่อมต่อกับแบบจำลองเลียนแบบระบบอ่างเก็บน้ำเครือข่าย เพื่อนำมาใช้ในการค้นหาโค้งควบคุมเพื่อเป็นแนวทางเลือกในการตัดสินใจในสถานการณ์ต่าง ๆ เพื่อบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำเครือข่าย

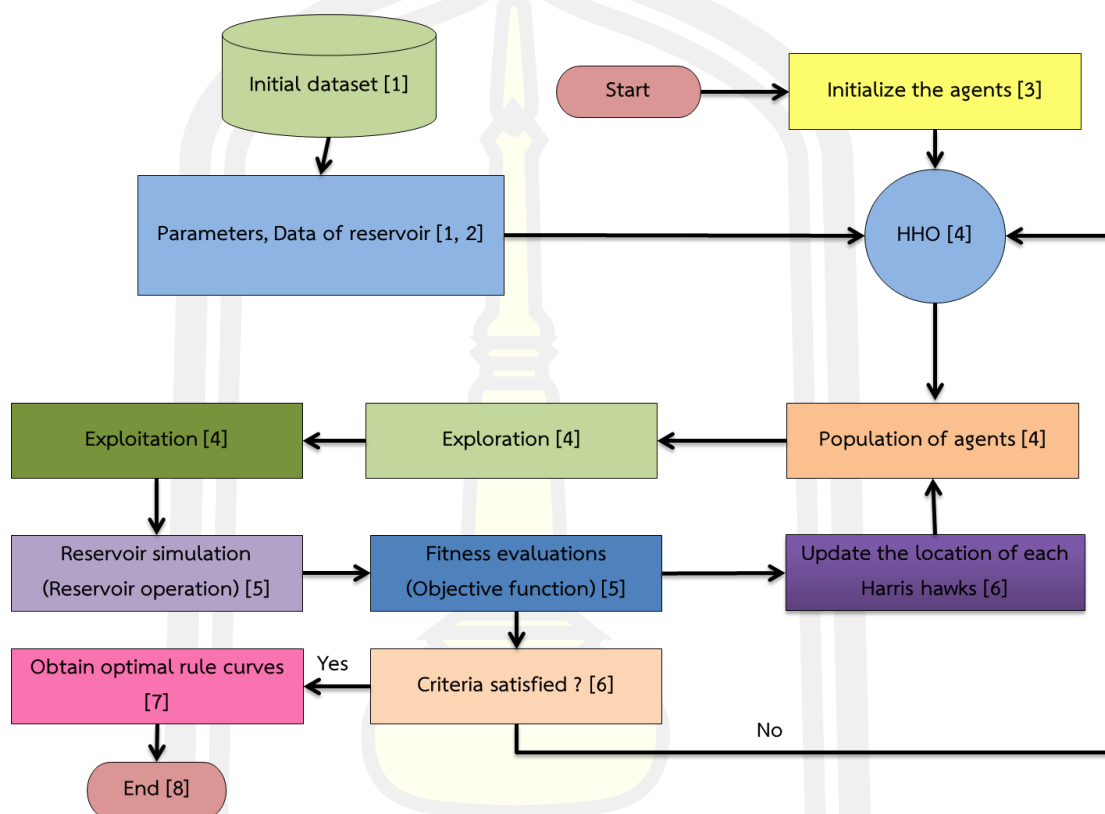
3.2.3 การสร้างส่วนการจัดการโต้ตอบ

ในส่วนของการจัดการโต้ตอบ หรือการแสดงผลที่จะใช้ประกอบในการค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่าย เพื่อให้ประกอบเป็นทางเลือกในการตัดสินใจในการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำ สำหรับในการวิจัยนี้ จะแสดงผลเป็นสถานการณ์การขาดแคลนน้ำ/น้ำส่วนเกิน (ไหลล้น) ตามสถานการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเมื่อเลือกใช้โค้งควบคุมแบบต่าง ๆ

3.3 การค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้เทคนิค Harris Hawks Optimization

ในการศึกษานี้ได้พัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณหา Rule Curve ที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำภูมิพลและเก็บน้ำเขื่อนสิริกิติ์ สำหรับเป็นเกณฑ์ในการปล่อยน้ำเพื่อความต้องการน้ำด้านต่าง ๆ ทำอ่างเก็บน้ำ ซึ่งภายในโปรแกรมจะประกอบไปด้วยแบบจำลองสภาพอ่างเก็บน้ำ (Reservoir Simulation Model) จำลองสภาพน้ำโดยอาศัยหลักสมดุลน้ำและใช้วิธี Harris Hawks Optimization

(HHO) ในการหา Rule Curve ที่เหมาะสม เปรียบเทียบกับเทคนิค Genetic Algorithm (GA) และ Wind Driven Optimization แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของ HHO แสดงดังภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 แผนผังการทำงานหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมด้วยเทคนิค HHO

ในการหา Rule Curve ที่เหมาะสมด้วยวิธี Harris Hawks Optimization แบ่งเป็นขั้นตอนได้ ดังนี้

1. กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ช่วงขอบเขตของ Upper Rule Curve และ Lower Rule Curve เป็นประชากรเริ่มต้น (Initial Population) ที่ต้องการให้ HHO ค้นหาที่เหมาะสม
2. กำหนด Objective Function ในการหา Rule Curve ที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำ สำหรับการศึกษานี้ได้ใช้การคำนวณหาค่าความขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการศึกษา โดยพิจารณาความต้องการนํ้าท้ายอ่างเก็บน้ำ

3. กำหนดตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) ในการศึกษานี้ตัวแปรตัดสินใจก็คือ ระดับควบคุมตอนบน (Upper Rule Surface) หรือ ปริมาตรวิกฤติสูงสุด (Volume Upper Critical, V_{uc}) และระดับควบคุมตอนล่าง (Lower Rule Surface) หรือ ปริมาตรวิกฤติต่ำสุด (Volume Lower Critical, V_{lc}) โดยประยุกต์ใช้ HHO สุ่ม Rule Curve ขึ้นมา 48 ตัวแปร สำหรับอ่างเก็บน้ำภูมิพล 24 ตัวแปร และอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ 24 ตัวแปร จับมาค้นหาค่าตอบพร้อมกัน แล้วทำการจำลองสภาพอ่าง Rule Curve ที่เหมาะสมก็คือ Rule Curve ที่พิจารณาวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดค่าที่เหมาะสมที่สุดตามวัตถุประสงค์

4. ค้นหาค่าตอบด้วยวิธี Harris Hawks Optimization โดยจะทำการค้นหา Particle ที่ดีที่สุด โดยคำนึงถึง Objective function

5. ขั้นตอนการจำลองสภาพอ่าง (Reservoir Simulation) จะดำเนินการจำลองเป็นรายเดือน โดย 1 ปี มี 12 เดือนโดยเริ่มจำลองสภาพตั้งแต่เดือนมกราคมปี พ.ศ.2507 ไปจนถึงเดือนธันวาคมปี พ.ศ.2562 ของอ่างเก็บน้ำภูมิพล ส่วนอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์เริ่มจำลองสภาพตั้งแต่เดือนมกราคมปี พ.ศ. 2517 ไปจนถึงเดือนธันวาคมปี พ.ศ.2563 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการจัดการอ่างเก็บน้ำ การจำลองสภาพจะใช้ค่า Rule Curve ที่ได้จากการสุ่มในแต่ละ Population ทำการจำลองการปล่อยน้ำตามสมการที่ 2-8 แล้วคำนวณค่าต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาตรอ่างในแต่ละเดือน ปริมาณการไหลล้น (Spillage) การขาดแคลนน้ำ (Shortage) แล้วนำค่าที่ได้ไปรวมในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) เป็นค่าความเหมาะสม (Fitness Value)

6. พิจารณาความเหมาะสมตามตัวแปรตัดสินใจที่ต้องการกลับไปทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1 หรือขั้นตอนที่ 4 ใหม่จนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสม

7. ได้โค้งควบคุมสำหรับอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสม

8. จบการทำงาน

3.3.1 จัดทำโค้งควบคุม

การจัดทำโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิคการค้นหาด้วย Harris Hawks Optimization โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการค้นหาค่าตอบคือ ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด ค่าสูงสุดของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด และค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด โดยใช้

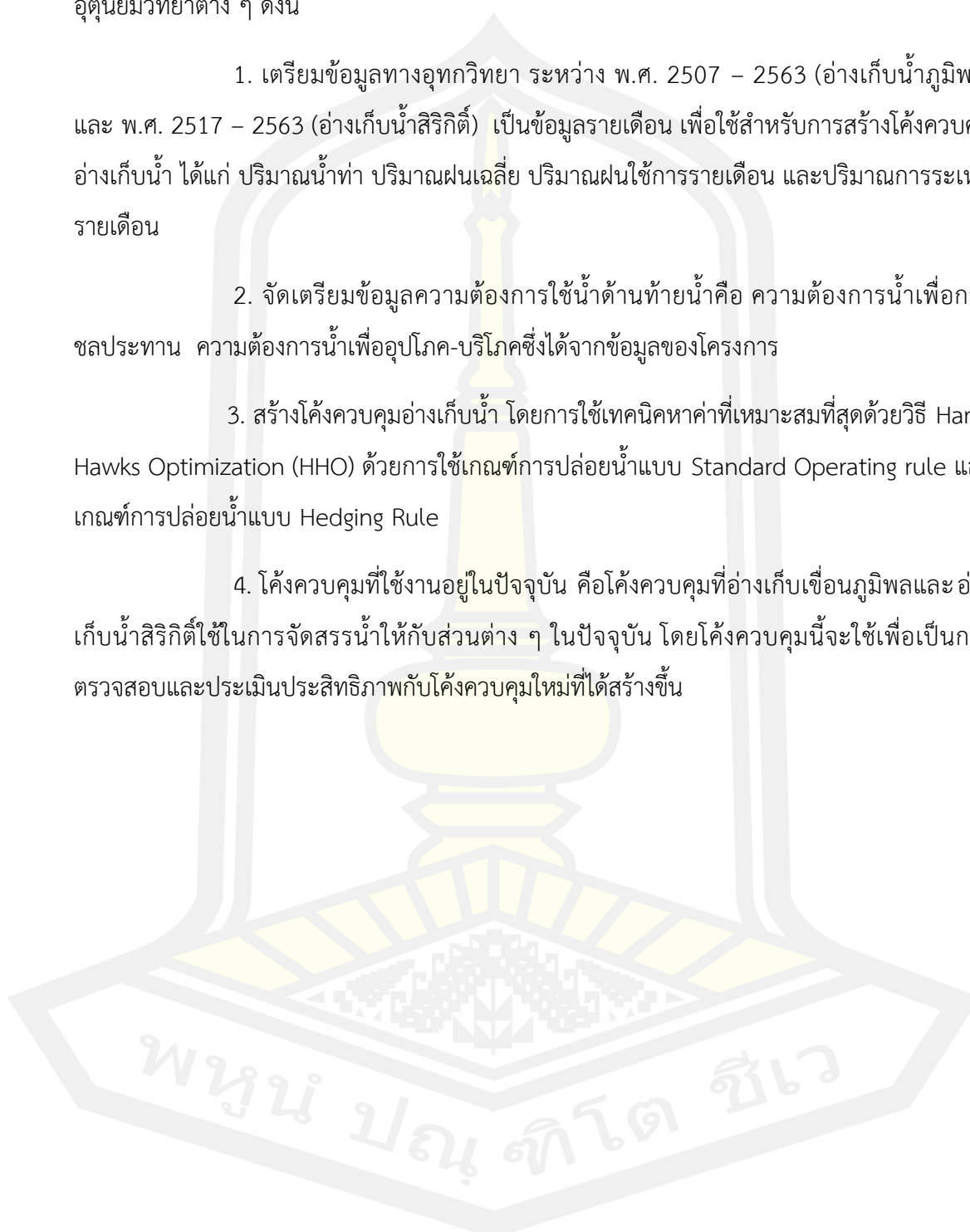
ข้อมูลจากปริมาณน้ำท่ารายเดือน ข้อมูลความต้องการใช้น้ำในกิจกรรมต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตและข้อมูลทางอุทกนิยมนิยามวิทยาต่าง ๆ ดังนี้

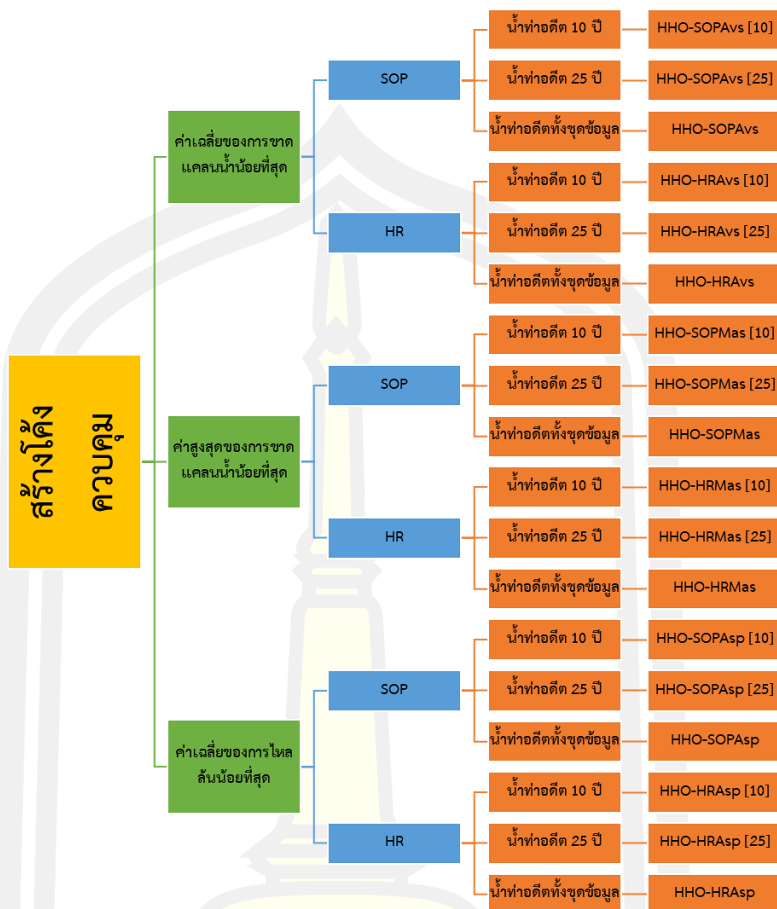
1. เตรียมข้อมูลทางอุทกวิทยา ระหว่าง พ.ศ. 2507 – 2563 (อ่างเก็บน้ำภูมิพล) และ พ.ศ. 2517 – 2563 (อ่างเก็บน้ำสิริกิติ์) เป็นข้อมูลรายเดือน เพื่อใช้สำหรับการสร้างโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ ได้แก่ ปริมาณน้ำท่า ปริมาณฝนเฉลี่ย ปริมาณฝนใช้การรายเดือน และปริมาณการระเหยรายเดือน

2. จัดเตรียมข้อมูลความต้องการใช้น้ำด้านท้ายน้ำคือ ความต้องการน้ำเพื่อการชลประทาน ความต้องการน้ำเพื่ออุปโภค-บริโภคซึ่งได้จากข้อมูลของโครงการ

3. สร้างโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ โดยการใช้เทคนิคหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Harris Hawks Optimization (HHO) ด้วยการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Standard Operating rule และเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging Rule

4. โค้งควบคุมที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน คือโค้งควบคุมที่อ่างเก็บเขื่อนภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ใช้ในการจัดสรรน้ำให้กับส่วนต่าง ๆ ในปัจจุบัน โดยโค้งควบคุมนี้จะใช้เพื่อเป็นการตรวจสอบและประเมินประสิทธิภาพกับโค้งควบคุมใหม่ที่ได้สร้างขึ้น





ภาพประกอบ 26 การสร้างโค้งควบคุม

3.3.2. การตรวจสอบโค้งควบคุมและประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุม

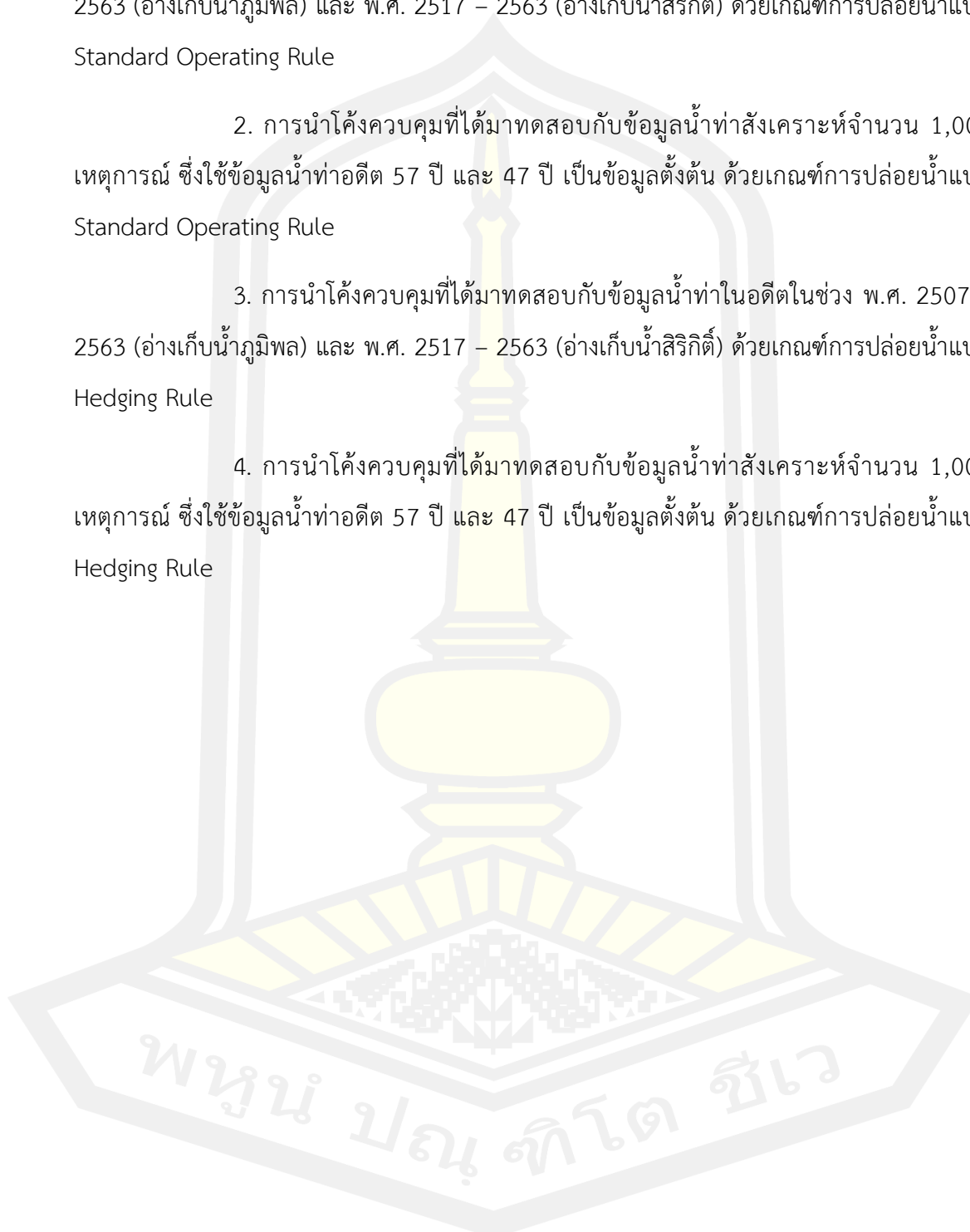
เป็นการตรวจสอบว่าโค้งควบคุมที่เราสร้างขึ้นนั้นสามารถนำมาใช้ได้กับเหตุการณ์ต่าง ๆ จากข้อมูลน้ำที่ไหลเข้าอ่างในอดีตและข้อมูลน้ำท่าที่สังเคราะห์ขึ้น เพื่อประเมินว่าโค้งควบคุมที่ได้มีความสอดคล้องกับเหตุการณ์ต่าง ๆ ตลอดช่วงที่พิจารณาหรือไม่ คือมีช่วงของการขาดแคลนน้ำในช่วงฤดูแล้งและช่วงของการไหลล้นในช่วงอุทกภัย มากน้อยเพียงใดสามารถทำได้โดยการใช้ข้อมูลน้ำท่ารายเดือนในอดีตซึ่งมีข้อมูลอยู่ในช่วง พ.ศ. 2507 – 2563 (อ่างเก็บน้ำภูมิมิพล) และ พ.ศ. 2517 – 2563 (อ่างเก็บน้ำสิริกิติ์) เป็นข้อมูลตั้งต้นเพื่อนำไปสังเคราะห์โดยใช้ HEC-4 จำนวน 1,000 เหตุการณ์ โดยประเมินความถี่ของการเกิดการไหลล้นหรือขาดแคลน ค่าเฉลี่ยและค่ามากที่สุดของปริมาณและเวลาที่เกิด โดยการนำโค้งควบคุม 18 ชุดใหม่ เปรียบเทียบกับ 1 ชุดโค้งควบคุมปัจจุบัน ซึ่ง 1 ชุดเส้นโค้งหมายถึงโค้งควบคุมจากทั้ง 2 อ่างเก็บน้ำ จำนวน 48 จุดทำงานพร้อมกัน โดยแยกพิจารณาดังนี้

1. การนำโค้งควบคุมที่ได้มาทดสอบกับข้อมูลน้ำท่าในอดีตในช่วง พ.ศ. 2507 – 2563 (อ่างเก็บน้ำภูมิพล) และ พ.ศ. 2517 – 2563 (อ่างเก็บน้ำสิริกิติ์) ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Standard Operating Rule

2. การนำโค้งควบคุมที่ได้มาทดสอบกับข้อมูลน้ำท่าสังเคราะห์จำนวน 1,000 เหตุการณ์ ซึ่งใช้ข้อมูลน้ำท่าอดีต 57 ปี และ 47 ปี เป็นข้อมูลตั้งต้น ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Standard Operating Rule

3. การนำโค้งควบคุมที่ได้มาทดสอบกับข้อมูลน้ำท่าในอดีตในช่วง พ.ศ. 2507 – 2563 (อ่างเก็บน้ำภูมิพล) และ พ.ศ. 2517 – 2563 (อ่างเก็บน้ำสิริกิติ์) ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging Rule

4. การนำโค้งควบคุมที่ได้มาทดสอบกับข้อมูลน้ำท่าสังเคราะห์จำนวน 1,000 เหตุการณ์ ซึ่งใช้ข้อมูลน้ำท่าอดีต 57 ปี และ 47 ปี เป็นข้อมูลตั้งต้น ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging Rule



บทที่ 4

ผลการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาการวิจัยโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายอ่างเก็บน้ำ ด้วยการหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายด้วยเทคนิค Harris Hawks Optimization ด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging Rule ซึ่งจะมีหัวข้อและผลการศึกษา ดังนี้

1. ผลการค้นหาค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำ
2. ผลการประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ
3. ผลการสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจ

