การบริหารอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์
โดยประยุกต์ใช้เทคนิคโครงข่ายใยประสาทเทียม

นางสาวอรอนงค์ วรรณราช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4141-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I21509894X - 2 พ.ย. 2548

PASAK JOLASID RESERVOIR OPERATION
BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK TECHNIQUE APPLICATION

Miss Ornanong Vonnarart

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Water Resources Engineering

Department of Water Resources Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4141-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบริหารอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคโครงข่ายใยประสาทเทียม
โดย	นางสาวอรอนงค์ วรรณราช
สาขาวิชา	วิศวกรรมแหล่งน้ำ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สุจริต คูณธนกุลวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักวิจัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุจริต คูณธนกุลวงศ์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ครรชิต สิขิตเดชาโรจน์)

อรอนงค์ วรรณราช : การบริหารอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคโครงข่ายใยประสาทเทียม. (PASAK JOLASID RESERVOIR OPERATION BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK TECHNIQUE APPLICATION) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.สุจริต คูณธนกุลวงศ์, 291 หน้า. ISBN 974-17-4141-3.

การศึกษานี้เป็นการหาแนวทางบริหารอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์โดยพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคนิคโครงข่ายใยประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) ในการพยากรณ์อัตราการไหลรายวันเข้าอ่างเก็บน้ำ โดยศึกษาควบคู่ไปกับการสร้างเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำรายเดือนโดยวิธี Probability based Rule Curve เพื่อใช้เป็นแนวทางในการบริหารอ่างเก็บน้ำในสภาวะปกติและนำแบบจำลอง ANN ที่พัฒนาขึ้นมาช่วยเสริมการบริหารอ่างเก็บน้ำในช่วงสภาวะน้ำไหลล้นอ่างและสภาวะขาดแคลนน้ำ

การศึกษาพบว่า การบริหารอ่างเก็บน้ำโดยใช้เกณฑ์ตามวิธี Probability based Rule Curve ในสภาพการใช้น้ำปัจจุบันและอนาคต ทำให้การไหลล้นอ่างและการขาดแคลนน้ำลดปริมาณและความรุนแรงลงได้มากกว่าเกณฑ์ที่ใช้กันอยู่ ผลการพัฒนาแบบจำลอง ANN พบว่า รูปแบบที่เหมาะสมในการพยากรณ์อัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ คือ การพยากรณ์โดยใช้ข้อมูลแบบรวมทั้งลุ่มน้ำในระยะเวลา 1-7 วันล่วงหน้า แบบจำลอง ANN แยกเป็นแบบจำลองฤดูฝนและฤดูแล้ง พบว่าให้ผลใกล้เคียงกับข้อมูลจริงโดยค่าประสิทธิภาพ (EI) ในขั้นเรียนรู้ ทดสอบ และรับรองผลของแบบจำลอง ANN ฤดูฝนสูงกว่า 90 71 และ 70% ตามลำดับ และค่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง ANN ฤดูแล้งสูงกว่า 82 94 และ 81% ตามลำดับ

การนำผลจากแบบจำลอง ANN มาประยุกต์ใช้กับการบริหารอ่างเก็บน้ำในสภาวะน้ำไหลล้นอ่าง พบว่า สามารถลดปริมาณน้ำหลากล้นอ่างได้ดีในกรณีปริมาณน้ำปานกลาง (1,134 ลบ.ม./วินาที) แต่กรณีปริมาณน้ำสูงมาก สามารถลดปริมาณน้ำหลากได้เพียงเล็กน้อย (4%) สำหรับสภาวะขาดแคลนน้ำ พบว่า ไม่ทำให้การบริหารอ่างเก็บน้ำในช่วงน้ำน้อยเปลี่ยนแปลง ดังนั้นแนวทางการบริหารที่เสนอแนะ คือ การบริหารอ่างเก็บน้ำรานเดือนในสภาพการใช้น้ำปัจจุบันและอนาคตใช้เกณฑ์ RCP0.04M(P) และ RCP0.03M(F) ตามลำดับ และสามารถนำแบบจำลอง ANN ฤดูฝนมาช่วยเสริมในการบริหารอ่างเก็บน้ำรายวันในกรณีปริมาณน้ำหลากล้นปานกลาง

ภาควิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ ลายมือชื่อนิสิต อรอนงค์ วรรณราช

สาขาวิชา วิศวกรรมแหล่งน้ำ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2546

4370617121 : MAJOR WATER RESOURCES ENGINEERING

KEY WORD: ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS / RUNOFF FORECASTING / RESERVOIR OPERATION

ORNANONG VONNARART : PASAK JOLASID RESERVOIR OPERATION BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK TECHNIQUE APPLICATION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. DR. SUCHARIT KOONTHANAKULVONG, 291 pp. ISBN 974-17-4141-3.

The study is to investigate Pasak Jolasid Reservoir operating guidelines by developing and applying ANN technique together with reservoir operation rule constructed by Probability based Rule Curve Method. The Probability based Rule Curve is for normal operating guidelines and ANN is for overflow and water shortage periods.