4.1 ผลการค้นหาค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำ

ผลการจัดทำโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายที่เหมาะสมด้วยเทคนิค HHO เชื่อมต่อกับแบบจำลองการเลียนแบบสถานการณ์อ่างเก็บน้ำคืออ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ ซึ่งทำงานร่วมกันเป็นเครือข่ายโดยโค้งควบคุมที่ได้จะเป็นชุดโค้งควบคุมของทั้ง 2 อ่างเก็บน้ำคือ 48 จุด ต่อชุดโค้งควบคุม 1 ชุด โดยใช้ค่าการขาดแคลนเฉลี่ยน้อยที่สุด ค่าสูงสุดของการขาดแคลนน้อยที่สุด และค่าการไหลล้นน้อยที่สุด เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหา การจัดทำโค้งควบคุมจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ประเภทแรกจะใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating Rules) และประเภทที่สองจะใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging Rule โดยค้นหาจากข้อมูลปริมาณน้ำทำในช่วงเวลาอดีตของอ่างเก็บน้ำภูมิพล คือระหว่าง พ.ศ. 2507-2563 (57 ปี) และอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ คือระหว่าง พ.ศ. 2517-2563 (47 ปี) โดยจะเลือกช่วงของข้อมูลน้ำทำอดีต จะเกิดสถานการณ์ปริมาณน้ำน้อยและปริมาณน้ำมาก 10 ปี (ปริมาณน้ำน้อย พ.ศ 2527 – 2536, ปริมาณน้ำมาก พ.ศ. 2545 – 2554), 25 ปี (ปริมาณน้ำน้อย พ.ศ 2519 – 2543, ปริมาณน้ำมาก พ.ศ. 2537 – 2561), และทั้งชุดข้อมูลคือ 57 ปี และ 47 ปี ตามลำดับ มาใช้ในการค้นหาเพื่อให้เกิดทางเลือกในการตัดสินใจที่หลากหลายในการเลือกนำโค้งควบคุมไปใช้ในการปฏิบัติ อย่างไรก็ตาม การอธิบายลักษณะของโค้งควบคุมที่ได้จัดทำขึ้นใหม่นี้จะมีการนำไปเปรียบเทียบกับโค้งควบคุมเดิมที่ใช้งานอยู่ ณ เวลาปัจจุบันหรือ (Current) และโค้งใหม่ที่ค้นหาด้วยเทคนิค HHO ที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาโค้งควบคุมสูง เพื่อแสดงให้เห็นลักษณะรูปร่างที่มีความแตกต่าง รวมถึงการอธิบายประสิทธิภาพของโค้งควบคุมใหม่

ที่มีความเหมาะสม การจัดทำโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมสำหรับอ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ สามารถแสดงผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

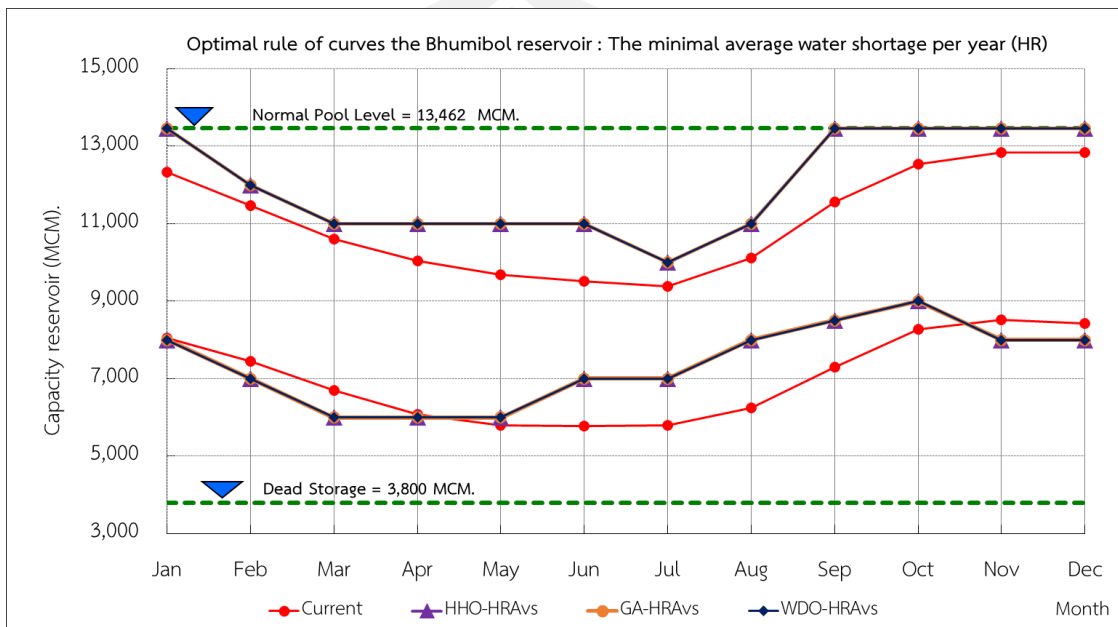
4.1.1 โค้งควบคุมจากกรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging Rule ด้วยเทคนิค Harris Hawks Optimization เปรียบเทียบกับ Genetic Algorithm และเทคนิค Wind Driven Optimization กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด

โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำที่สร้างจากเทคนิค HHO, GA, และ WDO เชื่อมต่อกับการจำลองสถานการณ์อ่างเก็บน้ำโดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำทำในอดีต มีค่าปริมาณน้ำเก็บกักของโค้งควบคุมบนและโค้งควบคุมล่างดังแสดงในภาพประกอบ 27 และภาพประกอบ 28 ซึ่งพบว่าโค้งควบคุมใหม่ มีลักษณะรูปร่างที่ลู่ไปกับโค้งควบคุมเดิมที่ใช้งานอยู่ ซึ่งมีบางค่าที่แตกต่างกัน แต่การลู่ขึ้นลู่ลงไปในทิศทางเดียวกัน สามารถอธิบายลักษณะและรายละเอียดได้ดังนี้

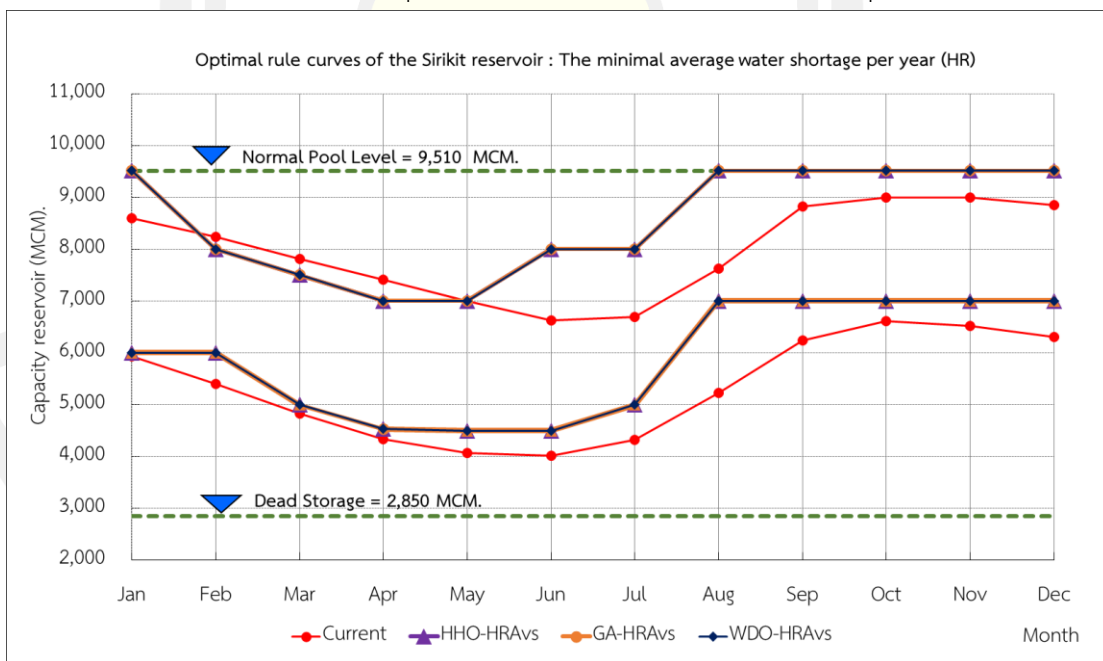
1. โค้งควบคุมบน (Upper Rule Curve) ของชุดโค้งควบคุม 1 ชุด คืออ่างเก็บน้ำภูมิพลและสิริกิติ์ ลักษณะของเส้นโค้งของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมของ HHO ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด (HHO-HRAVs) GA ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด (GA-HRAVs) และ WDO ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด (WDO-HRAVs) มีแนวโน้มไปในแนวทางที่คล้ายคลึงกัน เนื่องจากเงื่อนไขในการค้นหา และเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดทั้ง 3 เทคนิคล้วนแล้วแต่เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการค้นหาค่าตอบที่สูง จึงทำให้ค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ได้ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับโค้งปัจจุบันที่ใช้อยู่ของอ่างเก็บน้ำ (Current) จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งใหม่จาก 3 เทคนิคจะอยู่สูงกว่าเส้นโค้งปัจจุบัน ซึ่งจะมีแนวโน้มเกณฑ์การเก็บกักที่สูงกว่า มีความต้องการเพิ่มปริมาตรเก็บกักน้ำเพื่อให้มีน้ำไว้ใช้ในช่งฤดูแล้งเพิ่มขึ้น ลดปริมาณการปล่อยน้ำ ซึ่งจะช่วยให้พื้นที่ท้ายน้ำลดความเสี่ยงที่จะเกิดภัยน้ำท่วม และที่สำคัญที่สุดสำหรับการตอบโจทย์วัตถุประสงค์หลักของการสร้างโค้งควบคุมใหม่ ที่ต้องการให้เกิดเหตุการณ์ขาดแคลนของปริมาณน้ำเฉลี่ยน้อยที่สุด

2. โค้งควบคุมล่าง (Lower Rule Curve) ของชุดโค้งควบคุมทั้งสองอ่าง แสดงให้เห็นถึงในช่วงต้นฤดูแล้งตั้งแต่เดือนมกราคม-เมษายนของโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ (HHO-HRAVs), (GA-HRAVs), (WDO-HRAVs) แสดงเกณฑ์การเก็บกักน้ำมีค่าที่ต่ำกว่า (Current) อธิบายได้ว่าอ่างเก็บน้ำมีความต้องการลดปริมาณการปล่อยน้ำลง เพื่อให้สามารถสามารถเก็บน้ำได้มากกว่าเกณฑ์เดิม ซึ่งจะ

ช่วยทำให้เพิ่มโอกาสที่ปริมาณน้ำจะมีความเพียงพอต่อความต้องการมากขึ้นในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งเป็นไปตามหลักการของ Hedging rule ที่จะลดปริมาณการปล่อยน้ำให้น้อยกว่าความต้องการน้ำเป้าหมาย



ภาพประกอบ 27 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ HR จากเทคนิค HHO, GA และ WDO กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด



ภาพประกอบ 28 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ด้วยเกณฑ์ HR จากเทคนิค HHO, GA และ WDO กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด

4.1.2 โค้งควบคุมจากกรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating Rules) ด้วยเทคนิค Harris Hawks Optimization

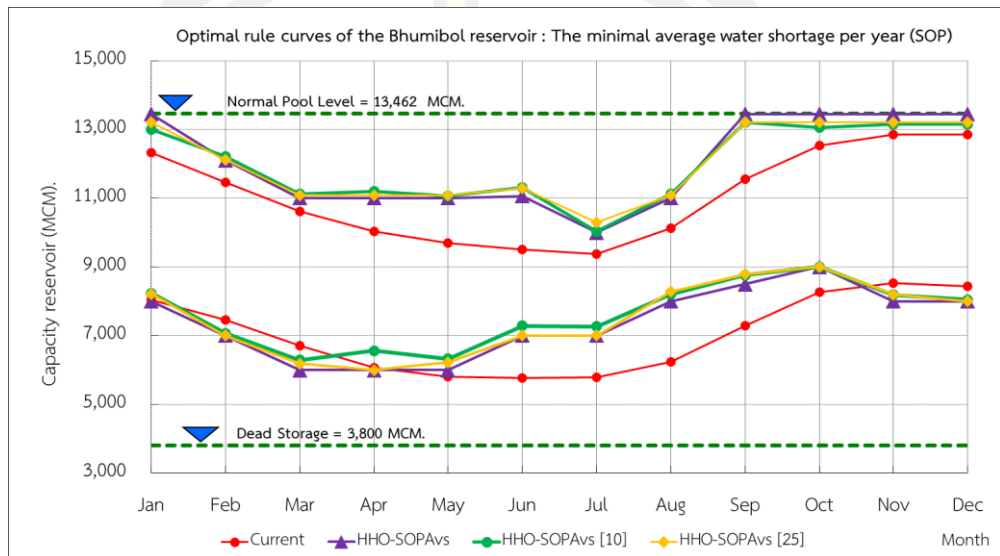
โค้งควบคุมที่สร้างจากเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิค HHO ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating Rules) โดยค้นหาจากข้อมูลปริมาณน้ำท่าในช่วงเวลาอดีตของอ่างเก็บน้ำภูมิพล คือระหว่าง พ.ศ. 2507-2563 (57 ปี) และอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ คือระหว่าง พ.ศ. 2517-2563 (47 ปี) โดยจะเลือกช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต ที่จะเกิดสถานการณ์ปริมาณน้ำน้อยและปริมาณน้ำมาก 10 ปี (ปริมาณน้ำน้อย พ.ศ. 2527 – 2536, ปริมาณน้ำมาก พ.ศ. 2545 – 2554), 25 ปี (ปริมาณน้ำน้อย พ.ศ. 2519 – 2543, ปริมาณน้ำมาก พ.ศ. 2537 – 2561), และทั้งชุดข้อมูลคือ 57 ปี และ 47 ปี ตามลำดับ ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชัน (1) ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด (HHO-SOPAvs) (2) ค่าสูงสุดของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด (HHO-SOPMas) (3) ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด (HHO-SOPAsp) จากการค้นหาพบว่าเส้นโค้งของชุดโค้งควบคุม 1 ชุด ของ 2 อ่างเก็บน้ำมีลักษณะรูปร่างการลู่เข้าหาค่าตอบคล้ายกับโค้งควบคุมเดิม แต่เส้นโค้งอาจจะมีลักษณะสูงต่ำแตกต่างกันไปเมื่อเทียบกับเส้นโค้งเดิมที่ใช้งานปัจจุบัน (Current) มีค่าปริมาณน้ำเก็บกักของโค้งควบคุมบนและโค้งควบคุมล่างดังแสดงในภาพประกอบ 29 - 34 สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

1. โค้งควบคุมบน (Upper Rule Curve) ลักษณะของเส้นโค้งบนทั้งสองอ่างของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมของ HHO จากทั้ง 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ด้วยกรณีค้นหาจากช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10ปี, 25 ปี และทั้งชุดข้อมูล จะได้เส้นโค้งที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการค้นหาโค้งจากทั้งชุดข้อมูล (HHO-SOP) คลอบคลุมไปถึงทั้งช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี (HHO-SOP [10]) และ 25 ปี (HHO-SOP [25]) และเมื่อเทียบกับเส้นโค้งเดิมที่ใช้งานปัจจุบัน (Current) พบว่าจะเห็นได้ว่าเส้นโค้งใหม่จะอยู่สูงกว่าเส้นโค้งปัจจุบัน ซึ่งจะมีแนวโน้มเกณฑ์การเก็บกักที่สูงกว่า มีความต้องการเพิ่มปริมาตรเก็บกักน้ำเพื่อให้มีน้ำไว้ใช้ใน ช่วงฤดูแล้งเพิ่มขึ้น ลดปริมาณการปล่อยน้ำ ซึ่งจะช่วยให้พื้นที่ท้ายน้ำลดความเสี่ยงที่จะเกิดภัยน้ำท่วม

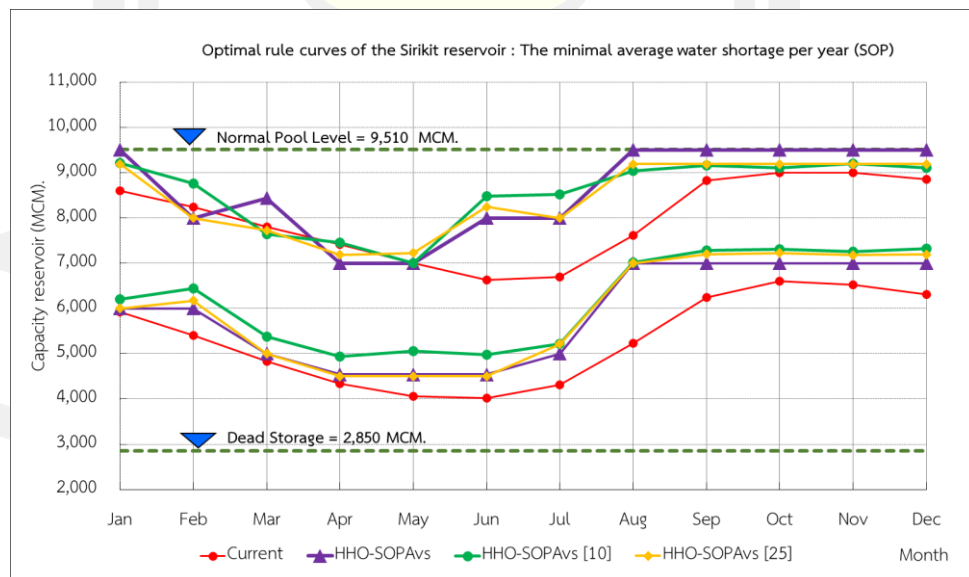
2. โค้งควบคุมล่าง (Lower Rule Curve) ลักษณะของเส้นโค้งล่างทั้งสองอ่าง ของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมของ HHO จากทั้ง 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ด้วยกรณีค้นหาจากช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10ปี, 25 ปี และทั้งชุดข้อมูล จะได้เส้นโค้งที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการค้นหาโค้งจากทั้งชุดข้อมูล (HHO-SOP) คลอบคลุมไปถึงทั้งช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี (HHO-SOP [10]) และ 25 ปี (HHO-SOP [25]) และเมื่อเทียบกับเส้นโค้งเดิมที่ใช้งานปัจจุบัน (Current) พบว่าลักษณะเส้นโค้งควบคุมเส้นล่างเส้นกราฟจะต่ำกว่าเส้นโค้งเดิมที่ใช้งานในปัจจุบัน (Existing) ในช่วงเดือนมกราคม -

เมษายน ซึ่งจะช่วยลดการปล่อยน้ำลงเพื่อลดการขาดแคลนน้ำเพื่อกักเก็บน้ำไว้ในพดูการเพาะปลูกถัดไป หลังจากนั้นเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นเพื่อเตรียมปล่อยน้ำตามความต้องการทำอย่างเพื่อเพิ่มการชลประทาน และช่วยให้ทำให้อ่างเก็บน้ำมีปริมาตรที่จะสามารถรองรับน้ำที่จะมาในฤดูการถัดไปได้

4.1.2.1 กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด

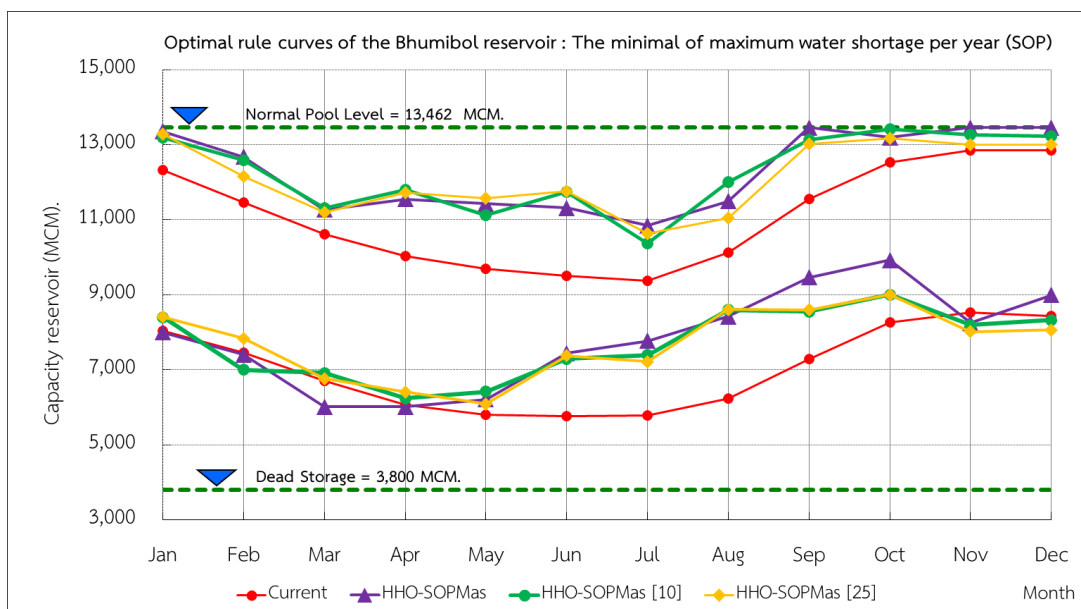


ภาพประกอบ 29 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ SOP กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 57 ปี

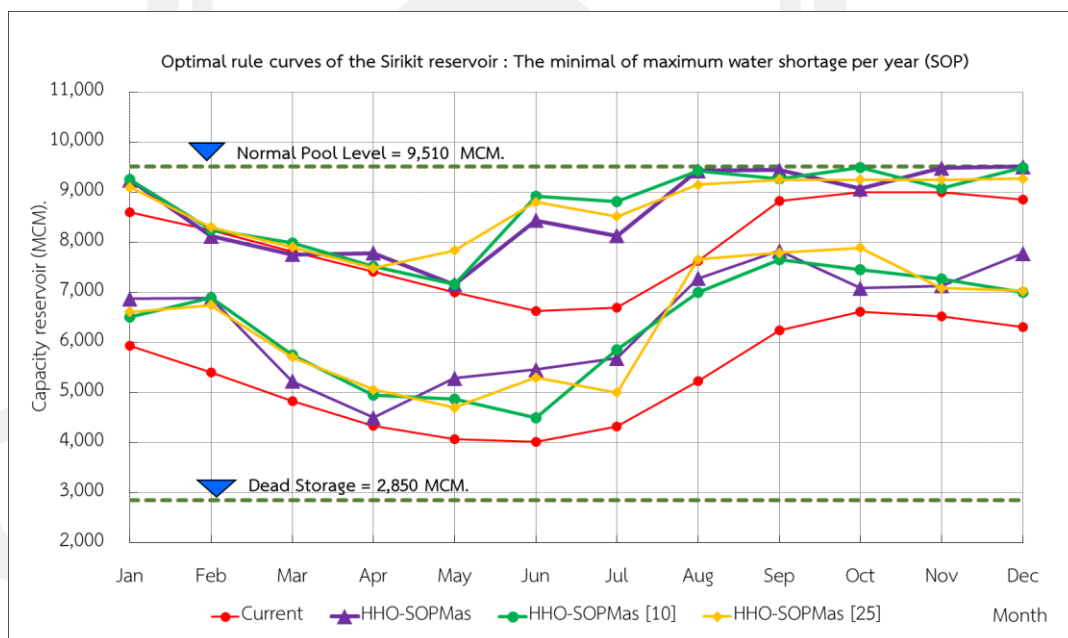


ภาพประกอบ 30 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ด้วยเกณฑ์ SOP กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 47 ปี

4.1.2.2 กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าสูงสุดของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด

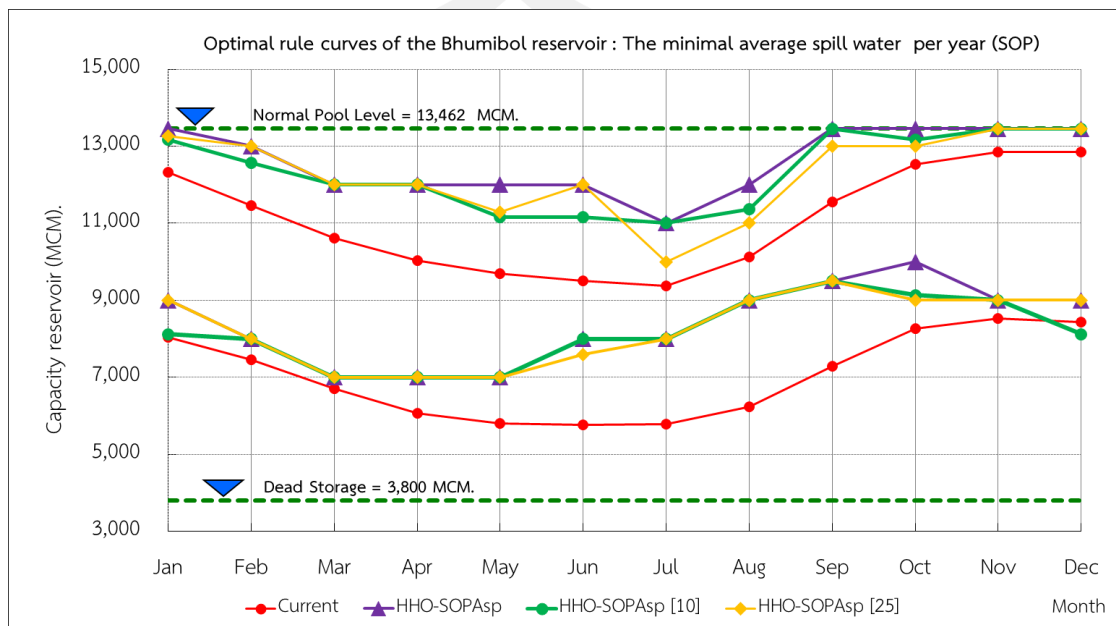


ภาพประกอบ 31 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ SOP กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าสูงสุดของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 57 ปี

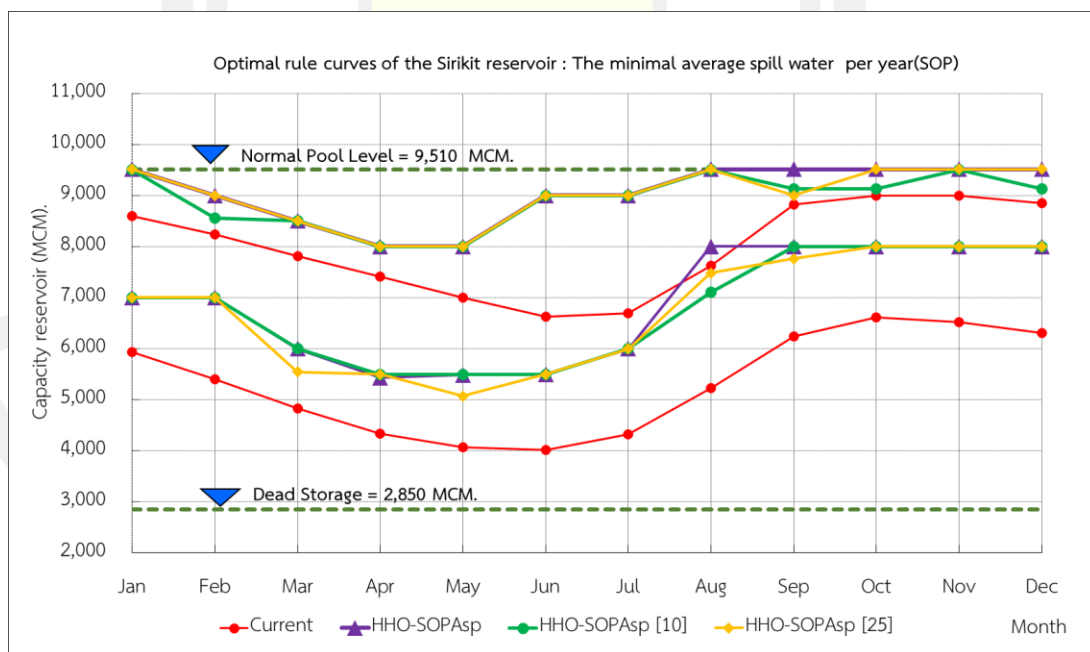


ภาพประกอบ 32 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ด้วยเกณฑ์ SOP กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าสูงสุดของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 47 ปี

4.1.2.3 กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด



ภาพประกอบ 33 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ SOP กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 57 ปี



ภาพประกอบ 34 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ SOP กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 47 ปี

4.1.3 โค้งควบคุมจากกรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging Rule ด้วยเทคนิค Harris Hawks Optimization

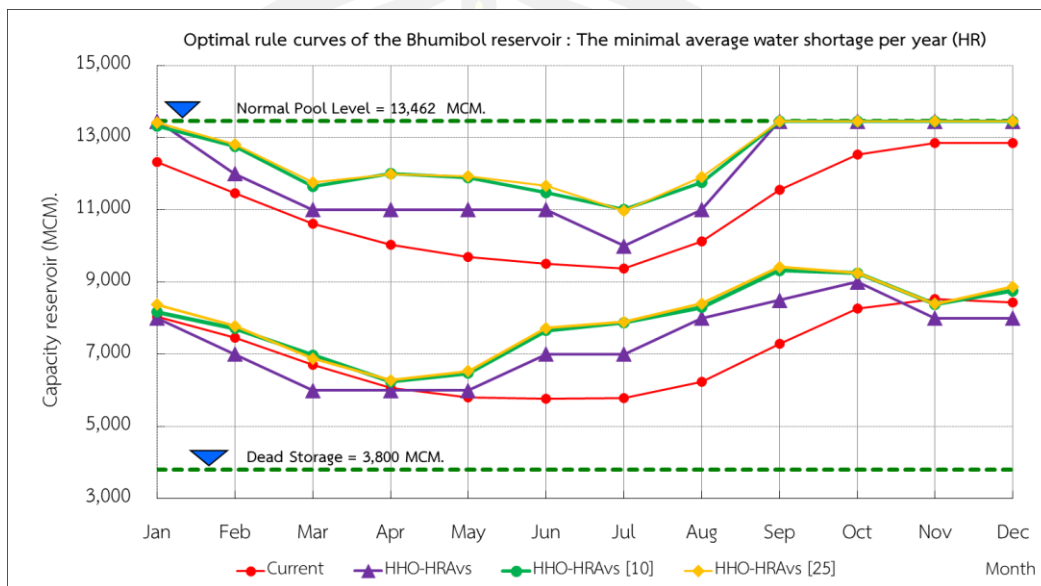
โค้งควบคุมที่สร้างจากเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิค HHO ด้วยเกณฑ์ Hedging rule โดยค้นหาจากข้อมูลปริมาณน้ำท่าในช่วงเวลาอดีตของอ่างเก็บน้ำภูมิพล คือระหว่าง พ.ศ. 2507-2563 (57 ปี) และอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ คือระหว่าง พ.ศ. 2517-2563 (47 ปี) โดยจะเลือกช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต ที่จะเกิดสถานการณ์ปริมาณน้ำน้อยและปริมาณน้ำมาก 10 ปี (ปริมาณน้ำน้อย พ.ศ 2527 – 2536, ปริมาณน้ำมาก พ.ศ. 2545 – 2554), 25 ปี (ปริมาณน้ำน้อย พ.ศ 2519 – 2543, ปริมาณน้ำมาก พ.ศ. 2537 – 2561), และทั้งชุดข้อมูลคือ 57 ปี และ 47 ปี ตามลำดับ ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชัน (1) ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด (HHO-HRAvs) (2) ค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด (HHO-HRMas) (3) ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด (HHO-HRASp) จากการค้นหาพบว่าเส้นโค้งของชุดโค้งควบคุม 1 ชุด ทั้งสองอ่างเก็บน้ำมีลักษณะรูปร่างการลู่เข้าหาค่าตอบคล้ายกับโค้งควบคุมเดิม แต่เส้นโค้งอาจจะมีลักษณะสูงต่ำแตกต่างกันไปเมื่อเทียบกับเส้นโค้งเดิมที่ใช้งานปัจจุบัน (Current) มีค่าปริมาณน้ำเก็บกักของโค้งควบคุมบนและโค้งควบคุมล่าง ดังแสดงในภาพประกอบ 35 - 40 สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

1. โค้งควบคุมบน (Upper Rule Curve) ลักษณะของเส้นโค้งบนทั้งสองอ่างของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมของ HHO จากทั้ง 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ด้วยกรณีค้นหาจากช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10ปี, 25 ปี และทั้งชุดข้อมูล จะได้เส้นโค้งที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการค้นหาโค้งจากทั้งชุดข้อมูล (HHO-SOP) คลอบคลุมไปถึงทั้งช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี (HHO-SOP [10]) และ 25 ปี (HHO-SOP [25]) และเมื่อเทียบกับเส้นโค้งเดิมที่ใช้งานปัจจุบัน (Current) พบว่าจะเห็นได้ว่าเส้นโค้งใหม่จะอยู่สูงกว่าเส้นโค้งปัจจุบัน ซึ่งจะมีแนวโน้มเกณฑ์การเก็บกักที่สูงกว่ามีความต้องการเพิ่มปริมาตรเก็บกักน้ำเพื่อให้มีน้ำไว้ใช้ในช่วงฤดูแล้งเพิ่มขึ้น ลดปริมาณการปล่อยน้ำซึ่งจะช่วยทำให้พื้นที่ท้ายน้ำลดความเสี่ยงที่จะเกิดภัยน้ำท่วม

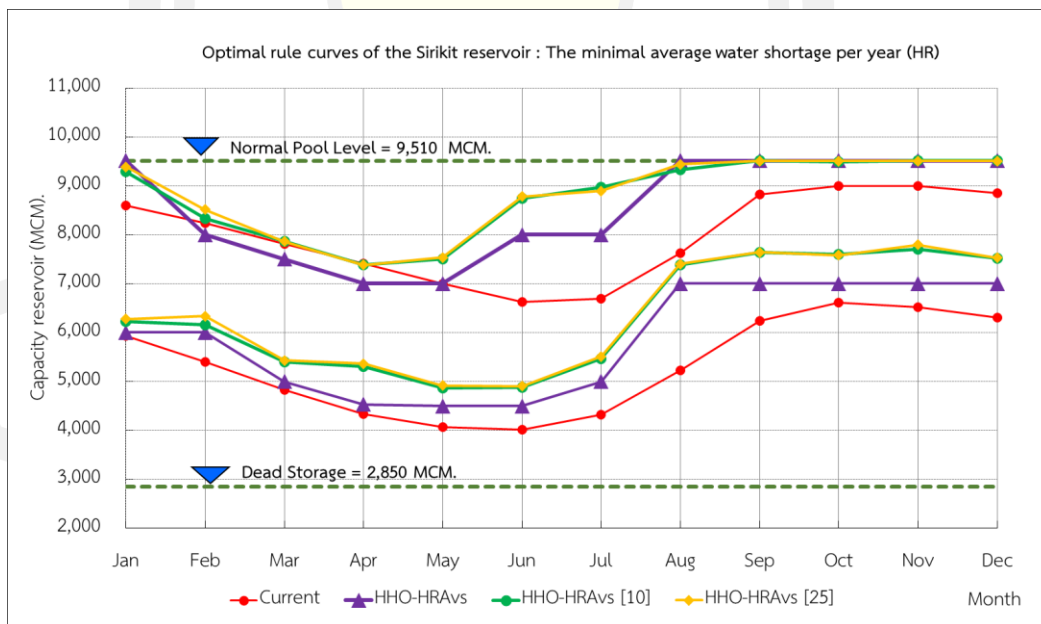
2. โค้งควบคุมล่าง (Lower Rule Curve) ลักษณะของเส้นโค้งล่างทั้งสองอ่างของเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมของ HHO จากทั้ง 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ด้วยกรณีค้นหาจากช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10ปี, 25 ปี และทั้งชุดข้อมูล จะได้เส้นโค้งที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการค้นหาโค้งจากทั้งชุดข้อมูล (HHO-SOP) คลอบคลุมไปถึงทั้งช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี (HHO-SOP [10]) และ 25 ปี (HHO-SOP [25]) และเมื่อเทียบกับเส้นโค้งเดิมที่ใช้งานปัจจุบัน (Current) พบว่าลักษณะเส้นโค้งควบคุมเส้นล่างเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นเพื่อเตรียมปล่อยน้ำตามความต้องการท้าย

อ่างเพื่อเพิ่มการชลประทานและช่วยให้ทำให้อ่างเก็บน้ำมีปริมาตรที่จะสามารถรองรับน้ำที่จะมาในฤดูการถัดไปได้

4.1.3.1 กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด

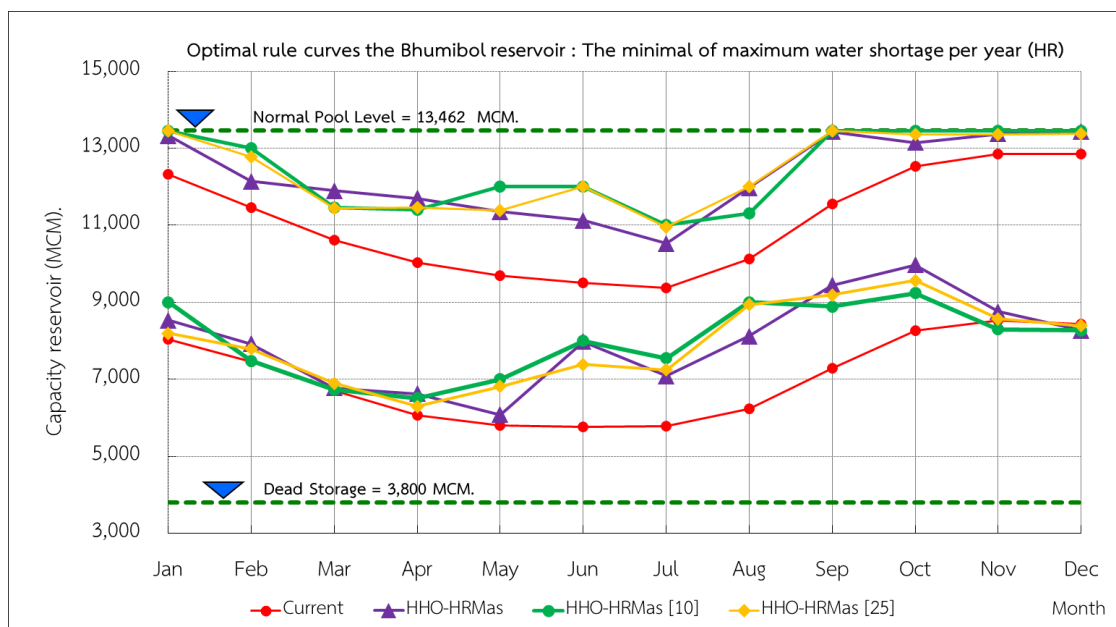


ภาพประกอบ 35 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ HR กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 57 ปี

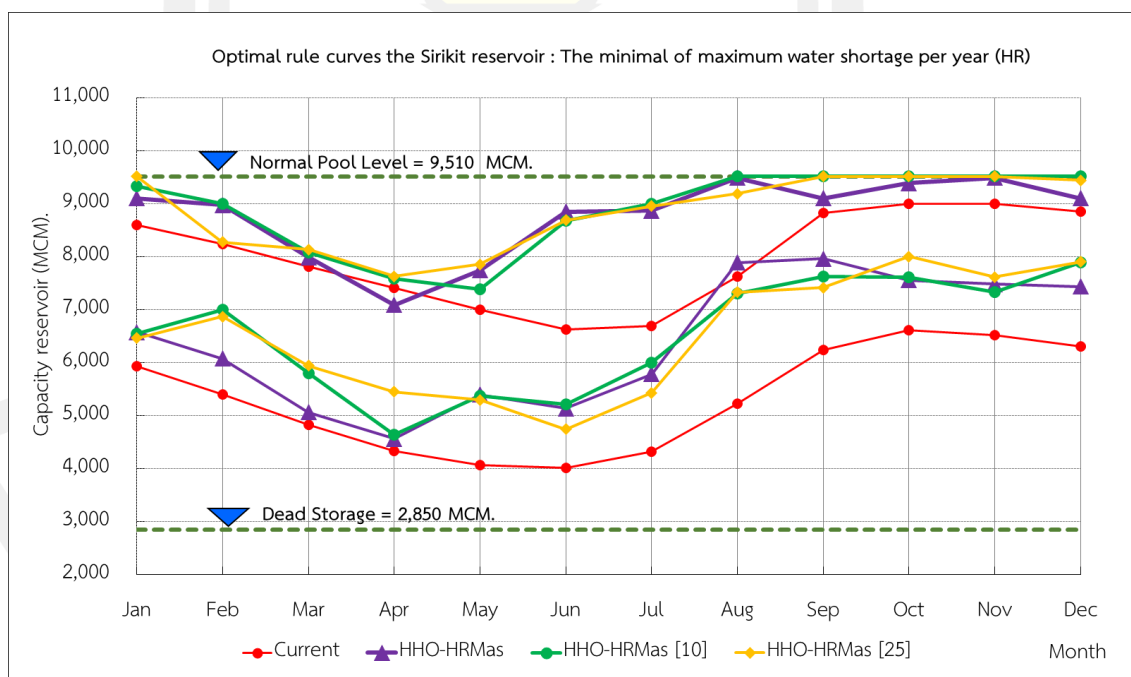


ภาพประกอบ 36 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ด้วยเกณฑ์ HR กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 47 ปี

4.1.3.2 กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าสูงสุดของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด

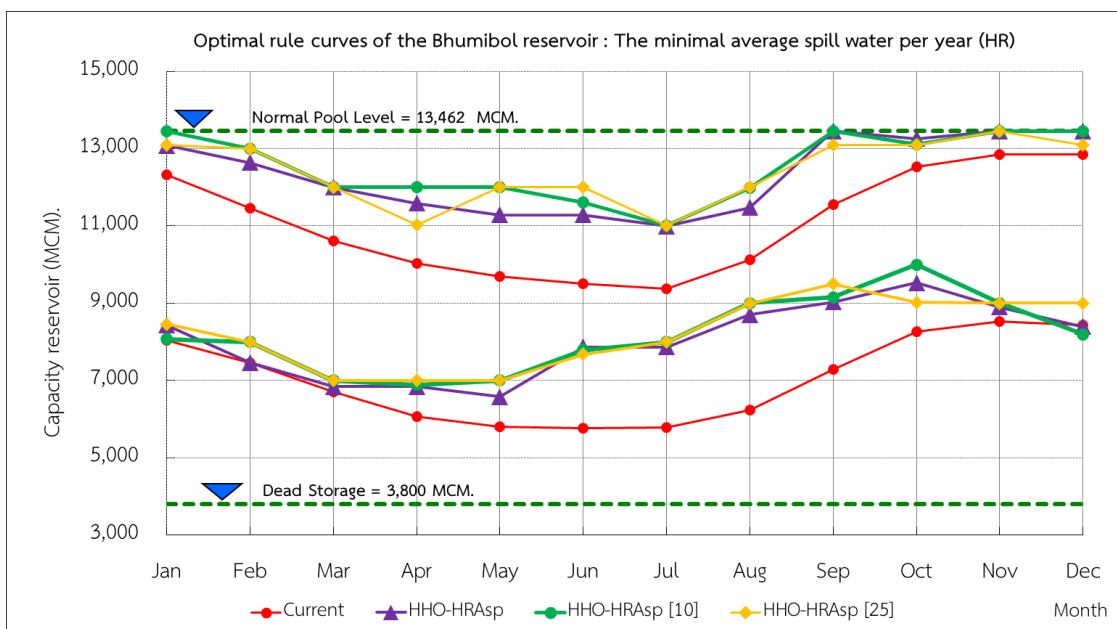


ภาพประกอบ 37 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ HR กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าสูงสุดของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 57 ปี

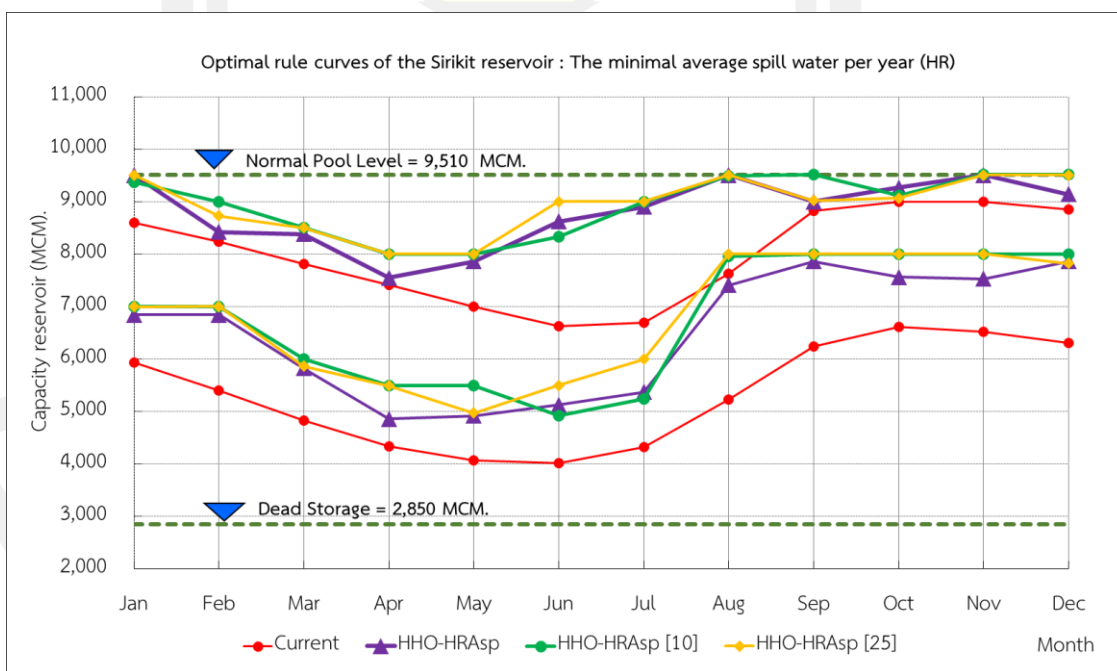


ภาพประกอบ 38 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ด้วยเกณฑ์ HR กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าสูงสุดของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 47 ปี

4.1.2.3 กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด



ภาพประกอบ 39 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ HR กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 57 ปี



ภาพประกอบ 40 โค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำภูมิพลด้วยเกณฑ์ HR กรณีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด ของช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25, และ 47 ปี

จากผลการศึกษาดังกล่าวข้างต้น ดังภาพประกอบที่ 29 – 40 จะเห็นได้ว่า เส้นโค้งที่เกิดจากกรณีเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating) และเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule จะได้ค่าโค้งควบคุมที่ลู่ไปในแนวทางเดียวกัน ซึ่งจะมีเพียงบางเดือนที่มีความแตกต่างในส่วนโค้งควบคุมเส้นล่าง

ผลของโค้งควบคุมจากอ่างเก็บน้ำทั้งสองจะเห็นได้ว่า รูปแบบของเส้นโค้งควบคุมเส้นล่างที่เหมาะสมที่จากเทคนิค HHO โดยพิจารณาจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule นั้นสูงกว่ารูปแบบของเทคนิค HHO โดยใช้เกณฑ์มาตรฐาน SOP และเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูแล้ง (มกราคม – พฤษภาคม) การควบคุมการปล่อยน้ำของเกณฑ์ Hedging rule ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงพฤษภาคมนั้นจำกัดการปล่อยน้ำมากกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งหมายความว่าเส้นโค้งควบคุมด้วยเกณฑ์ Hedging rule พยายามกักเก็บน้ำโดยการลดการปล่อยน้ำในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งเป็นเป้าหมายของเกณฑ์ Hedging rule ผลลัพธ์ยังแสดงให้เห็นว่าในช่วงฤดูฝน (สิงหาคม-พฤศจิกายน) เส้นโค้งควบคุมเส้นบนจากเกณฑ์ Hedging rule จะสูงกว่าเส้นโค้งควบคุมจากเกณฑ์มาตรฐาน SOP ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ให้อ่างเก็บน้ำกักเก็บน้ำมากขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการขาดแคลนน้ำอย่างรุนแรงในฤดูแล้งถัดไป