The study found that the operation rule set by Probability based Rule Curve induced less overflow and water shortage both in quantity and severity compared with the existing rule curve. The ANN developments found that the most appropriated daily forecasting scheme were 1-7 days in advance and with whole basinwise forecasting. The developed ANN model efficiency was found to be good compared with actual data with the percentage of 90, 71 and 70% in training, testing and validating processes in wet season and 82, 94 and 81% in dry season respectively.

The resulting application of ANN model to reservoir operation can reduce overflow amount in moderate runoff case (less than 1,134 cms.) but rarely reduce overflow in high runoff case. The ANN model could not improve reservoir operation during dry season. The study recommended that monthly reservoir operation should be RCP0.04M(P) for present water use condition and RCP0.03M(F) for future water use condition. The developed ANN model in wet season could help daily reservoir operation for moderate runoff condition.

Department Water Resources Engineering Student's signature Ornanong Vonnarart

Field of study Water Resources Engineering Advisor's signature Sucharit K.

Academic year 2003

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าครั้งนี้ ข้าพเจ้าได้รับคำแนะนำ ความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุจริต คูณธนกุลวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำอย่างใกล้ชิดในการทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยพันธุ์ รักวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวนทัน กิจไพศาลสกุล และ อาจารย์ ดร.ครรชิต ลิขิตเดชาโรจน์ ประธานและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาสละเวลาของท่านในการให้คำชี้แนะ และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาการต่างๆ แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ธนิต ธงทอง ที่ถ่ายทอดความรู้ และให้คำแนะนำเรื่องโครงข่ายใยประสาทเทียม ขอขอบคุณ รศ.ดร.วราวุธ วุฒิวณิชย์ และคุณอารียา ฤทธิมา ที่ให้คำแนะนำเรื่องการสร้างเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ คุณวีระชัย ชูพิศาลยโรจน์ และคุณธนพล พิมาน ที่ให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ และบุคลากรของภาคทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ และการติดต่อประสานงานในเรื่องต่างๆ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ชาวแหล่งน้ำทุกท่าน ที่ช่วยเป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณ กรมชลประทาน กรมอุตุนิยมวิทยา โครงการชลประทานอ่างเก็บน้ำเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ และโครงการประเมินผลเขื่อนป่าสักฯ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สกว. ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนด้านงบประมาณในการทำวิทยานิพนธ์บางส่วน และขอขอบคุณบริษัท รีซอสส์ เอนจิเนียริ่ง คอนซัลแตนท์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ มาด้วยดีตลอด

ท้ายสุดนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และคนในครอบครัวของข้าพเจ้า เป็นอย่างยิ่งที่ให้โอกาส และเป็นกำลังใจที่ดีต่อข้าพเจ้ามาโดยตลอด

อรอนงค์ วรรณราช

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูป ..... ฐ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ด

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 2

1.3 ขอบข่ายการศึกษา 2

1.4 แนวทางและขั้นตอนการดำเนินการศึกษา 6

1.5 การศึกษาที่ผ่านมา 8

1.5.1 การศึกษาด้านการพยากรณ์น้ำท่าในลุ่มน้ำป่าสัก 8

1.5.2 การศึกษาด้านการบริหารอ่างเก็บน้ำ 9

1.5.3 การศึกษาด้านโครงข่ายใยประสาทเทียม 13

บทที่ 2 พื้นที่ศึกษาและลักษณะโครงการ

2.1 สภาพพื้นที่ศึกษา 20

2.1.1 สภาพภูมิประเทศ 20

2.1.2 สภาพภูมิอากาศ 22

2.1.3 สภาพอุตุ-อุทกวิทยา 22

2.2 ลักษณะโครงการ 27

2.2.1 ความเป็นมาของโครงการ 27

2.2.2 ประโยชน์ของโครงการ 29

2.2.3 สถานภาพของโครงการ 30

2.2.4 ลักษณะของโครงการอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์ 31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.5 ความต้องการใช้น้ำของโครงการ 31

บทที่ 3 ทฤษฎีที่ใช้

3.1 ความต้องการใช้น้ำ 35

3.1.1 ความต้องการใช้น้ำเพื่ออุปโภค-บริโภค 35

3.1.2 ความต้องการใช้น้ำเพื่อการอุตสาหกรรม 35

3.1.3 ความต้องการใช้น้ำเพื่อการชลประทาน 35

3.1.4 ความต้องการใช้น้ำเพื่อรักษาสมดุลนิเวศวิทยา 39

3.2 การบริหารอ่างเก็บน้ำ 40

3.2.1 ส่วนประกอบของอ่างเก็บน้ำ 40

3.2.2 นโยบายการจัดการอ่างเก็บน้ำ 41

3.2.3 เกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ 42

3.2.4 การสร้างเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ 44

3.3 แบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียม 46

3.3.1 หลักการของโครงข่ายใยประสาทเทียม 46

3.3.2 แบบจำลองโครงข่ายใยประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบ Back-propagation (BP) 47