4.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ

การประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการทดสอบการทำงานของโค้งควบคุมเพื่อที่จะรู้ถึงผลลัพธ์หรือสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นว่าโค้งควบคุมสามารถรองรับกับสถานการณ์น้ำที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากความไม่แน่นอนต่าง ๆ เพื่อที่จะนำเป็นทางเลือกในการสนับสนุนการตัดสินใจในการนำโค้งควบคุมเหล่านั้นไปปฏิบัติจริง วิธีการประเมินจะเป็นการหาคำตอบของควมถี่ในการขาดแคลนน้ำ ความถี่ในการไหลล้น ปริมาณเฉลี่ย และช่วงเวลาของการเกิดสถานการณ์ โดยเปรียบเทียบการทำงานของโค้งควบคุมใหม่กับโค้งควบคุมที่ใช้อยู่ปัจจุบัน ซึ่ง 1 ชุดโค้งควบคุมในตารางทดสอบ คือผลของโค้งควบคุมทั้งสองอ่างเก็บน้ำจำนวน 48 จุดนำมาทดสอบพร้อมกัน สำหรับเหตุการณ์ที่นำมาทดสอบโค้งควบคุม ประกอบด้วย

4.2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบของโค้งควบคุมด้วยเทคนิค HHO, GA และ WDO กรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule ด้วยข้อมูลปริมาณน้ำทำในอดีต 1 ชุดเหตุการณ์

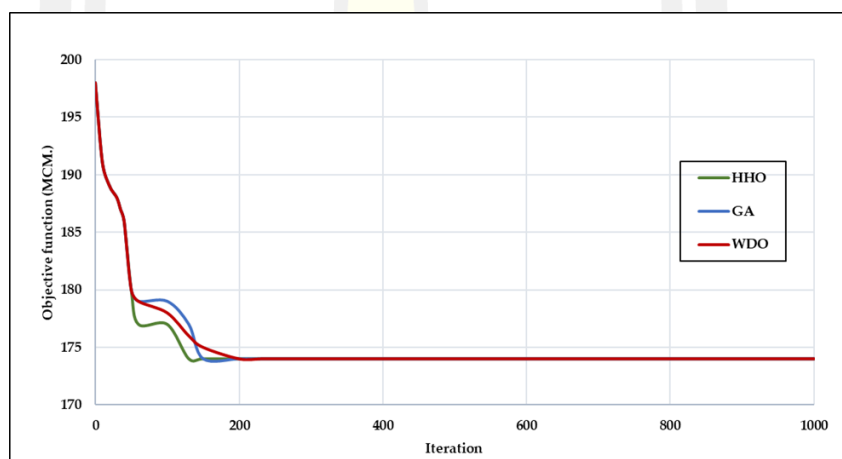
ผลการประเมินได้แสดงได้ดังตาราง 2 จะเห็นได้ว่าทุกโคงควบคุมที่เกิดจากเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดทั้ง 3 เทคนิคนั้น (HHO-HRAVs, GA-HRAVs, WDO-HRAVs) เมื่อนำมาประเมินประสิทธิภาพเปรียบเทียบกับโคงควบคุมปัจจุบัน (Current) พบว่าการใช้เส้นโคงควบคุมที่เหมาะสมจากเทคนิค HHO, GA และ WDO มีความแตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากรูปแบบของของโคงควบคุมใกล้เคียงกัน ผลลัพธ์ยังแสดงให้เห็นว่าเส้นโคงควบคุมที่เหมาะสมที่สุดของ HHO มีประสิทธิภาพมากกว่าเทคนิคอื่นๆ ในการบรรเทาค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำและน้ำไหลล้นของน้ำ วิธีการ HHO, GA และ WDO สามารถลดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำได้ถึง 4.8%, 4.7% และ 4.5% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเส้นโคงควบคุมปัจจุบัน ซึ่งโคงควบคุมปัจจุบัน (Current) มีค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำ 182.860 ล้านลูกบาศก์เมตร สูงกว่าค่าของการใช้โคงควบคุม HHO-HRAVs, GA-HRAVs, และ WDO-HRAVs ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำอยู่ที่ 174.140, 174.250 และ 174.720 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ นอกเหนือจากนี้โคงควบคุมใหม่จากเทคนิค HHO-HRAVs, GA-HRAVs, และ WDO-HRAVs ก็ยังสามารถบรรเทาค่าเฉลี่ยของการไหลล้นได้ดีกว่าโคงควบคุมเดิม (Current) ซึ่งมีค่าอยู่ที่ 1,390.123 ล้านลูกบาศก์เมตร ลดลงมาอยู่ที่ 1,121.877, 1,121.965 และ 1,121.993 ล้านลูกบาศก์เมตร ตามลำดับอีกด้วย

ตาราง 2 ผลการประเมินเหตุการณ์ปริมาณน้ำขาดแคลนและน้ำไหลส่วนเกินของโคงโคงควบคุมจากเทคนิค HHO, GA และ WDO กรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule ด้วยข้อมูลปริมาณน้ำทำในอดีต 1 ชุดเหตุการณ์ โดยพิจารณาค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด

สถานการณ์	โคงควบคุม	ความถี่ (ครั้ง/ปี)	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงเวลา (ปี)	
			เฉลี่ย	มากที่สุด	เฉลี่ย	มากที่สุด
ขาดแคลน	Current	0.368	182.860	1,964.000	7.115	12.000
	HHO-HRAVs	0.456	174.140	1,623.000	7.900	12.000
	GA-HRAVs	0.456	174.250	1,623.000	7.900	12.000
	WDO-HRAVs	0.456	174.720	1,623.000	7.900	12.000
น้ำไหลส่วนเกิน	Current	0.825	1,390.123	7,643.000	4.915	10.000
	HHO-HRAVs	0.842	1,121.877	7,540.000	4.000	8.000
	GA-HRAVs	0.842	1,121.965	7,540.000	4.000	8.000
	WDO-HRAVs	0.842	1,121.993	7,540.000	4.000	8.000

1) การลู่เข้าหาคำตอบการค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสม ของเทคนิค HHO, GA และ WDO

โดยการเปรียบเทียบจำนวนรอบการลู่เข้าหาคำตอบของเทคนิค HHO, GA และ WDO สำหรับวิธีการค้นหาเส้นโค้งควบคุมที่เหมาะสมที่สุดภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพการค้นหา ดังภาพประกอบที่ 4.15 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเส้นโค้งควบคุมจากเทคนิค HHO มีจำนวนรอบการลู่เข้าหาคำตอบจำนวน 130 ครั้ง และจำนวนรอบการลู่เข้าหาคำตอบของ GA และ WDO ที่ดีที่สุดคือ 150 และ 200 ตามลำดับ ในการค้นหาเส้นโค้งกฎแหล่งกักเก็บสามารถสรุปได้ว่าแนวทาง HHO ทำได้ดีกว่าเทคนิค GA และ WDO ในแง่ของความเร็วในการค้นหาคำตอบ



ภาพประกอบ 4.15 การลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสม ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด จากเทคนิค HHO, GA และ WDO

4.2.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุมด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating rules) จากน้ำท่าอดีต 1 ชุดเหตุการณ์

การประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) โดยใช้ข้อมูลน้ำที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำด้วยข้อมูลน้ำท่าอดีต 1 ชุดเหตุการณ์ ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating rules) เพื่อประเมินสถานการณ์การขาดแคลนนํ้า การไหลล้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงถึงสถานการณ์การขาดแคลนนํ้าและน้ำไหลล้นของอ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์เมื่อใช้

โค้งควบคุมใหม่ที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์และช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีตที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบกับโค้งควบคุมเดิม (Current) ผลการประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุมดังแสดงในตาราง 3

จากตารางแสดงให้เห็นว่า โค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ที่เกิดจากการค้นหาแบบห้ชุดข้อมูล (HHO-HRAVs) จะเกิดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดในทุกเส้นโค้งควบคุมได้แก่ 153.789 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าคือ 1,765.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.333 ครั้ง/ปี โดยที่โค้งควบคุมเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (Current) เกิดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้า 167.737 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าคือ 1,904.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.303 ครั้ง/ปี

ในขณะเดียวกัน โค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำด้วยเกณฑ์มาตรฐาน SOP โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น ค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ที่เกิดจากการค้นหาแบบห้ชุดข้อมูล (HHO-SOPMas) จะเกิดค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดในทุกเส้นโค้งควบคุมได้แก่ 1,338.000 ล้านลูกบาศก์เมตร แต่เกิดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าสูงที่สุดคือ 184.842 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.298 ครั้ง/ปี

นอกเหนือจากนี้ โค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำด้วยเกณฑ์มาตรฐาน SOP โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด ที่เกิดจากการค้นหาแบบห้ชุดข้อมูล (HHO-HRAsp) จะเกิดค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุดในทุกเส้นโค้งควบคุมได้แก่ 978.088 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการไหลล้นคือ 7,315.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.807 ครั้ง/ปี โดยที่โค้งควบคุมเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (Current) เกิดค่าเฉลี่ยของการไหลล้นคือ 1,379.632 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการไหลล้นคือ 7,643.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.825 ครั้ง/ปี

ตาราง 3 ผลการประเมินเหตุการณ์ปริมาณน้ำขาดแคลนและน้ำไหลส่วนเกินของโค้งควบคุมจากกรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating Rules) ด้วยข้อมูลปริมาณน้ำทำในอดีต 1 ชุดเหตุการณ์

สถานการณ์	โค้งควบคุม	ความถี่ (ครั้ง/ปี)	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงเวลา (ปี)	
			เฉลี่ย	มากที่สุด	เฉลี่ย	มากที่สุด
ขาดแคลน	Current	0.303	167.737	1,904.000	6.875	12.000
	HHO-HRAvs	0.333	153.789	1,765.000	6.529	12.000
	HHO-HRAvs [10]	0.338	157.158	1,741.000	6.765	12.000
	HHO-HRAvs [25]	0.341	161.158	1,738.000	6.765	12.000
	HHO-HRMas	0.298	180.825	1,502.000	6.474	12.000
	HHO-HRMas [10]	0.316	189.105	1,559.000	6.778	12.000
	HHO-HRMas [25]	0.316	192.053	1,596.000	6.333	12.000
	HHO-HRAsp	0.356	204.298	1,819.000	6.833	12.000
	HHO-HRAsp [10]	0.353	231.456	1,832.000	6.450	12.000
	HHO-HRAsp [25]	0.351	226.789	1,840.000	6.400	12.000
	HHO-SOPAvs	0.333	153.982	1,766.000	6.588	12.000
	HHO-SOPAvs [10]	0.341	159.281	1,739.000	6.765	12.000
	HHO-SOPAvs [25]	0.336	157.333	1,740.000	7.000	12.000
	HHO-SOPMas	0.298	184.842	1,338.000	6.684	12.000
	HHO-SOPMas [10]	0.306	185.386	1,340.000	6.611	12.000
	HHO-SOPMas [25]	0.308	188.386	1,339.000	6.389	12.000
HHO-SOPAsp	0.350	233.965	1,869.000	6.526	12.000	
HHO-SOPAsp [10]	0.347	237.123	1,845.000	7.167	12.000	
HHO-SOPAsp [25]	0.349	230.579	1,942.000	7.167	12.000	
ไหลล้น	Current	0.825	1,379.632	7,643.000	4.894	10.000
	HHO-HRAvs	0.842	1,116.895	7,540.000	4.000	8.000
	HHO-HRAvs [10]	0.849	1,174.509	7,531.000	4.422	8.000
	HHO-HRAvs [25]	0.849	1,179.509	7,528.000	4.422	8.000
	HHO-HRMas	0.789	1,351.175	7,214.000	5.146	9.000

สถานการณ์	โค้งควบคุม	ความถี่ (ครั้ง/ปี)	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงเวลา (ปี)	
			เฉลี่ย	มากที่สุด	เฉลี่ย	มากที่สุด
	HHO-HRMas [10]	0.785	1,376.053	7,220.000	5.214	9.000
	HHO-HRMas [25]	0.786	1,368.526	7,216.000	5.211	9.000
	HHO-HRAsp	0.807	978.404	7,315.000	2.767	7.000
	HHO-HRAsp [10]	0.802	1,066.702	7,304.000	2.667	7.000
	HHO-HRAsp [25]	0.804	1,047.509	7,359.000	2.867	7.000
	HHO-SOPAvs	0.842	1,158.316	7,365.000	3.289	7.000
	HHO-SOPAvs [10]	0.850	1,258.333	7,503.000	3.867	7.000
	HHO-SOPAvs [25]	0.850	1,217.193	7,554.000	3.565	7.000
	HHO-SOPMas	0.789	1,349.754	7,275.000	5.125	9.000
	HHO-SOPMas [10]	0.786	1,245.228	7,324.000	4.922	9.000
	HHO-SOPMas [25]	0.801	1,182.737	7,417.000	4.900	9.000
	HHO-SOPAsp	0.803	1,032.088	7,222.000	2.800	6.000
	HHO-SOPAsp [10]	0.803	1,035.526	7,273.000	2.889	6.000
	HHO-SOPAsp [25]	0.803	1,038.632	7,232.000	2.874	6.000

4.2.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุมด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating rules) จากน้ำท่าอดีตสังเคราะห์ 1,000 เหตุการณ์

การประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) โดยใช้ข้อมูลน้ำที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำด้วยข้อมูลน้ำท่าอดีต 1000 ชุดเหตุการณ์ ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating rules) เพื่อประเมินสถานการณ์การขาดแคลนน้ำ การไหลล้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงถึงสถานการณ์การขาดแคลนน้ำและน้ำไหลล้นของอ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์เมื่อใช้โค้งควบคุมใหม่ที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์และช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีตที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบกับโค้งควบคุมเดิม (Current) ผลการประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุมดังแสดงในตาราง 4

จากผลการศึกษาให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการประเมินในข้อ 4.2.2 หรืออธิบายได้ว่าโค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ที่เกิดจากการค้นหาแบบหั่งชุดข้อมูล (HHO-HRAVs) จะเกิดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดในทุกเส้นโค้งควบคุมได้แก่ 164.105 ล้านลูกบาศก์เมตร และ

เกิดค่าสูงสุดของการขาดแคลนน้ำคือ 1,385.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.211 ครั้ง/ปี โดยที่โค้งควบคุมเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (Current) เกิดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำ 176.298 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการขาดแคลนน้ำคือ 1,517.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.211 ครั้ง/ปี

ในขณะเดียวกัน โค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำด้วยเกณฑ์มาตรฐาน SOP โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น ค่าสูงสุดของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด ที่เกิดจากการค้นหาแบบทั้งชุดข้อมูล (HHO-SOPMas) จะเกิดค่าสูงสุดของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดในทุกเส้นโค้งควบคุมได้แก่ 1,252.000 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำคือ 182.745 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.228 ครั้ง/ปี

นอกเหนือจากนี้ โค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำด้วยเกณฑ์มาตรฐาน SOP โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด ที่เกิดจากการค้นหาแบบทั้งชุดข้อมูล (HHO-SOPAsp) จะเกิดค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุดในทุกเส้นโค้งควบคุมได้แก่ 1,049.088 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการไหลล้นคือ 8,113.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.842 ครั้ง/ปี โดยที่โค้งควบคุมเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (Current) เกิดค่าเฉลี่ยของการไหลล้นคือ 1,414.456 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการไหลล้นคือ 8,249.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.860 ครั้ง/ปี

ตาราง 4 ผลการประเมินเหตุการณ์ปริมาณน้ำขาดแคลนและน้ำไหลส่วนเกินของโค้งควบคุมจากกรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating Rules) ด้วยข้อมูลปริมาณน้ำทำในอดีต 1,000 ชุดเหตุการณ์

สถานการณ์	สถานที่	โค้งควบคุม	ความถี่ (ครั้ง/ปี)	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงเวลา (ปี)	
				เฉลี่ย	มากที่สุด	เฉลี่ย	มากที่สุด
ขาดแคลน	Current	μ	0.211	176.298	1,517.000	9.818	12.000
		σ	0.135	1.084	2.546	3.986	4.155
	HHO-HRAvs	μ	0.211	164.105	1,385.000	10.091	12.000
		σ	0.205	1.174	2.423	3.754	4.741

สถาน การณ์	ไต่จควบคุม		ความถี่ (ครั้ง/ปี)	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงเวลา (ปี)	
				เฉลี่ย	มากที่สุด	เฉลี่ย	มากที่สุด
HHO-HRAvs [10]	μ	0.211	167.678	1,390.000	10.182	12.000	
	σ	0.262	1.874	2.549	3.876	4.961	
HHO-HRAvs [25]	μ	0.211	169.334	1,393.000	10.364	12.000	
	σ	0.166	1.466	2.764	3.456	4.764	
HHO-HRMas	μ	0.228	188.456	1,280.000	9.750	12.000	
	σ	0.195	1.041	2.945	3.646	4.554	
HHO-HRMas [10]	μ	0.228	193.684	1,298.000	9.500	12.000	
	σ	0.746	1.166	2.766	3.231	4.746	
HHO-HRMas [25]	μ	0.228	192.474	1,285.000	9.333	12.000	
	σ	0.114	1.476	2.746	3.746	4.764	
HHO-HRAsp	μ	0.246	222.228	1,460.000	8.286	12.000	
	σ	0.152	1.546	2.654	3.165	4.456	
HHO-HRAsp [10]	μ	0.246	225.193	1,472.000	8.429	12.000	
	σ	0.166	1.769	2.476	3.746	4.741	
HHO-HRAsp [25]	μ	0.246	224.023	1,470.000	8.421	12.000	
	σ	0.792	1.494	2.716	3.746	4.132	
HHO-SOPAvs	μ	0.211	164.456	1,362.000	10.182	12.000	
	σ	0.163	1.134	2.136	3.466	4.164	
HHO-SOPAvs [10]	μ	0.211	166.175	1,377.000	10.417	12.000	
	σ	0.653	1.146	2.364	3.316	4.164	
HHO-SOPAvs [25]	μ	0.211	168.331	1,381.000	10.533	12.000	
	σ	0.323	1.151	2.161	3.463	4.135	
HHO-SOPMas	μ	0.228	182.754	1,252.000	9.544	12.000	
	σ	0.166	1.413	2.343	3.163	4.211	
HHO-SOPMas [10]	μ	0.228	190.842	1,257.000	9.749	12.000	
	σ	0.145	1.165	2.136	3.216	4.653	
HHO-SOPMas [25]	μ	0.228	188.343	1,254.000	9.724	12.000	
	σ	0.116	1.468	2.165	3.464	4.454	

สถาน การณ์	โด้งควบคุม	ความถี่ (ครั้ง/ปี)	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงเวลา (ปี)			
			เฉลี่ย	มากที่สุด	เฉลี่ย	มากที่สุด		
	HHO-SOPAsp	μ	0.246	208.596	1,441.000	8.214	12.000	
		σ	0.674	1.546	2.648	3.745	4.434	
	HHO-SOPAsp [10]	μ	0.246	210.460	1,453.000	8.500	12.000	
		σ	0.646	1.446	2.784	3.546	4.155	
	HHO-SOPAsp [25]	μ	0.246	212.386	1,459.000	8.615	12.000	
		σ	0.146	1.546	2.469	3.216	4.514	
	ไหลล้น	Current	μ	0.860	1,414.456	8,249.000	4.694	10.000
			σ	0.042	1.656	0.519	7.145	4.987
		HHO-HRAvs	μ	0.842	1,196.421	8,201.000	4.125	8.000
			σ	0.534	1.451	0.653	7.143	4.315
		HHO-HRAvs [10]	μ	0.842	1,191.754	8,205.000	4.102	8.000
			σ	0.542	1.634	0.153	7.654	4.316
HHO-HRAvs [25]		μ	0.842	1,183.772	8,213.000	4.099	8.000	
		σ	0.315	1.545	0.563	7.315	4.154	
HHO-HRMas		μ	0.860	1,299.719	7,894.000	5.510	9.000	
		σ	0.313	1.315	0.345	7.163	4.216	
HHO-HRMas [10]		μ	0.860	1,287.405	7,899.000	5.553	9.000	
		σ	0.465	1.565	0.546	7.756	4.514	
HHO-HRMas [25]		μ	0.860	1,271.193	7,912.000	5.571	9.000	
		σ	0.265	1.153	0.351	7.746	4.215	
HHO-HRAsp		μ	0.842	1,097.298	8,140.000	3.592	7.000	
		σ	0.314	1.464	0.353	7.321	4.465	
HHO-HRAsp [10]		μ	0.842	1,095.456	8,152.000	3.566	7.000	
		σ	0.0163	1.351	0.316	7.164	4.644	
HHO-HRAsp [25]		μ	0.842	1,087.316	8,158.000	3.500	7.000	
		σ	0.516	1.316	0.164	7.587	4.987	
HHO-SOPAvs	μ	0.842	1,151.596	8,197.000	4.025	7.000		
	σ	0.646	1.634	0.742	7.344	4.732		

สถาน การณ์	โค้งควบคุม		ความถี่ (ครั้ง/ปี)	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงเวลา (ปี)	
				เฉลี่ย	มากที่สุด	เฉลี่ย	มากที่สุด
HHO-SOPAvs [10]	μ		0.842	1,145.351	8,198.000	4.067	7.000
	σ		0.215	1.654	0.165	7.574	4.343
HHO-SOPAvs [25]	μ		0.842	1,141.258	8,200.000	4.083	7.000
	σ		0.143	1.143	0.314	7.315	4.534
HHO-SOPMas	μ		0.860	1,259.491	7,986.000	5.590	9.000
	σ		0.351	1.365	0.516	7.165	4.321
HHO-SOPMas [10]	μ		0.860	1,263.842	7,977.000	5.160	9.000
	σ		0.165	1.154	0.314	7.846	4.314
HHO-SOPMas [25]	μ		0.860	1,269.332	7,963.000	5.103	9.000
	σ		0.546	1.146	0.324	7.482	4.631
HHO-SOPAsp	μ		0.842	1,049.088	8,113.000	2.908	6.000
	σ		0.478	1.168	0.764	7.614	4.165
HHO-SOPAsp [10]	μ		0.842	1,053.239	8,115.000	2.979	6.000
	σ		0.321	1.769	0.646	7.632	4.745
HHO-SOPAsp [25]	μ		0.842	1,058.110	8,117.000	3.041	6.000
	σ		0.214	1.346	0.634	7.634	4.687

4.2.4 ผลการประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุม ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule จากน้ำท่าอดีต 1 ชุดเหตุการณ์

การประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) โดยใช้ข้อมูลน้ำที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำด้วยข้อมูลน้ำท่าอดีต 1 ชุดเหตุการณ์ ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule เพื่อประเมินสถานการณ์การขาดแคลนน้ำ การไหลล้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงถึงสถานการณ์การขาดแคลนน้ำและน้ำไหลล้นของอ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์เมื่อใช้โค้งควบคุมใหม่ที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์และช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีตที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบกับโค้งควบคุมเดิม (Current) ผลการประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุมดังแสดงในตาราง 5

จากตารางแสดงให้เห็นว่า โค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ที่เกิดจากการค้นหาแบบ

ทั้งชุดข้อมูล (HHO-HRAvs) จะเกิดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดในทุกเส้นโค้งควบคุมได้แก่ 174.140 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าคือ 1,623.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.456 ครั้ง/ปี โดยที่โค้งควบคุมเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (Current) เกิดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้า 182.860 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าคือ 1,964.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.368 ครั้ง/ปี

ในขณะเดียวกัน โค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยนํ้าแบบ Hedging rule โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น ค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ที่เกิดจากการค้นหาแบบทั้งชุดข้อมูล (HHO-HRMAs) จะเกิดค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดในทุกเส้นโค้งควบคุมได้แก่ 1,451.000 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าคือ 196.526 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.351 ครั้ง/ปี

นอกเหนือจากนี้ โค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยนํ้าแบบ Hedging rule โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด ที่เกิดจากการค้นหาแบบทั้งชุดข้อมูล (HHO-HRAsp) จะเกิดค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุดในทุกเส้นโค้งควบคุมได้แก่ 979.579 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการไหลล้นคือ 7,365.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.807 ครั้ง/ปี โดยที่โค้งควบคุมเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (Current) เกิดค่าเฉลี่ยของการไหลล้นคือ 1,390.123 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการไหลล้นคือ 7,643.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.825 ครั้ง/ปี

ตาราง 5 ผลการประเมินเหตุการณ์ปริมาณนํ้าขาดแคลนและนํ้าไหลส่วนเกินของโค้งควบคุมจากกรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยนํ้าแบบ Hedging rule ด้วยข้อมูลปริมาณนํ้าทำในอดีต 1 ชุดเหตุการณ์

สถานการณ์	โค้งควบคุม	ความถี่ (ครั้ง/ปี)	ปริมาณนํ้า (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงเวลา (ปี)	
			เฉลี่ย	มากที่สุด	เฉลี่ย	มากที่สุด
ขาดแคลน	Current	0.368	182.860	1,964.000	7.115	12.000
	HHO-HRAvs	0.456	174.140	1,623.000	7.900	12.000
	HHO-HRAvs [10]	0.468	178.330	1,680.000	8.000	12.000
	HHO-HRAvs [25]	0.470	181.228	1,676.000	8.000	12.000
	HHO-HRMAs	0.351	196.526	1,451.000	8.050	12.000

สถานการณ์	โค้งควบคุม	ความถี่ (ครั้ง/ปี)	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงเวลา (ปี)	
			เฉลี่ย	มากที่สุด	เฉลี่ย	มากที่สุด
	HHO-SOPMas [10]	0.814	1,253.053	7,275.000	5.104	9.000
	HHO-SOPMas [25]	0.838	1,188.211	7,417.000	4.689	9.000
	HHO-SOPAsp	0.845	1,041.281	7,304.000	2.894	6.000
	HHO-SOPAsp [10]	0.789	1,049.649	7,359.000	2.889	6.000
	HHO-SOPAsp [25]	0.789	1,168.123	7,432.000	3.200	6.000

4.2.5 ผลการประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุม ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule จากน้ำท่าอดีตสังเคราะห์ 1,000 เหตุการณ์

การประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ (Rule Curve) โดยใช้ข้อมูลน้ำที่ไหลเข้าสู่อ่างเก็บน้ำด้วยข้อมูลน้ำท่าอดีต 1000 ชุดเหตุการณ์ ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule เพื่อประเมินสถานการณ์การขาดแคลนน้ำ การไหลล้น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงถึงสถานการณ์การขาดแคลนน้ำและน้ำไหลล้นของอ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์เมื่อใช้โค้งควบคุมใหม่ที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์และช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีตที่แตกต่างกัน เปรียบเทียบกับโค้งควบคุมเดิม (Current) ผลการประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุมดังแสดงในตาราง 6

จากผลการศึกษาให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการประเมินในข้อ 4.2.4 หรืออธิบายได้ว่าโค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ที่เกิดจากการค้นหาแบบห้จุดข้อมูล (HHO-HRAVs) จะเกิดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดในทุกเส้นโค้งควบคุมได้แก่ 163.333 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าคือ 1,421.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.414 ครั้ง/ปี โดยที่โค้งควบคุมเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (Current) เกิดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนนํ้า 183.544 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าคือ 1,586.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.386 ครั้ง/ปี

ในขณะเดียวกัน โค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น ค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุด ที่เกิดจากการค้นหาแบบห้จุดข้อมูล (HHO-HRMas) จะเกิดค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดในทุกเส้นโค้งควบคุมได้แก่

1,323.000 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำคือ 184.421 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.316 ครั้ง/ปี

นอกเหนือจากนี้ โคว้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น ค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุด ที่เกิดจากการค้นหาแบบหั้งชุดข้อมูล (HHO-HRA_{sp}) จะเกิดค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุดในทุกเส้นโค้งควบคุมได้แก่ 1,049.544 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการไหลล้นคือ 8,126.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.842 ครั้ง/ปี โดยที่โค้งควบคุมเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (Current) เกิดค่าเฉลี่ยของการไหลล้นคือ 1,414.456 ล้านลูกบาศก์เมตร และเกิดค่าสูงสุดของการไหลล้นคือ 8,249.000 ล้านลูกบาศก์เมตร โดยมีความถี่ในการเกิดคือ 0.860 ครั้ง/ปี

ตาราง 6 ผลการประเมินเหตุการณ์ปริมาณน้ำขาดแคลนและน้ำไหลส่วนเกินของโค้งควบคุมจากกรณีการใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule ด้วยข้อมูลปริมาณน้ำทำในอดีต 1,000 ชุดเหตุการณ์

สถานการณ์	โค้งควบคุม	ความถี่ (ครั้ง/ปี)	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงเวลา (ปี)		
			เฉลี่ย	มากที่สุด	เฉลี่ย	มากที่สุด	
ขาดแคลน	Current	μ	0.386	183.544	1,586.000	6.455	12.000
		σ	0.546	1.546	2.163	3.514	4.321
	HHO-HRA _{vs}	μ	0.414	163.333	1,421.000	7.947	12.000
		σ	0.631	1.745	2.165	3.458	4.321
	HHO-HRA _{vs} [10]	μ	0.414	166.140	1,423.000	8.063	12.000
		σ	0.654	1.514	2.546	3.146	4.542
	HHO-HRA _{vs} [25]	μ	0.414	169.404	1,426.000	8.063	12.000
		σ	0.351	1.316	2.584	3.749	4.163
	HHO-HRM _{as}	μ	0.316	184.421	1,323.000	7.438	12.000
		σ	0.542	1.684	2.631	3.345	4.746
	HHO-HRM _{as} [10]	μ	0.316	186.930	1,325.000	7.667	12.000
		σ	0.635	1.364	2.469	3.345	4.354
	HHO-HRM _{as} [25]	μ	0.316	187.105	1,328.000	7.500	12.000
		σ	0.458	1.546	2.645	3.545	4.654

สถาน การณ์	ไค้ังควบคุม		ความถี่ (ครั้ง/ปี)	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงเวลา (ปี)	
				เฉลี่ย	มากที่สุด	เฉลี่ย	มากที่สุด
HHO-HRAsp	μ	0.281	219.193	1,489.000	8.188	12.000	
	σ	0.694	1.645	2.544	3.349	4.214	
HHO-HRAsp [10]	μ	0.281	216.825	1,487.000	8.375	12.000	
	σ	0.152	1.584	2.654	3.464	4.646	
HHO-HRAsp [25]	μ	0.281	217.842	1,482.000	8.000	12.000	
	σ	0.465	1.646	2.354	3.645	4.654	
HHO-SOPAvs	μ	0.432	177.175	1,439.000	7.647	12.000	
	σ	0.341	1.874	2.463	3.653	4.654	
HHO-SOPAvs [10]	μ	0.430	174.649	1,443.000	7.722	12.000	
	σ	0.234	1.153	2.532	3.653	4.524	
HHO-SOPAvs [25]	μ	0.431	176.579	1,445.000	7.611	12.000	
	σ	0.531	1.645	2.546	3.654	4.563	
HHO-SOPMas	μ	0.298	192.789	1,388.000	7.765	12.000	
	σ	0.531	1.545	2.434	3.464	4.524	
HHO-SOPMas [10]	μ	0.298	195.281	1,382.000	7.677	12.000	
	σ	0.164	1.314	2.654	3.465	4.656	
HHO-SOPMas [25]	μ	0.298	198.439	1,384.000	7.713	12.000	
	σ	0.245	1.356	2.667	3.314	4.346	
HHO-SOPAsp	μ	0.281	231.807	1,496.000	8.188	12.000	
	σ	0.346	1.534	2.646	3.654	4.654	
HHO-SOPAsp [10]	μ	0.281	230.035	1,498.000	8.250	12.000	
	σ	0.576	1.632	2.564	3.534	4.762	
HHO-SOPAsp [25]	μ	0.281	232.018	1,499.000	8.500	12.000	
	σ	0.634	1.346	2.346	3.468	4.462	
ไทลลัน	Current	μ	0.860	1,327.070	8,289.000	4.714	9.000
		σ	0.345	1.456	0.314	7.687	4.264
HHO-HRAvs	μ	0.860	1,199.000	8,210.000	4.125	8.000	
	σ	0.215	1.764	0.315	7.315	4.764	

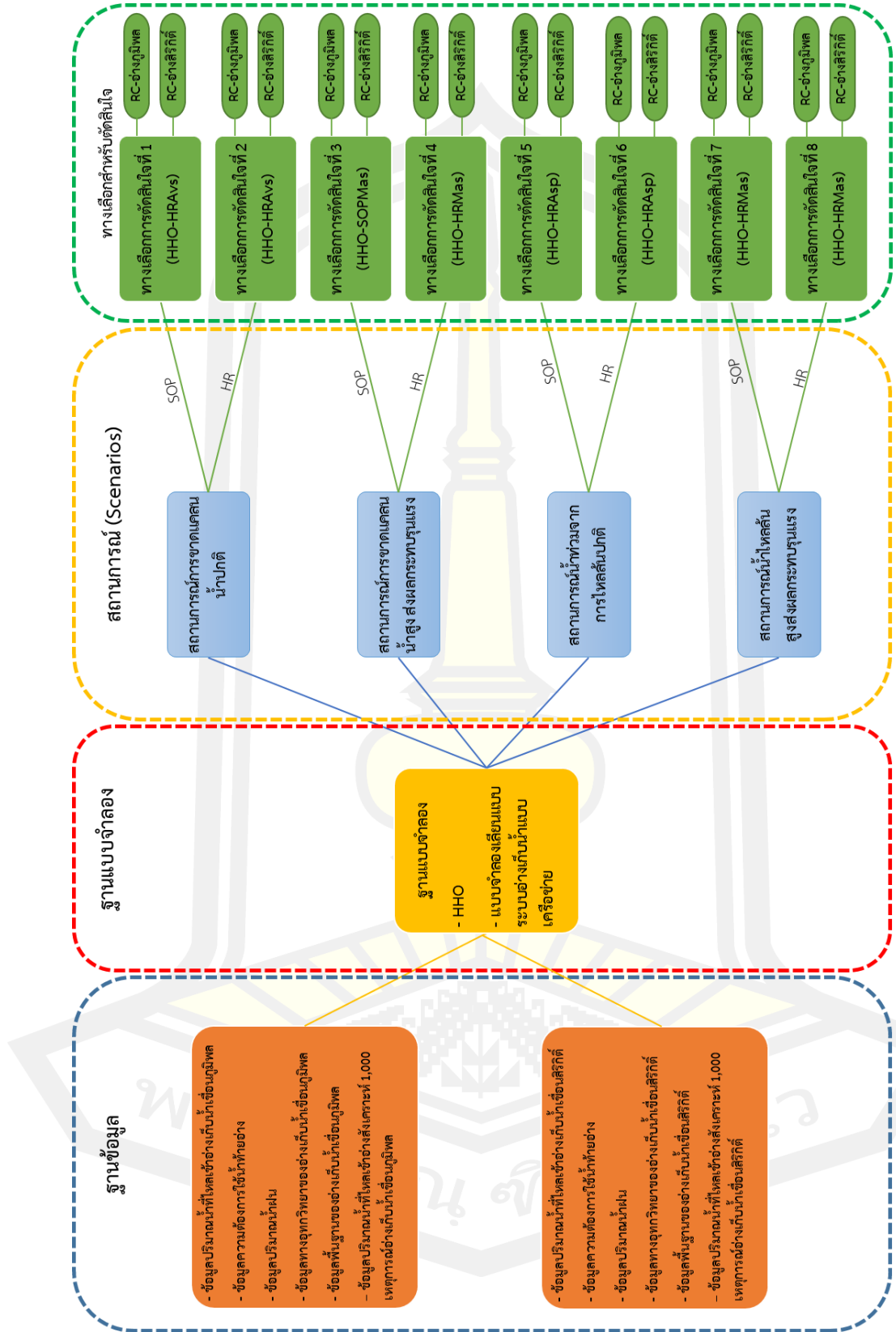
สถาน การณ์	ไค้ังควบคุม		ความถี่ (ครั้ง/ปี)	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงเวลา (ปี)	
				เฉลี่ย	มากที่สุด	เฉลี่ย	มากที่สุด
HHO-HRAvs [10]	μ	0.860	1,194.000	8,222.000	4.117	8.000	
	σ	0.021	1.465	0.564	7.752	4.741	
HHO-HRAvs [25]	μ	0.860	1,191.000	8,229.000	4.101	8.000	
	σ	0.114	1.634	0.646	7.434	4.434	
HHO-HRMas	μ	0.860	1,216.053	8,203.000	4.102	9.000	
	σ	0.645	1.146	0.465	7.534	4.764	
HHO-HRMas [10]	μ	0.860	1,210.860	8,214.000	4.042	9.000	
	σ	0.746	1.343	0.456	7.745	4.145	
HHO-HRMas [25]	μ	0.860	1,212.684	8,206.000	3.959	9.000	
	σ	0.746	1.546	0.547	7.584	4.467	
HHO-HRAsp	μ	0.842	1,049.544	8,126.000	3.083	7.000	
	σ	0.684	1.578	0.146	7.467	4.146	
HHO-HRAsp [10]	μ	0.842	1,096.982	7,999.000	2.708	7.000	
	σ	0.546	1.434	0.413	7.763	4.437	
HHO-HRAsp [25]	μ	0.842	1,086.175	8,007.000	2.938	7.000	
	σ	0.764	1.467	0.795	7.731	4.431	
HHO-SOPAvs	μ	0.860	1,206.158	8,239.000	4.327	7.000	
	σ	0.764	1.764	0.654	7.763	4.973	
HHO-SOPAvs [10]	μ	0.860	1,202.281	8,249.000	4.490	7.000	
	σ	0.343	1.576	0.137	7.974	4.315	
HHO-SOPAvs [25]	μ	0.860	1,204.772	8,244.000	4.367	7.000	
	σ	0.743	1.713	0.316	7.453	4.218	
HHO-SOPMas	μ	0.860	1,262.193	8,156.000	3.837	9.000	
	σ	0.315	1.646	0.744	7.431	4.317	
HHO-SOPMas [10]	μ	0.860	1,272.000	8,263.000	3.592	9.000	
	σ	0.645	1.135	0.352	7.321	4.321	
HHO-SOPMas [25]	μ	0.860	1,285.614	8,271.000	3.414	9.000	
	σ	0.314	1.765	0.546	7.746	4.387	

สถาน การณ์	ไค้ควบคุม		ความถี่ (ครั้ง/ปี)	ปริมาณน้ำ (ล้าน ลบ.ม.)		ช่วงเวลา (ปี)	
				เฉลี่ย	มากที่สุด	เฉลี่ย	มากที่สุด
HHO-SOPA _{sp}	μ	0.842	1,089.596	7,896.000	3.041	6.000	
	σ	0.465	1.674	0.634	7.764	4.146	
HHO-SOPA _{sp} [10]	μ	0.842	1,098.263	8,171.000	3.379	6.000	
	σ	0.215	1.463	0.521	7.545	4.654	
HHO-SOPA _{sp} [25]	μ	0.842	1,102.544	8,214.000	3.521	6.000	
	σ	0.658	1.466	0.317	7.684	4.542	

4.3 ผลการสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจ

จากขั้นตอนการดำเนินงานและการค้นหาไค้ควบคุมของอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่าย เพื่อหาการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 นั้น ทำให้ได้มาซึ่งระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการดำเนินการอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายของอ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ ซึ่งสามารถช่วยให้ผู้บริหารได้รับแนวทาง ข้อมูล และสถานการณ์ที่จะเกิดในแต่ละทางเลือก ไปช่วยในการประกอบการตัดสินใจในการดำเนินงานอ่างเก็บน้ำ ตามบริบทและนโยบายการบริหารงานของอ่างเก็บน้ำ เพื่อให้ทราบถึงสิ่งที่จะเกิดขึ้นต่อไปในเบื้องต้นถ้าหากเลือกสถานการณ์ต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยให้สามารถเฝ้าระวังต่อเหตุการณ์และสถานการณ์ที่รุนแรง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการงานด้านแผนได้ตามความต้องการของผู้บริหาร รวมทั้งยังมีส่วนสำคัญ ในการกำหนดนโยบายและตั้งเป้าหมายและการกำหนดวิสัยทัศน์ขององค์กรให้ประสบความสำเร็จ ในหัวข้อนี้ ผู้เขียนได้นำเสนอผลในการสร้างระบบฐานข้อมูลที่จะช่วยนำมาเป็นส่วนสนับสนุนในการประเมินสถานการณ์ที่เกิดขึ้นและฐานแบบจำลองที่จะช่วยนำมาประเมินและค้นหาคำตอบเบื้องต้นของสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้น และรวมไปถึง ผลการสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อเป็นส่วนในการบอกผลของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในสถานการณ์ต่าง ๆ ซึ่งสถานการณ์นั้นเกิดจากการนำเอาไค้ของ 2 อ่างมาทำงานพร้อมกัน ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดดังภาพประกอบที่ 41

จากผลการศึกษาพบว่า ผลทางเลือกของระบบสนับสนุนการตัดสินใจของอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายคืออ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ เมื่อเกิดสถานการณ์การขาดแคลนน้ำของอ่างเก็บน้ำในสถานการณ์ต่าง ๆ จะเกิดทางเลือกการตัดสินใจสำหรับการนำไค้ควบคุมชุดที่ดีที่สุดในแต่ละสถานการณ์ไปใช้งานทั้งหมด 8 ทางเลือก ซึ่งจะสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานในแง่ของการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำด้วยไค้ควบคุมได้

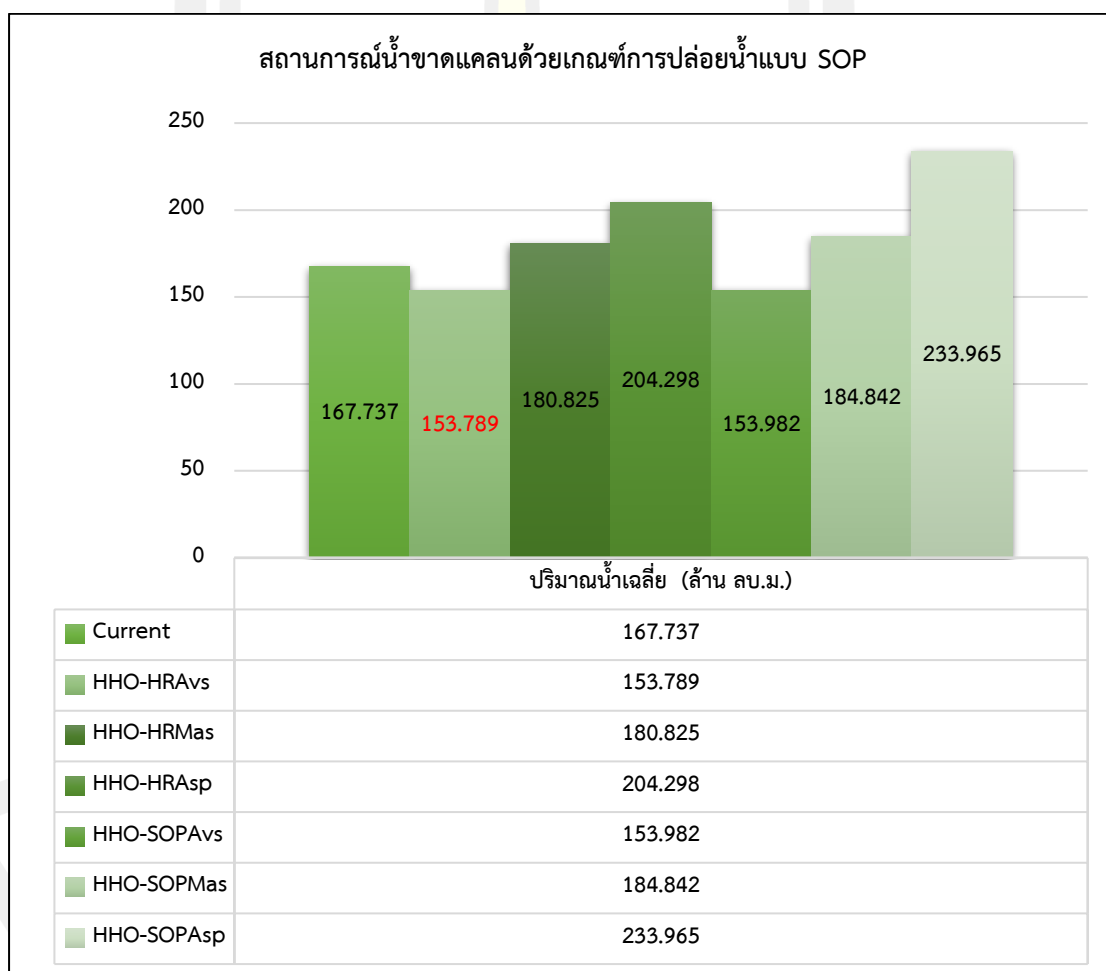


ภาพประกอบ 41 ผลทางเลือกของระบบสนับสนุนการตัดสินใจอ่างเก็บน้ำเครือข่าย

4.3.1 ผลทางเลือกของระบบสนับสนุนการตัดสินใจ

4.3.1.1 ทางเลือกการตัดสินใจที่ 1

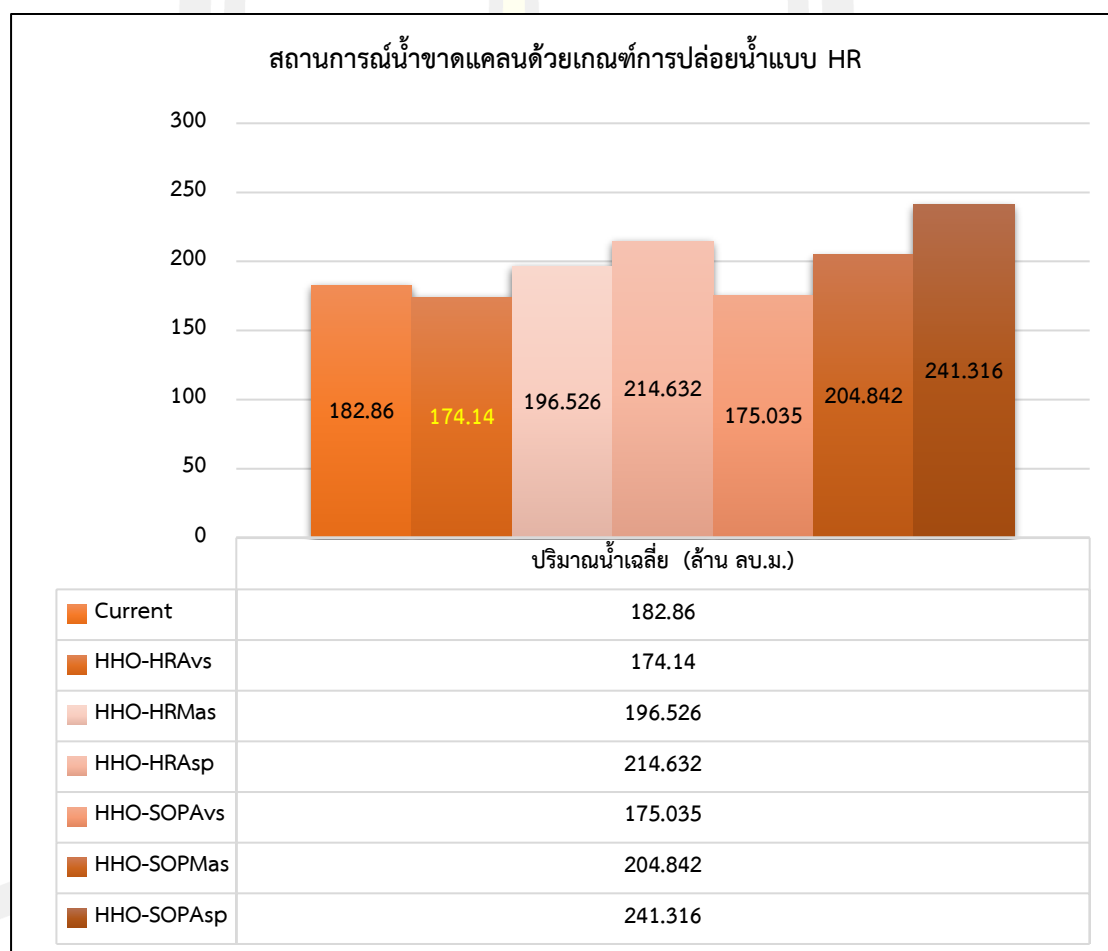
เมื่อสถานการณ์ของอ่างเก็บน้ำเครือข่ายมีการขาดแคลนน้ำปกติ และผู้ใช้งานหรือผู้ตัดสินใจต้องการจะปล่อยน้ำด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน (SOP) ทางเลือกการตัดสินใจที่ดีที่สุดที่เหมาะสมจะนำไปปฏิบัติได้แก่ โควิดควบคุม HHO-HRAVs ซึ่งเป็นโค้งที่ทำให้เกิดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทุกเส้นโค้งคือ 153.789 ล้านลูกบาศก์เมตร



ภาพประกอบ 42 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนน้ำของทางเลือกการตัดสินใจที่ 1

4.3.1.2 ทางเลือกการตัดสินใจที่ 2

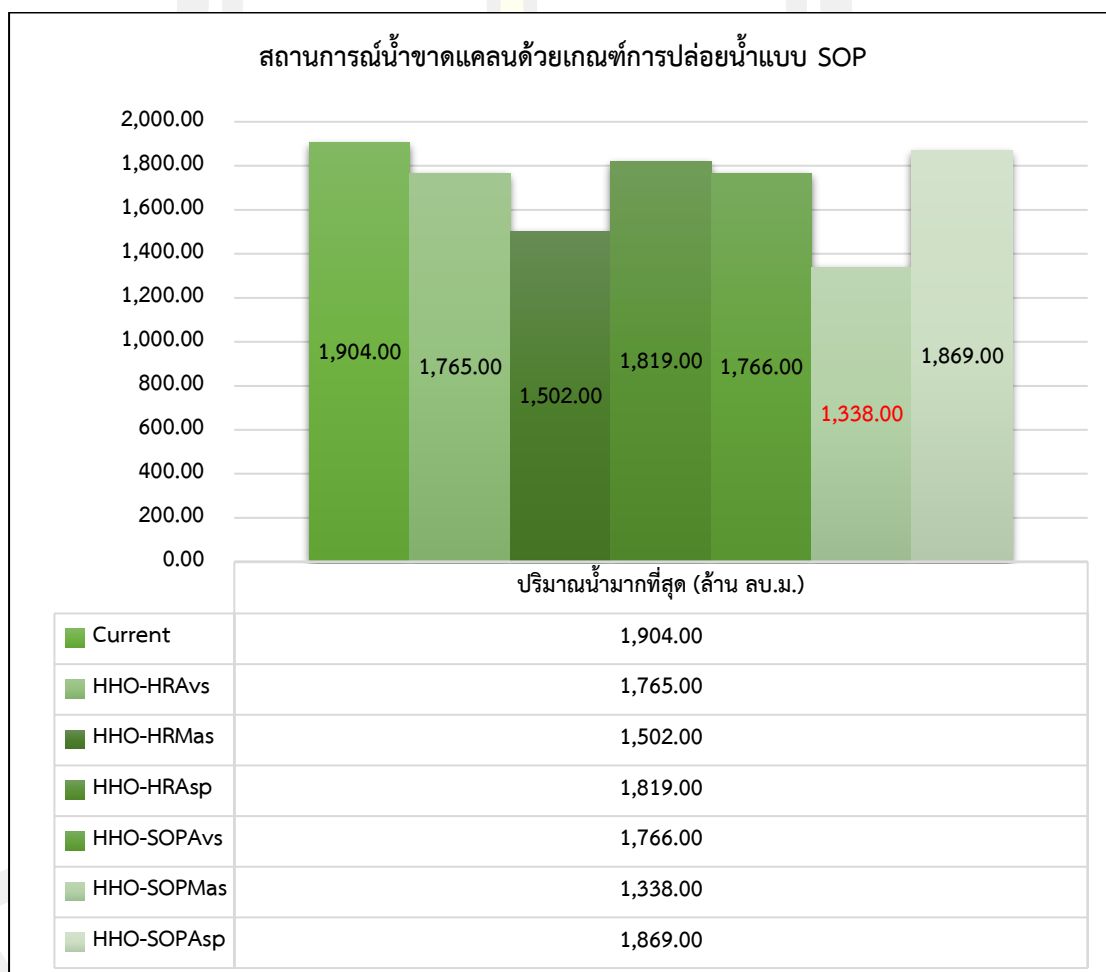
เมื่อสถานการณ์ของอ่างเก็บน้ำเครือข่ายมีการขาดแคลนน้ำปกติ และผู้ใช้งานหรือผู้ตัดสินใจต้องการจะปล่อยน้ำด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule (HR) ทางเลือกการตัดสินใจที่ดีที่สุดที่เหมาะสมจะนำไปปฏิบัติได้แก่ โคว์ควบคุม HHO-HRAvs ซึ่งเป็นโคว์ที่ทำให้เกิดค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทุกเส้นโคว์คือ 174.140 ล้านลูกบาศก์เมตร



ภาพประกอบ 43 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนน้ำของทางเลือกการตัดสินใจที่ 2

4.3.1.3 ทางเลือกการตัดสินใจที่ 3

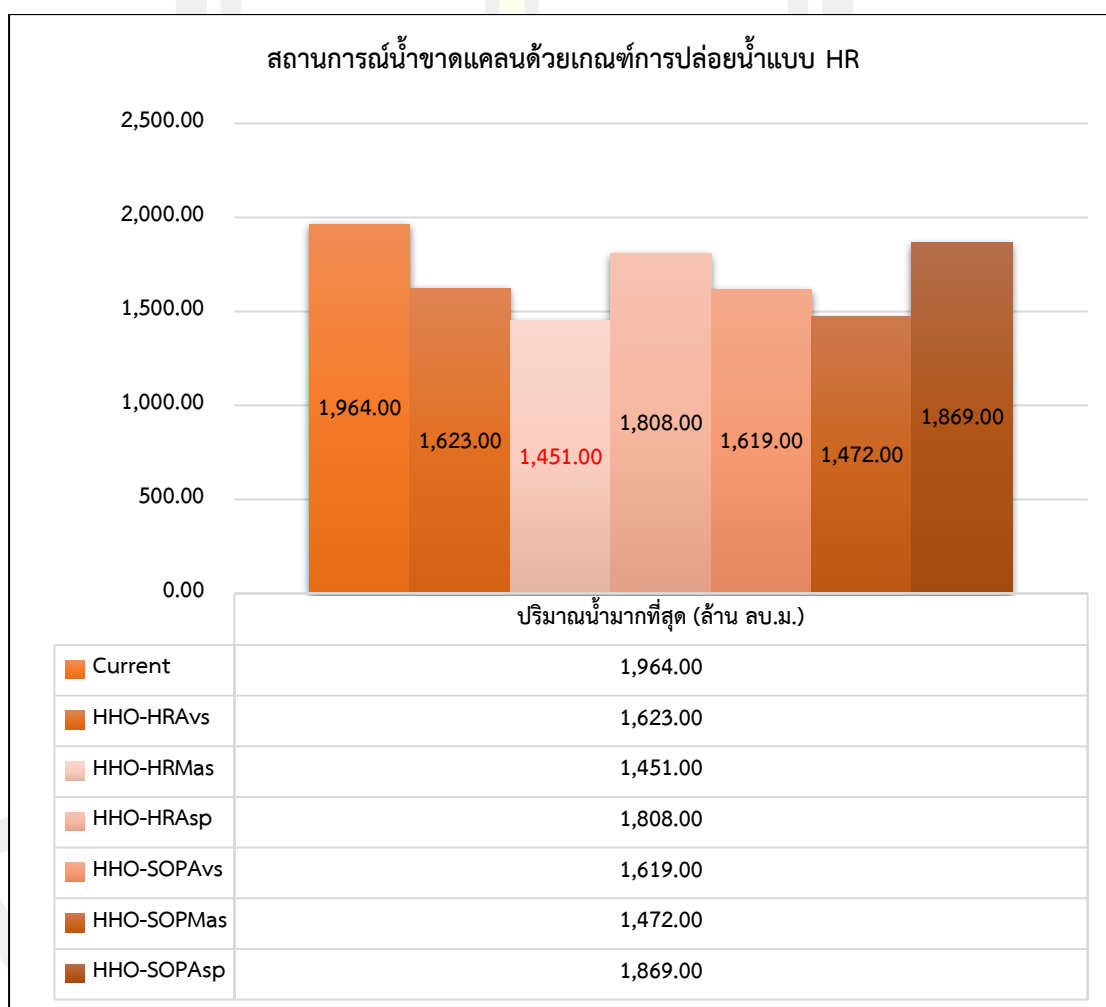
เมื่อสถานการณ์ของอ่างเก็บน้ำเครือข่ายมีการขาดแคลนน้ำสูง ส่งผลกระทบต่อรุนแรง และผู้ใช้งานหรือผู้ตัดสินใจต้องการจะปล่อยน้ำด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน (SOP) ทางเลือกการตัดสินใจที่ดีที่สุดที่เหมาะสมจะนำไปปฏิบัติได้แก่ โควัฒควบคุม HHO-SOPMas ซึ่งเป็นโค้งที่ทำให้เกิดค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทุกเส้นโค้งคือ 1,338.000 ล้านลูกบาศก์เมตร



ภาพประกอบ 44 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนน้ำของทางเลือกการตัดสินใจที่ 3

4.3.1.4 ทางเลือกการตัดสินใจที่ 4

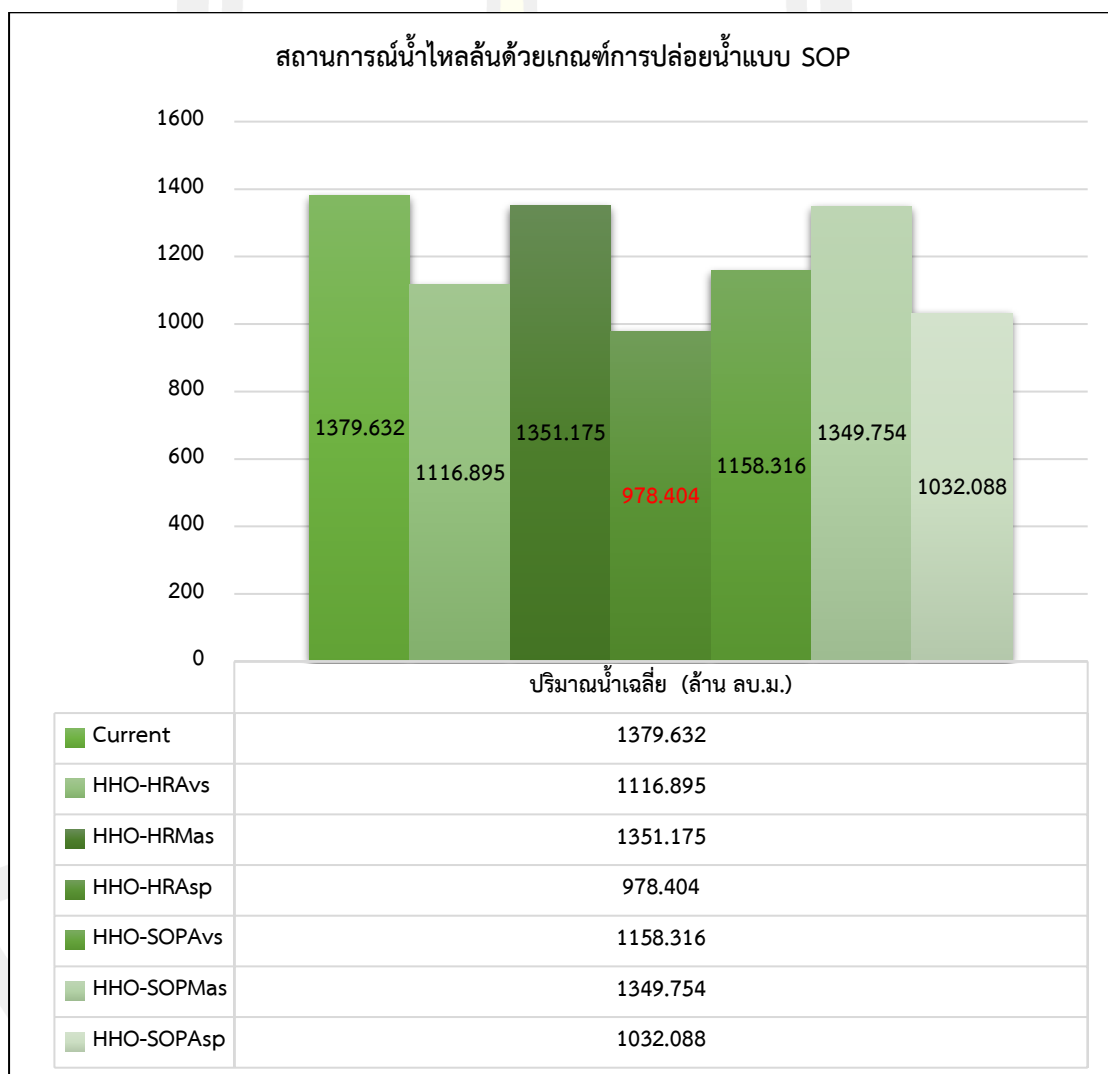
เมื่อสถานการณ์ของอ่างเก็บน้ำเครือข่ายมีการขาดแคลนน้ำสูง ส่งผลกระทบต่อรุนแรง และผู้ใช้งานหรือผู้ตัดสินใจต้องการจะปล่อยน้ำด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule (HR) ทางเลือกการตัดสินใจที่ดีที่สุดที่เหมาะสมจะนำไปปฏิบัติได้แก่ โคว้คงควบคุม HHO-HRMas ซึ่งเป็นโคว้คงที่ทำให้เกิดค่าสูงสุดของการขาดแคลนนํ้าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทุกเส้นโคว้คงคือ 1,451.000 ล้านลูกบาศก์เมตร



ภาพประกอบ 45 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนน้ำของทางเลือกการตัดสินใจที่ 4

4.3.1.5 ทางเลือกการตัดสินใจที่ 5

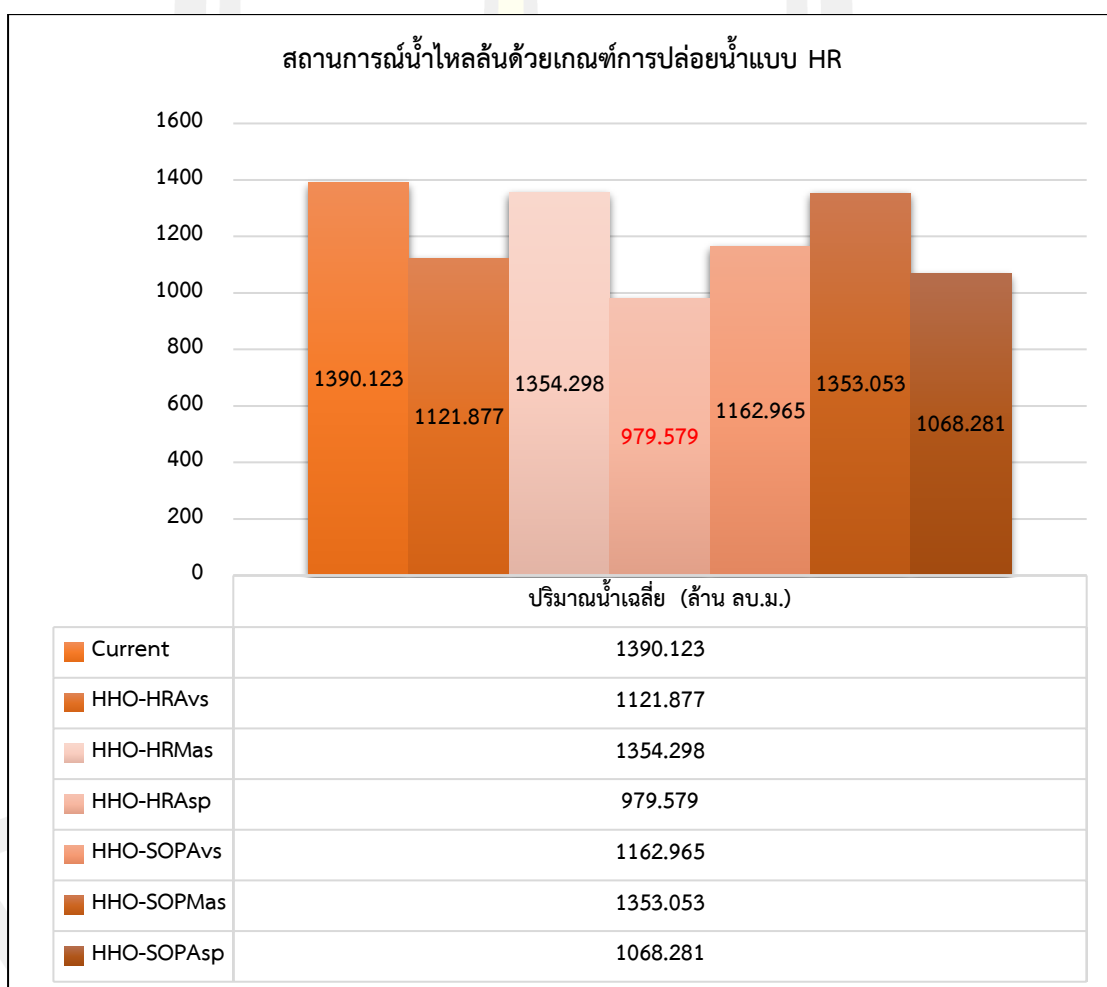
เมื่อสถานการณ์ของอ่างเก็บน้ำเครือข่ายมีสถานการณ์น้ำท่วมจากการไหลล้นปกติ และผู้ใช้งานหรือผู้ตัดสินใจต้องการจะปล่อยน้ำด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน (SOP) ทางเลือกการตัดสินใจที่ดีที่สุดที่เหมาะสมจะนำไปปฏิบัติได้แก่ โคงค์ควบคุม HHO-HRAsp ซึ่งเป็นโคงค์ที่ทำให้เกิดค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทุกเส้นโคงค์คือ 978.404 ล้านลูกบาศก์เมตร



ภาพประกอบ 46 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนน้ำของทางเลือกการตัดสินใจที่ 5

4.3.1.6 ทางเลือกการตัดสินใจที่ 6

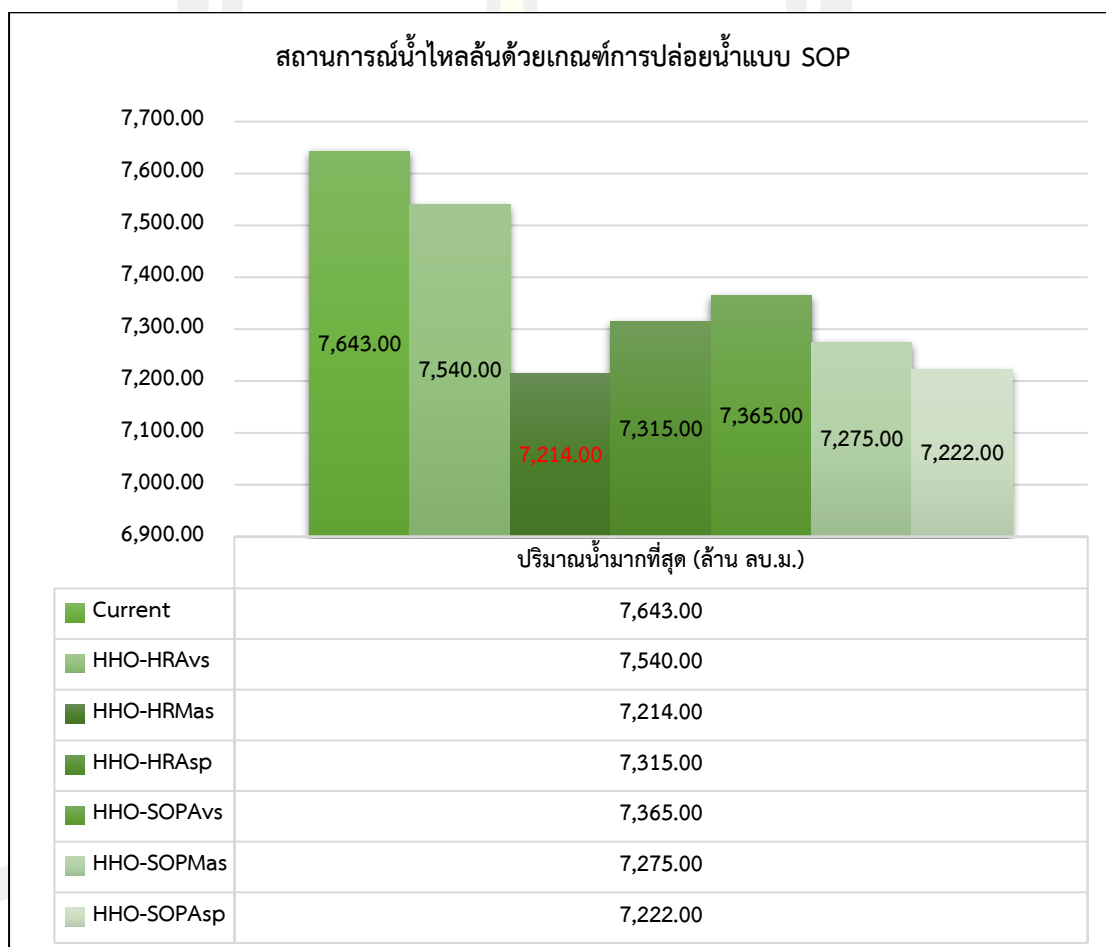
เมื่อสถานการณ์ของอ่างเก็บน้ำเครือข่ายมีสถานการณ์น้ำไหลล้นสูงส่งผลกระทบต่อรุนแรง และผู้ใช้งานหรือผู้ตัดสินใจต้องการจะปล่อยน้ำด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule (HR) ทางเลือกการตัดสินใจที่ดีที่สุดที่เหมาะสมจะนำไปปฏิบัติได้แก่ โคว์ควบคุม HHO-HRAsp ซึ่งเป็นโคว์ที่ทำให้เกิดค่าเฉลี่ยของการไหลล้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทุกเส้นโคว์คือ 979.579 ล้านลูกบาศก์เมตร



ภาพประกอบ 47 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนน้ำของทางเลือกการตัดสินใจที่ 6

4.3.1.7 ทางเลือกการตัดสินใจที่ 7

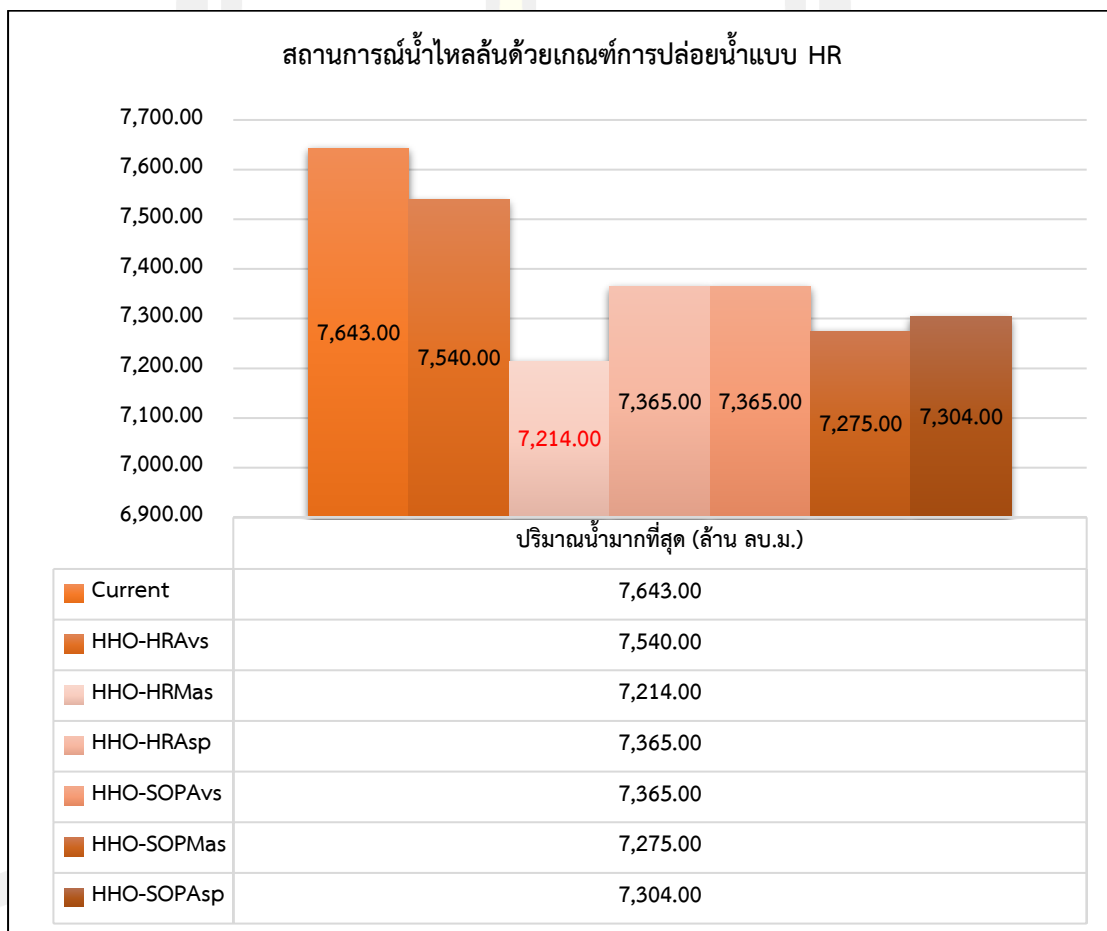
เมื่อสถานการณ์ของอ่างเก็บน้ำเครือข่ายมีการไหลล้นสูงส่งผลกระทบต่อระบบรุนแรง และผู้ใช้งานหรือผู้ตัดสินใจต้องการจะปล่อยน้ำด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำมาตรฐาน (SOP) ทางเลือกการตัดสินใจที่ดีที่สุดที่เหมาะสมจะนำไปปฏิบัติได้แก่ โควงควบคุม HHO-HRMas ซึ่งเป็นโควงที่ทำให้เกิดค่าสูงสุดของการไหลล้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทุกเส้นโควงคือ 7,214.000 ล้านลูกบาศก์เมตร



ภาพประกอบ 48 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนน้ำของทางเลือกการตัดสินใจที่ 7

4.3.1.8 ทางเลือกการตัดสินใจที่ 8

เมื่อสถานการณ์ของอ่างเก็บน้ำเครือข่ายมีการไหลล้นสูงส่งผลกระทบต่อระบบ และผู้ใช้งานหรือผู้ตัดสินใจต้องการจะปล่อยน้ำด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule (HR) ทางเลือกการตัดสินใจที่ดีที่สุดที่เหมาะสมจะนำไปปฏิบัติได้แก่ โควงควบคุม HHO-HRMas ซึ่งเป็นโค้งที่ทำให้เกิดค่าสูงสุดของการไหลล้นน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับทุกเส้นโค้งคือ 7,214.000 ล้านลูกบาศก์เมตร



ภาพประกอบ 49 กราฟเปรียบเทียบค่าการขาดแคลนน้ำของทางเลือกการตัดสินใจที่ 8

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้ เป็นการนำเสนอการสรุปผลการศึกษิตตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย และการแสดงข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปศึกษาต่อยอดในอนาคต รายละเอียดของการสรุปผลและข้อเสนอแนะสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

การวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อการศึกษาใน 2 วัตถุประสงค์หลัก ลำดับแรกคือเพื่อค้นหาโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายที่เหมาะสม โดยใช้เทคนิค Harris Hawks Optimization (HHO) ด้วยเกณฑ์การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบ Hedging rule ด้วย 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เพื่อจะนำผลการศึกษานี้ไปใช้เป็นข้อมูลที่น่าไปสู่การสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจสำหรับปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายอ่างเก็บน้ำ การสรุปผลของแต่ละวัตถุประสงค์สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการค้นหาโค้งควบคุมที่เหมาะสมของอ่างเก็บน้ำ

โค้งควบคุมที่สร้างจากเทคนิค Harris Hawks Optimization (HHO) เชื่อมต่อกับแบบจำลองเลียนแบบสถานการณ์อ่างเก็บน้ำโดยใช้ ค่าการขาดแคลนเฉลี่ยน้อยที่สุด และค่าการไหลล้นน้อยที่สุด เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการค้นหา โค้งควบคุมที่ได้จะเป็นชุดโค้งควบคุมของทั้ง 2 อ่างเก็บน้ำคือ 48 จุด ต่อชุดโค้งควบคุม 1 ชุด โดยใช้เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (Standard Operating Rules) และเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging Rule โดยค้นหาจากข้อมูลปริมาณน้ำท่าในช่วงเวลาอดีตของอ่างเก็บน้ำภูมิพล คือระหว่าง พ.ศ. 2507-2563 (57 ปี) และอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ คือระหว่าง พ.ศ. 2517-2563 (47 ปี) โดยจะเลือกช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต ที่จะเกิดสถานการณ์ปริมาณน้ำน้อย และปริมาณน้ำมาก 10 ปี (ปริมาณน้ำน้อย พ.ศ 2527 – 2536, ปริมาณน้ำมาก พ.ศ. 2545 – 2554), 25 ปี (ปริมาณน้ำน้อย พ.ศ 2519 – 2543, ปริมาณน้ำมาก พ.ศ. 2537 – 2561), และทั้งชุดข้อมูลคือ 57 ปี และ 47 ปี ตามลำดับ มาใช้ในการค้นหาเพื่อให้เกิดทางเลือกในการตัดสินใจที่หลากหลายในการเลือกนำโค้งควบคุมไปใช้ในการปฏิบัติ พบว่าโค้งควบคุมใหม่จากทั้ง 3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ด้วยกรณีค้นหาจากช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี, 25 ปี และทั้งชุดข้อมูล เส้นโค้งของทั้งสองอ่างเก็บน้ำมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการค้นหาโค้งจากทั้งชุดข้อมูลมีความครอบคลุมไปถึงทั้งช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีต 10 ปี และ 25 ปี ประสิทธิภาพในการจัดสรรทรัพยากรน้ำตามวัตถุประสงค์หลักคือ ป้องกันการขาดแคลนของน้ำและน้ำไหลล้นได้ดีกว่าโค้งควบคุมเดิม ดังแสดงได้จากโค้งควบคุม พบว่า

เส้นโค้งใหม่จะอยู่สูงกว่าเส้นโค้งปัจจุบัน ซึ่งจะมีแนวโน้มเกณฑ์การเก็บกักที่สูงกว่า มีความต้องการเพิ่มปริมาณเก็บกักน้ำเพื่อให้มีน้ำไว้ใช้ในช่วงฤดูแล้งเพิ่มขึ้น ลดปริมาณการปล่อยน้ำ ซึ่งจะช่วยให้พื้นที่ที่ท้ายน้ำลดความเสี่ยงที่จะเกิดภัยน้ำท่วม ส่วนโค้งควบคุมล่างเส้นกราฟจะยกสูงขึ้นเพื่อเตรียมปล่อยน้ำตามความต้องการทำอย่างเพื่อเพิ่มการชลประทานและช่วยให้ทำให้อ่างเก็บน้ำมีปริมาตรที่จะสามารถรองรับน้ำที่จะมาในฤดูการถัดไปได้ ผลการเปรียบเทียบผลของโค้งควบคุมจากอ่างเก็บน้ำทั้งสองจะเห็นได้ว่า รูปแบบของเส้นโค้งควบคุมเส้นล่างเส้นโค้งของทั้งสองอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมที่จากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule นั้นสูงกว่าโค้งควบคุมเส้นล่างจากเกณฑ์มาตรฐาน SOP และเส้นโค้งควบคุมปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูแล้ง (มกราคม – พฤษภาคม) การควบคุมการปล่อยน้ำของเกณฑ์ Hedging rule ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงพฤษภาคมนั้นจำกัดการปล่อยน้ำมากกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งหมายความว่าเส้นโค้งควบคุมด้วยเกณฑ์ Hedging rule พยายามกักเก็บน้ำโดยการลดการปล่อยน้ำในช่วงฤดูแล้ง ซึ่งเป็นเป้าหมายของเกณฑ์ Hedging rule ผลลัพธ์ยังแสดงให้เห็นว่าในช่วงฤดูฝน (สิงหาคม-พฤศจิกายน) เส้นโค้งควบคุมเส้นบนจากเกณฑ์ Hedging rule จะสูงกว่าเส้นโค้งควบคุมจากเกณฑ์มาตรฐาน SOP

ผลการประเมินประสิทธิภาพโค้งควบคุมที่ได้ เมื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้ข้อมูลน้ำท่าอดีต 1 ชุดเหตุการณ์ และน้ำท่าอดีต 1,000 ชุดเหตุการณ์ ด้วยเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐานและเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule เพื่อประเมินค่าความถี่ในการขาดแคลนน้ำเฉลี่ย ปริมาณน้ำขาดแคลนเฉลี่ย และช่วงเวลาที่เกิดการขาดแคลนน้ำเฉลี่ย จะเห็นได้ว่าโค้งควบคุมใหม่ที่สร้างจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน และเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule สามารถลดค่าการขาดแคลนน้ำและน้ำไหลล้น ทั้งในแง่ของค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุดได้ดีกว่าโค้งควบคุมเดิมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของเส้นโค้งที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำทั้งสอง พบว่าโค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น ค่าเฉลี่ยของการขาดแคลนน้ำน้อยที่สุด ที่เกิดจากการค้นหาแบบทั้งชุดข้อมูล (HHO-HRAVs) สถานการณ์ของการขาดแคลนน้ำและน้ำไหลล้นจะน้อยกว่าเมื่อใช้เส้นโค้งควบคุมที่สร้างขึ้นจากเกณฑ์มาตรฐาน SOP เนื่องจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule จะจำกัดการปล่อยน้ำเพื่อหลีกเลี่ยงการขาดแคลนน้ำในฤดูแล้งถัดไป ซึ่งต่างจากสถานการณ์ที่ใช้เกณฑ์ SOP ซึ่งจะปล่อยน้ำเพื่อตอบสนองความต้องการเป้าหมายสำหรับช่วงเวลา ดังนั้น เกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ SOP จึงไม่เหมาะสมกับอ่างเก็บน้ำที่มีภัยภัยแล้งหรืออ่างเก็บน้ำที่มีปริมาณน้ำไหลเข้าน้อย จากผลการทดสอบทั้งหมดจะแสดงให้เห็นว่า โค้งควบคุมที่เกิดจากสถานการณ์ใด ก็จะสามารถบรรเทาสถานการณ์นั้นได้ดีที่สุด

และโค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบใด ก็จะสามารถบรรเทาสถานการณ์นั้นได้มีประสิทธิภาพที่สุดเช่นกัน

5.2 สรุปผลการสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจ

การค้นหาโค้งควบคุมของอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่าย เพื่อหาการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสม ทำให้ได้มาซึ่งระบบสนับสนุนการตัดสินใจในการดำเนินการอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายของอ่างเก็บน้ำภูมิพล และอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ ซึ่งสามารถช่วยให้ผู้บริหารได้รับแนวทาง ข้อมูล และสถานการณ์ที่จะเกิดในแต่ละทางเลือก ไปช่วยในการประกอบการตัดสินใจในการดำเนินงานอ่างเก็บน้ำ เพื่อให้ทราบถึงสิ่งที่จะเกิดขึ้นต่อไปในเบื้องต้นถ้าหากเลือกสถานการณ์ต่าง ๆ ซึ่งจะช่วยให้สามารถเฝ้าระวังต่อเหตุการณ์และสถานการณ์ที่รุนแรง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการงานด้านแผนได้ตามความต้องการของผู้บริหาร รวมทั้งยังมีส่วนสำคัญ ในการกำหนดนโยบายและตั้งเป้าหมายและการกำหนดวิสัยทัศน์ขององค์กรให้ประสบความสำเร็จ ผลในการสร้างระบบฐานข้อมูลที่จะช่วยนำมาเป็นส่วนสนับสนุนในการประเมินสถานการณ์ที่เกิดขึ้นและฐานแบบจำลองที่จะช่วยนำมาประเมินและค้นหาคำตอบเบื้องต้นของสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้น และรวมไปถึง ผลการสร้างระบบสนับสนุนการตัดสินใจเพื่อเป็นส่วนในการบอกผลของเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นในสถานการณ์ต่าง ๆ จากผลการศึกษาพบว่า ผลทางเลือกของระบบสนับสนุนการตัดสินใจของอ่างเก็บน้ำแบบเครือข่ายคืออ่างเก็บน้ำภูมิพลและอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์ เมื่อเกิดสถานการณ์การขาดแคลนน้ำของอ่างเก็บน้ำในสถานการณ์ต่าง ๆ จะเกิดทางเลือกการตัดสินใจสำหรับการนำโค้งควบคุมที่ดีที่สุดในแต่ละสถานการณ์ไปใช้งานทั้งหมด 8 ทางเลือกที่ดีที่สุดจาก 152 ทางเลือก ซึ่งจะสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานในแง่ของการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำด้วยโค้งควบคุมได้ ซึ่งโดยส่วนมากจะเป็นจากโค้งควบคุมที่เกิดจากเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule ซึ่งบรรเทาสถานการณ์น้ำขาดแคลนและน้ำไหลล้นได้ดีทั้งในเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบมาตรฐาน (SOP) และเกณฑ์การปล่อยน้ำแบบ Hedging rule

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สามารถนำสถานการณ์อ่างเก็บน้ำที่หลากหลาย นำมาเปลี่ยนแปลงหรือเพิ่มฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการค้นหาคำตอบ เงื่อนไขและข้อจำกัด สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับอ่างเก็บน้ำในพื้นที่เดิมหรือพื้นที่อื่น ๆ ได้

5.2.2 สามารถนำเข้าฐานข้อมูลอื่น ๆ เพื่อให้เกิดความหลากหลายของสถานการณ์ เพื่อให้ตอบสนองทางเลือกการตัดสินใจได้หลายรูปแบบมากขึ้น

5.2.3 สามารถสร้างโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำด้วยเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมแบบอื่น ๆ และนำผลที่ได้มาอภิปรายเปรียบเทียบกัน

5.2.4 สามารถสร้างโค้งควบคุมจากช่วงของข้อมูลน้ำท่าอดีตที่มีจำนวนข้อมูลมากกว่าข้อมูลอดีต เช่น 100 ปี ซึ่งอาจจะสามารถบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำในระยะยาวได้



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT). คู่มือปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำภูมิพลและสิริกิติ์. นนทบุรี: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, (2547).
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT). ผลการศึกษาปรับปรุงเกณฑ์ปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำ. นนทบุรี: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, (2562).
- เกียรติพงศ์ สายเมือง. เกณฑ์การจัดสรรน้ำที่เหมาะสมด้วยวิธีเทคนิคการค้นหาแบบทาบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม, (2558).
- เชษฐพันธ์ โล่ห์คำ. เกณฑ์การจัดสรรน้ำที่เหมาะสมด้วยกระบวนการอาณานิคมมด กรณีศึกษา โครงการส่งน้ำและบำรุงรักษาลำปาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม, (2555).
- ตระการ กาสีใส. (2558). เกณฑ์การจัดสรรน้ำที่เหมาะสมด้วยเทคนิควิธีการอาณาจักรผึ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม
- ปกรณ ฌ ศิริ และ ปกรณ ดิษฐกิจ. โคงกฎการปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำที่เหมาะสมโดยใช้วิธีฮาโมนีเซอร์: กรณีศึกษา อ่างเก็บน้ำห้วยใส. การประชุมวิชาการเสนองานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา แห่งชาติ ครั้งที่ 19, (2561).
- ประกอบ วิโรจนกฏ และจิรรัตน์ ตียะจามร. สภาวะการณ์เกี่ยวกับทรัพยากรน้ำของประเทศไทย. วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีที่ 24 ฉบับที่ 22, (2540).
- รัตน์สุดา งามเสริฐ. (2561). เกณฑ์การจัดสรรน้ำที่เหมาะสมด้วยเทคนิคคนกดูเหว่า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม.
- รัตนา หอมวิเชียร. การพัฒนาโค้งควบคุมโดยใช้วิธีดิฟเฟอร์เรนเชียลเอฟโวลูชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิตมหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม, (2554).
- วิหวัส พาโคกทม. เกณฑ์การจัดสรรน้ำที่เหมาะสมด้วยเทคนิคคนกดูเหว่า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม, (2557).
- วิรัตน์ นวนนุกุล. เกณฑ์การจัดสรรน้ำที่เหมาะสมด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม, (2557).
- วิษณุกรณ์ ชัยภูมิ. (2553). การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการจำลองการอบเหนียวเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของโค้งควบคุมอ่างเก็บน้ำ สิรินคร และ อ่างเก็บน้ำอุบลรัตน์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตมหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม

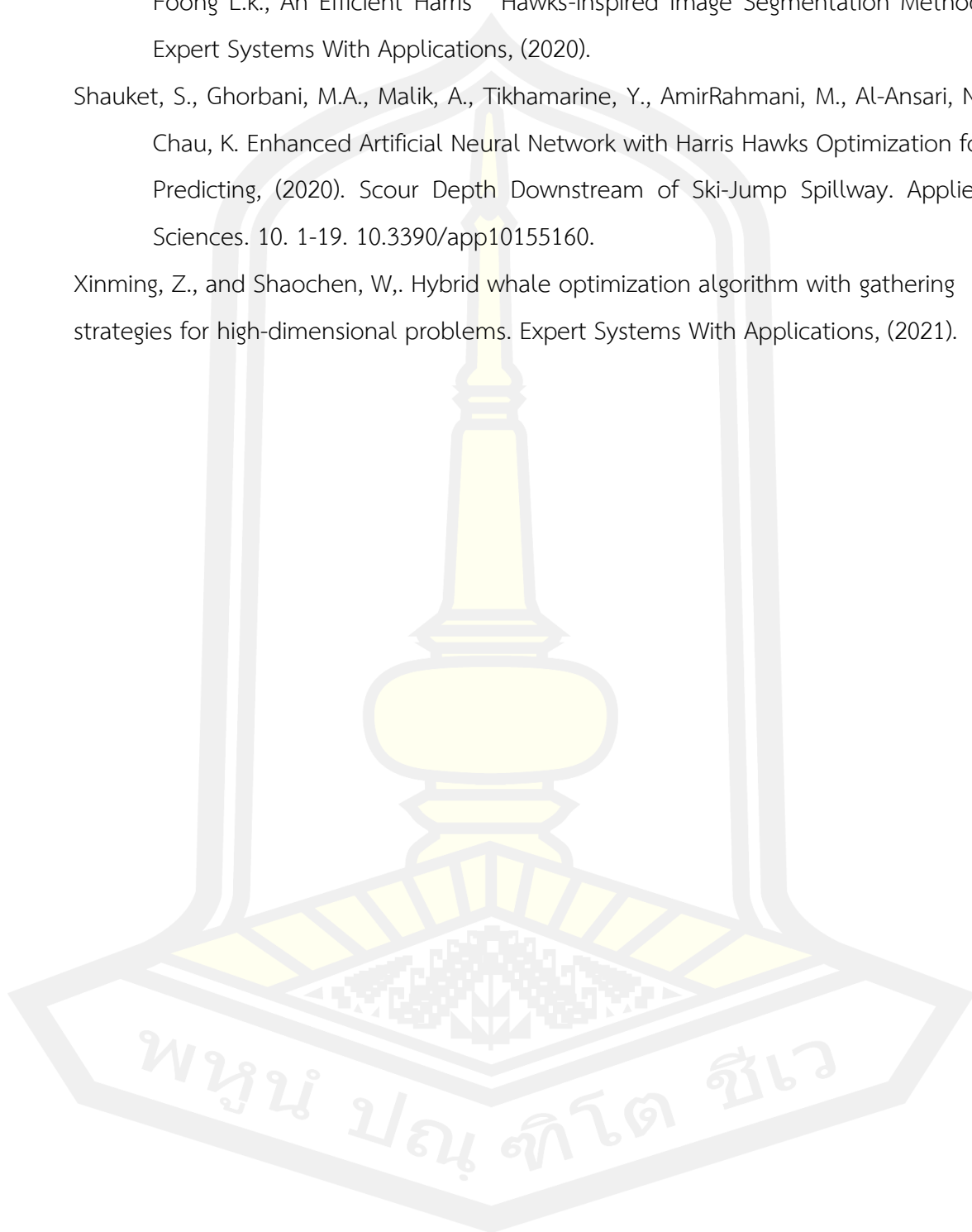
- สมฤทัย ทะสดวง และสุวัฒนา จิตตลดากร. การกำหนดระดับควบคุมที่เหมาะสมสำหรับอ่างเก็บน้ำด้วยเจนีติกแอลลกอริทึม. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ. ครั้งที่ 9, 19-21 พฤษภาคม.(2547).
- อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง., การปฏิบัติการอ่างเก็บน้ำโดยใช้โค้งควบคุมที่เหมาะสม. มหาสารคาม: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม (2551).
- Abbasi, A., Firouzi, B., Sendur, P., On the application of Harris hawks optimization (HHO) algorithm to the design of microchannel heat sinks. *Engineering With Computers*, (2021).
- Bellman R. *Dynamic Programming*. New Jersey: Princeton University Press. by Genetic Algorithms. *Hydrological Processes*, 19, pp 2277–2289. (1959).
- Chaiyasing, S. Determination of the rule curves of the Sirikit am for hydropower, irrigation and flood control. M.S. Thesis. Asian Institute of Technology, Bangkok, (1997).
- Chaleeraktragoon, C. & Kangrang, A., A Dynamic Programming for Searching Rule Curves. The proceeding of International Conference on World Water and Environmental Resource Congress, (2005).
- Chang J.F., Chen L., Chang C.L. Optimizing Reservoir Operating Rule Curves by Genetic Algorithms. *Hydrological Processes*, 19, pp 2277–2289, (2005).
- Draper, A. & Lund, J. Optimal Hedging and Carryover Storage Value. *Journal of Water Resources Planning and Management-asce - J WATER RESOUR PLAN MAN-ASCE*. 130, (2004).
- Gashaw, T., Tulu, T., Argaw, M., & Worqlul, A. W., Modeling the hydrological impacts of land use/land cover changes in the Andassa watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, (2018).
- Heidari, A.A., Mirjalili, S., Faris, H., et al., Harris hawks optimization: Algorithm and applications, *Future Generation Computer Systems*, (2019).
- Hong-bin, F., Tie-song. H., Xiang, Z., Feng-yan, W., Simulation-optimization model of reservoir operation based on target storage curves, *Water Science and Engineering*, (2014).

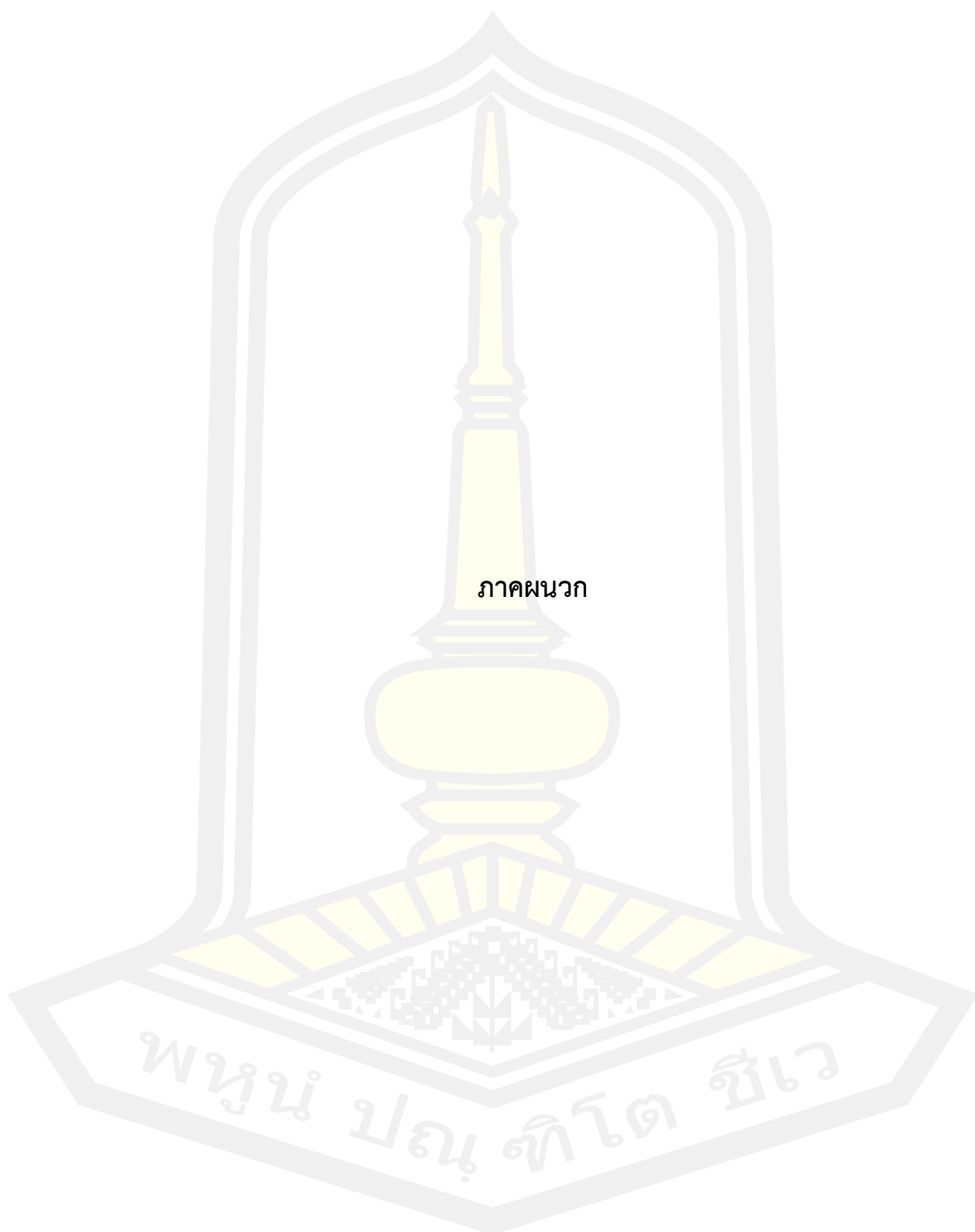
- Hossein Janzadeh, H., et al. New proposed method for prediction of reservoir sedimentation distribution. *International Journal of Sediment Research*, (2015).
- Jain S.K., Goel, M.K. & Agarwal P.K. Reservoir Operation Study of Sabamati System, India. *Journal of Water Resource Planning and Management*, (1998).
- Jain, S.K., & Singh, V.P., *Water resources systems planning and management*. New York: Elsevier Science, (2003).
- Javad, J., & Mojtaba. S., "Hedging Rules-Based Optimal Reservoir Operation Using Bat Algorithm," *Water Resources Management: An International Journal*, Published for the European Water Resources Association (EWRA), Springer; European Water Resources Association (EWRA), vol. 33(13), pages 4525-4538, October. *Journal of Applied Sciences*, 4(2), 73–79. (2019).
- Kangrang, A., Chaleeraktragoon, C., Genetic Algorithms Connected Simulation with Smoothing Function for Searching Rule Curves, *American Journal of Applied Sciences* (2015).
- Kangrang, A., Sudarat, C., Witsanukorn, C. Heuristic Algorithm with Simulation Model for Searching Optimal Reservoir Rule Curves. *American Journal of Applied Sciences*. 6. 10.3844/ajas.2009.263.267, (2009).
- Kumar, N., Tischbein, B., Kusche, J., Laux, P., Beg, M. K., & Bogardi, J. J., Impact of climate change on water resources of upper Kharun catchment in Chhattisgarh, India. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, (2017).
- Men, B.; Wu, Z.; Liu, H.; Li, Y.; Zhao, Y. Research on Hedging Rules Based on Water Supply Priority and Benefit Loss of Water Shortage—A Case Study of Tianjin, China. *Water*. (2019).
- Neelakantan T.R. & Pundarikanthan N.V. Neural Network-Based Simulation Optimization Model for Reservoir Operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(2), 57-64. (2000).
- Ponpang-Nga, P., and Techamahasaranont, J., Effects of climate and land use changes on water balance in upstream in the Chao Phraya River basin, Thailand. *Agriculture and Natural Resources* (2016).

Rodríguez-Esparza E., Laura A., OlivaD., Heidari A.A., Zaldivar D., Perez-Cisneros M., Foong L.k., An Efficient Harris ' Hawks-inspired Image Segmentation Method, Expert Systems With Applications, (2020).

Shauket, S., Ghorbani, M.A., Malik, A., Tikhamarine, Y., AmirRahmani, M., Al-Ansari, N., Chau, K. Enhanced Artificial Neural Network with Harris Hawks Optimization for Predicting, (2020). Scour Depth Downstream of Ski-Jump Spillway. Applied Sciences. 10. 1-19. 10.3390/app10155160.

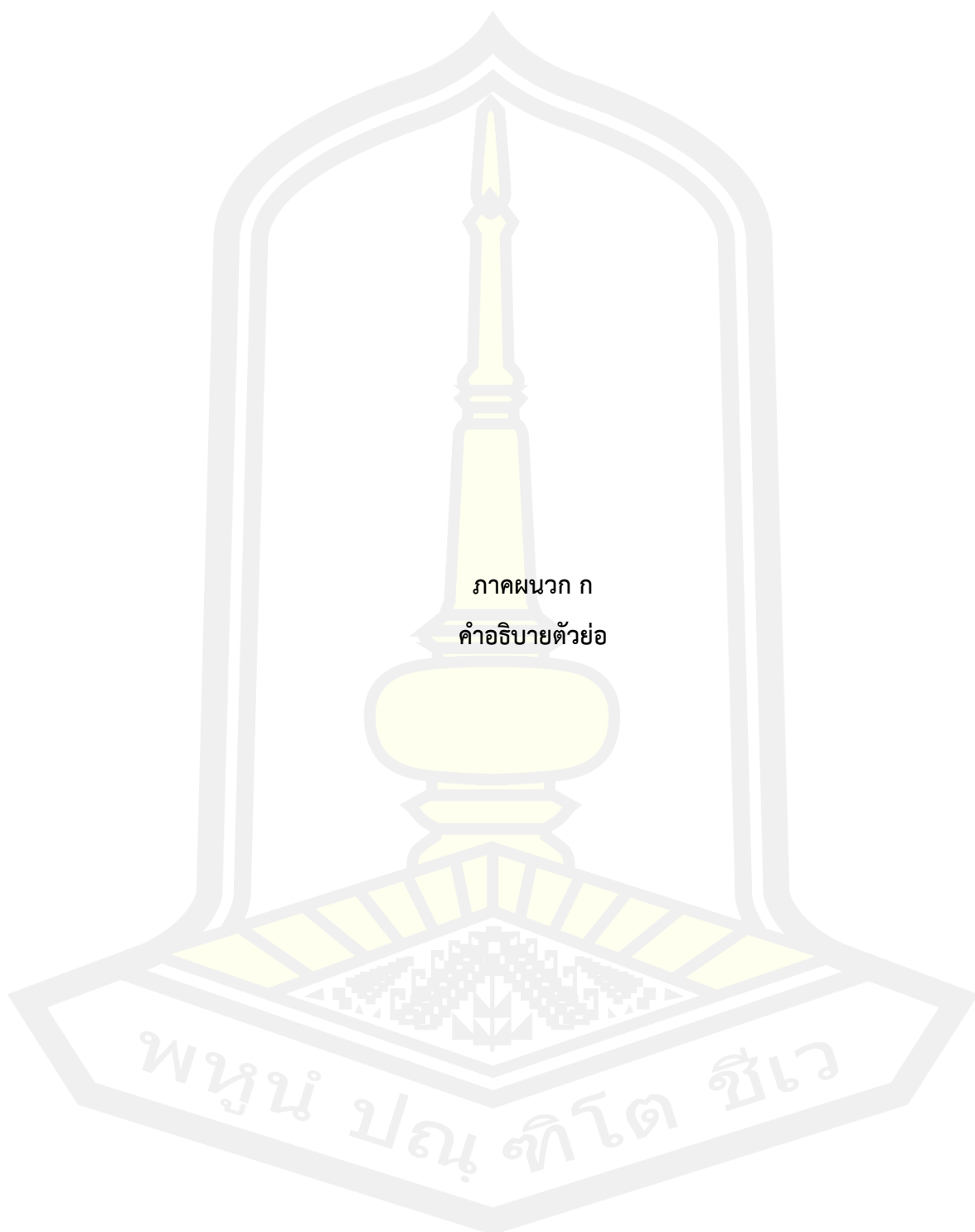
Xinming, Z., and Shaochen, W,. Hybrid whale optimization algorithm with gathering strategies for high-dimensional problems. Expert Systems With Applications, (2021).





ภาคผนวก

พหุมนุ ปณุ ทิโต ชีเว

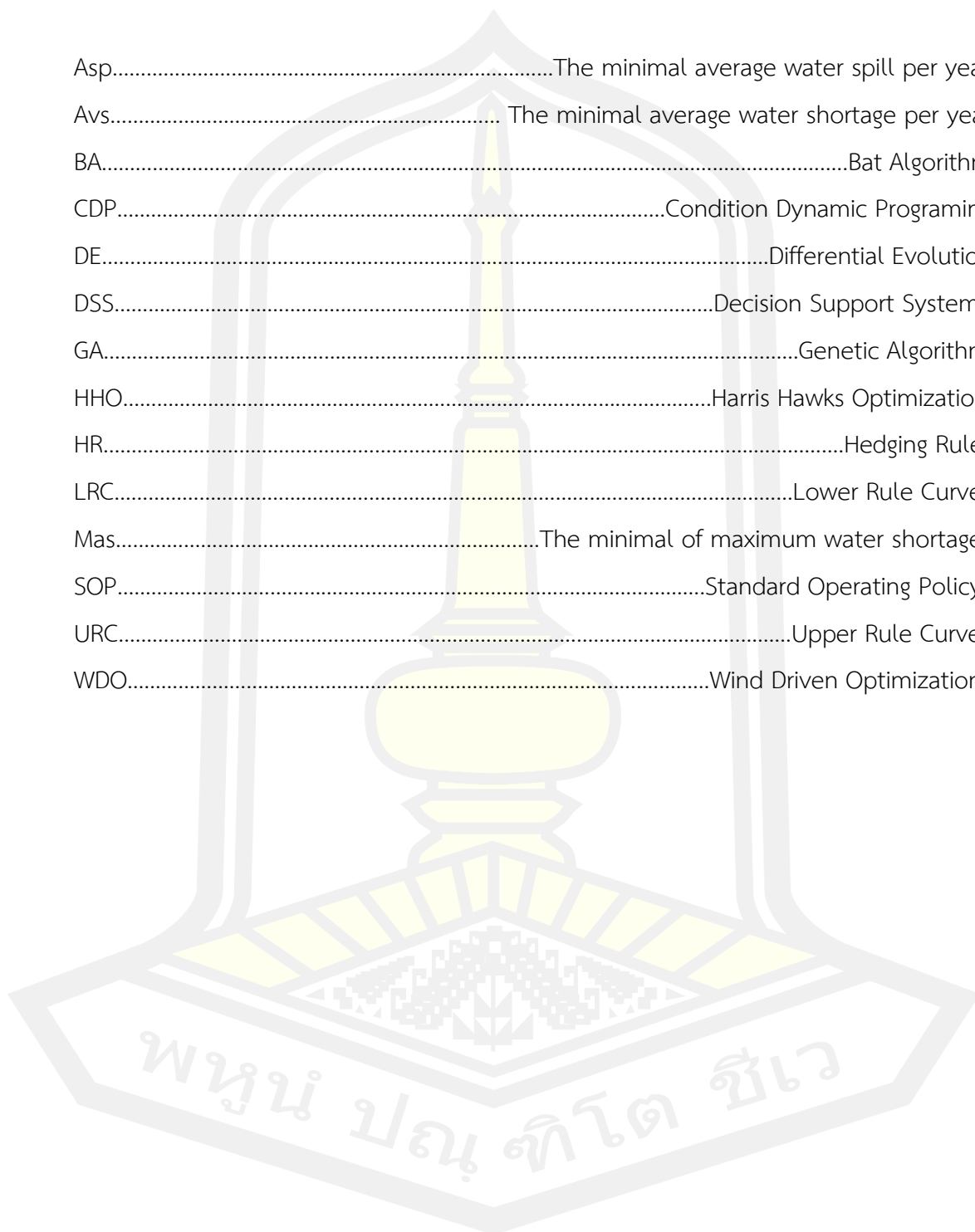


ภาคผนวก ก
คำอธิบายตัวย่อ

พหุมนุ ปณฺ ทิโต ชีเว

คำอธิบายคำย่อ

Asp.....	The minimal average water spill per year
Avs.....	The minimal average water shortage per year
BA.....	Bat Algorithm
CDP.....	Condition Dynamic Programing
DE.....	Differential Evolution
DSS.....	Decision Support Systems
GA.....	Genetic Algorithm
HHO.....	Harris Hawks Optimization
HR.....	Hedging Rule
LRC.....	Lower Rule Curve
Mas.....	The minimal of maximum water shortage
SOP.....	Standard Operating Policy
URC.....	Upper Rule Curve
WDO.....	Wind Driven Optimization





ภาคผนวก ข
ข้อมูลปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ

พหุ ประจันต์ สักต ชีวะ

ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำภูมิพล

ปี พ.ศ.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รวม
2507	0	0	0	0	0	334	685	506	1573	2252	652	356	6359
2508	206	186	84	200	194	290	189	671	1237	981	989	355	5583
2509	180	81	30	39	341	222	243	961	1727	518	467	220	5028
2510	97	39	41	47	176	130	150	595	1816	1379	494	243	5206
2511	99	33	21	100	328	273	294	748	666	724	321	144	3752
2512	57	12	6	2	113	362	264	2010	2499	1048	637	265	7275
2513	124	79	35	65	499	606	555	2021	1925	1253	628	616	8406
2514	268	91	39	64	268	353	1294	1714	2128	1414	656	360	8649
2515	216	150	22	188	76	188	226	726	1102	1154	928	432	5409
2516	133	58	67	24	114	406	492	1813	3581	1452	560	315	9013
2517	200	120	9	102	389	290	178	962	1478	1167	1396	371	6664
2518	450	108	99	55	123	552	619	1555	2493	1717	857	440	9068
2519	257	162	88	52	229	164	87	547	1008	1555	785	295	5228
2520	358	83	17	79	181	67	109	528	2345	1021	650	282	5721
2521	263	70	52	3	159	59	1174	1497	1717	1564	398	262	7217
2522	83	28	17	12	156	424	149	531	732	952	113	54	3250
2523	22	12	5	9	350	443	345	625	2001	1616	462	310	6199
2524	100	69	17	170	200	297	679	1109	955	700	924	384	5604
2525	173	34	27	72	237	634	307	677	1503	1175	425	205	5471
2526	108	46	14	0	36	68	37	402	1139	1485	1407	370	5112
2527	149	75	9	18	53	304	189	514	940	1311	398	191	4152
2528	70	34	13	24	112	272	414	523	1241	1156	1467	424	5748
2529	193	127	73	80	297	225	329	679	938	615	286	183	4027
2530	104	30	12	46	43	224	19	893	1246	979	793	268	4658
2531	110	40	1	8	340	769	533	752	848	1813	714	326	6255
2532	165	67	9	0	140	368	351	514	664	1458	448	216	4400
2533	78	23	3	12	267	292	205	440	1014	943	465	182	3924
2534	50	9	0	0	41	247	182	924	1227	863	505	168	4216
2535	102	25	5	0	1	31	143	611	1305	1208	353	351	4135
2536	151	32	31	0	49	68	73	174	925	612	164	102	2382
2537	32	12	62	84	253	510	718	1997	2381	988	441	334	7811
2538	168	88	91	46	234	170	337	1453	2191	1118	468	243	6607
2539	173	244	126	117	221	444	392	1003	2101	1227	734	247	7030
2540	166	93	105	119	40	33	296	916	1003	1164	334	146	4414
2541	80	51	27	2	13	4	99	262	690	137	69	36	1470
2542	4	0	2	5	486	370	148	871	1168	1232	1271	251	5808
2543	110	95	46	177	696	645	484	623	1096	950	518	194	5634
2544	99	29	134	0	234	150	409	1406	759	746	530	195	4691
2545	135	102	56	34	411	251	326	946	2990	1112	1287	590	8240

2546	384	226	172	96	155	142	354	444	1135	424	153	50	3735
2547	31	17	12	9	359	663	468	796	1455	598	204	110	4721
2548	45	32	46	77	69	240	467	953	2659	1232	848	309	6977
2549	147	78	77	161	641	519	705	1272	2762	1634	440	269	8703
2550	165	116	58	23	994	447	322	652	1347	1834	482	225	6664
2551	81	55	5	30	560	289	249	709	1112	1589	1064	223	5965
2552	59	14	43	54	395	688	578	664	1452	1970	376	95	6389
2553	51	3	3	0	16	34	157	1124	1509	2067	427	126	5516
2554	23	5	157	245	1018	929	961	2646	2877	2813	670	395	12739
2555	285	75	5	54	345	298	336	674	1518	764	331	119	4806
2556	28	38	57	9	10	46	155	786	1276	1137	516	224	4281
2557	67	39	14	35	63	90	245	577	1050	619	361	89	3250
2558	117	23	24	16	4	27	170	524	447	330	179	55	1916
2559	23	21	7	3	1	150	369	498	1342	866	491	93	3865
2560	79	22	14	15	431	389	622	792	1142	2373	510	202	6591
2561	130	34	28	23	290	597	657	842	712	1311	395	150	5169
2562	111	34	23	33	70	18	28	894	977	415	167	45	2816
2563	22	13	13	21	36	28	91	699	734	484	347	34	2,522



ปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำสิริกิติ์

ปี พ.ศ.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รวม
2517	150	82	114	192	248	297	399	1296	885	402	226	128	4418
2518	158	95	95	64	184	669	1091	2767	1924	887	311	168	8413
2519	167	170	127	107	186	357	600	1431	1596	993	370	223	6328
2520	202	77	133	118	217	149	530	998	1047	445	266	144	4325
2521	122	99	95	129	118	356	1005	1804	1643	735	250	140	6495
2522	123	61	96	88	237	532	306	1085	688	311	146	92	3766
2523	96	43	78	69	130	382	1069	1130	2427	504	223	135	6286
2524	100	34	99	79	435	380	2792	1583	1171	618	313	155	7762
2525	131	114	55	137	125	212	695	1069	1457	925	255	115	5291
2526	102	69	75	113	221	196	572	1251	1347	896	329	159	5331
2527	130	120	106	122	221	376	1230	1500	1637	627	271	136	6476
2528	127	105	95	129	179	220	590	1868	1054	439	347	168	5320
2529	124	115	131	164	466	410	913	866	812	384	208	121	4715
2530	76	66	72	62	88	161	142	952	661	415	222	90	3006
2531	79	66	50	89	311	346	818	1464	636	414	165	104	4541
2532	74	76	63	47	279	237	643	828	941	492	174	93	3949
2533	84	80	59	49	240	361	731	884	886	396	220	97	4086
2534	86	45	29	68	227	261	348	827	846	413	167	86	3403
2535	82	67	64	45	58	91	418	693	741	440	177	151	3027
2536	94	50	75	70	126	206	787	643	650	322	131	81	3233
2537	66	58	92	67	218	411	875	3272	1665	632	255	184	7795
2538	119	85	56	52	134	211	1019	3300	2614	744	510	211	9056
2539	157	149	96	151	195	388	886	1593	1197	745	316	161	6032
2540	124	99	51	97	107	70	461	1125	1368	739	249	134	4624
2541	112	73	72	96	103	144	504	658	1155	265	160	84	3426
2542	71	67	74	116	238	432	459	1579	2194	686	285	128	6328
2543	142	146	101	111	421	517	1181	1055	1433	643	287	176	6214
2544	138	108	202	83	284	333	1203	2741	1642	610	286	177	7807
2545	146	126	95	67	548	654	778	1531	1670	621	328	220	6783
2546	187	158	159	103	139	268	934	1244	1607	370	216	133	5517
2547	138	118	102	132	222	666	1239	1596	2137	511	259	191	7312
2548	178	131	115	115	110	451	686	1773	1868	848	322	206	6801
2549	173	135	111	175	468	292	728	2357	1536	936	273	220	7403
2550	168	145	135	120	265	361	391	1092	1035	896	278	195	5081
2551	143	148	111	140	302	772	1503	2095	1137	654	368	225	7598
2552	181	163	136	139	205	329	1104	763	775	466	216	143	4618
2553	138	97	84	70	115	155	635	2288	1761	513	207	191	6254
2554	122	105	122	135	526	1238	1946	3096	2321	1031	365	249	1125

2555	216	143	120	147	448	273	628	1291	1212	454	300	211	5444
2556	123	110	92	78	134	160	598	1404	1060	429	198	151	4537
2557	119	98	86	88	182	209	728	1095	1287	431	262	127	4712
2558	134	94	92	106	127	149	353	944	812	619	215	171	3818
2559	118	83	67	46	199	279	799	1919	1408	630	242	143	5933
2560	178	95	52	129	210	209	1163	1102	1167	885	267	208	5665
2561	178	114	128	180	265	605	1639	1920	1272	494	239	166	7200
2562	133	85	82	74	90	135	134	1817	868	252	130	74	3874
2563	67	40	58	67	90	273	334	2,026	965	396	164	92	4,573



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย รพีภัทร เตชะรุ่งเรืองสกุล
วันเกิด	วันที่ 10 ธันวาคม พ.ศ. 2537
สถานที่เกิด	อำเภอโพนทอง จังหวัดร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 76 หมู่ 3 บ้านหนองแวงแห่ ตำบลหนองใหญ่ อำเภอโพนทอง จังหวัดร้อยเอ็ด รหัสไปรษณีย์ 45110
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	วิศวกร
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	กองอาคารสถานที่ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2555 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนโพนทองพัฒนวิทยา อำเภอโพนทอง จังหวัดร้อยเอ็ด พ.ศ. 2560 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2562 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2565 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผลงานวิจัย	Application of Harris Hawks Optimization with Reservoir Simulation Model Considering Hedging Rule for Network Reservoir System

พูน ปณ ทัโต ชีเว