3.3.3 การกำหนดความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ 54

3.4 ฟังก์ชันความสัมพันธ์ของตัวแปรเดียวกันและต่างกันเทียบกับเวลา 56

3.4.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรเดียวกันเทียบกับเวลา 57

3.4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรเดียวกันในส่วนสุดท้ายเทียบกับเวลา 59

3.4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างกันเทียบกับเวลา 60

บทที่ 4 ข้อมูลที่ใช้และวิธีการดำเนินการศึกษา

4.1 การทบทวนความต้องการใช้น้ำของโครงการ 62

4.1.1 ความต้องการใช้น้ำเพื่ออุปโภค-บริโภคและอุตสาหกรรม 62

4.1.2 ความต้องการใช้น้ำเพื่อการชลประทาน 62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.3 ความต้องการใช้น้ำเพื่อรักษาสมดุลนิเวศวิทยา 69

4.2 การสร้างเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์ 70

4.2.1 ข้อมูลที่ใช้ในการสร้างเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ 72

4.2.2 การสังเคราะห์ข้อมูลน้ำท่ารายเดือนที่ไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ 71

4.2.3 การสร้างเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ 74

4.2.4 การจำลองการบริหารอ่างเก็บน้ำด้วยเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ 81

4.2.5 เกณฑ์การประเมินประสิทธิผล 82

4.3 การพัฒนาแบบจำลอง ANN เพื่อพยากรณ์อัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ 82

4.3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง ANN 82

4.3.2 การประมาณค่าปริมาณฝนรายวันเพิ่มเติม 88

4.3.3 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูล 89

4.3.4 การสังเคราะห์ข้อมูลอัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำรายวัน 89

4.3.5 ขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง ANN 92

4.3.6 การคัดเลือกรูปแบบการพยากรณ์ 95

4.3.7 การพัฒนาแบบจำลอง ANN พยากรณ์อัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ 95

4.4 การประยุกต์แบบจำลอง ANN กับการบริหารอ่างเก็บน้ำ 96

4.4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการบริหารอ่างเก็บน้ำ 96

4.4.2 การคัดเลือกเหตุการณ์วิกฤตด้วยแบบจำลองการบริหารอ่างเก็บน้ำรายวัน 98

4.4.3 แนวทางการประยุกต์แบบจำลอง ANN กับการบริหารอ่างเก็บน้ำ 102

4.4.4 เกณฑ์การประเมินประสิทธิผลของแบบจำลอง 106

บทที่ 5 ผลการศึกษา

5.1 ความต้องการใช้น้ำของโครงการ 108

5.2 เกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์ 110

5.2.1 การสังเคราะห์ข้อมูลใหม่ 110

5.2.2 การสร้างเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ 110

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.3 ผลการจำลองการบริหารอ่างเก็บน้ำด้วยเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ 116

5.3 แบบจำลอง ANN เพื่อพยากรณ์อัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ 122

5.3.1 รูปแบบการพยากรณ์ 122

5.3.2 แบบจำลอง ANN ฤดูฝน 135

5.3.3 แบบจำลอง ANN ฤดูแล้ง 157

5.3.4 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าสะสมจากแบบจำลอง ANN กับปริมาณน้ำท่าจริง 179

5.4 การประยุกต์แบบจำลอง ANN กับการบริหารอ่างเก็บน้ำ 182

5.4.1 ผลการคัดเลือกเหตุการณ์วิกฤตด้วยแบบจำลองการบริหารอ่างเก็บน้ำรายวัน 182

5.4.2 ผลการประยุกต์แบบจำลอง ANN กับการบริหารอ่างเก็บน้ำ 184

บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการศึกษา 198

6.2 ข้อเสนอแนะ 205

รายการอ้างอิง 207

ภาคผนวก 210

ก ข้อมูลอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์ 211

ข ข้อมูลที่ใช้คำนวณความต้องการใช้น้ำ 213

ค เกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ 219

ง การพัฒนาแบบจำลอง ANN 234

จ การประยุกต์แบบจำลอง ANN กับการบริหารอ่างเก็บน้ำ 270

ฉ การสำรวจและตรวจสอบสภาพพื้นที่โครงการ 284

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 291

สารบัญตาราง

		หน้า
ตาราง 2-1	ค่าเฉลี่ยรายปี ช่วงพิสัยของค่าเฉลี่ยรายเดือน ค่าเฉลี่ยสูงสุดรายเดือน และค่าเฉลี่ยต่ำสุดรายเดือนของตัวแปรภูมิอากาศหลักในพื้นที่ลุ่มน้ำป่าสัก	23
ตาราง 2-2	ปริมาณฝนเฉลี่ยของสถานีวัดน้ำฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำป่าสักและบริเวณใกล้เคียง	24
ตาราง 2-3	ช่วงพิสัยของพื้นที่รับน้ำและค่าปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่	24
ตาราง 2-4	ลักษณะของโครงการอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์	32
ตาราง 2-5	ข้อมูลความต้องการใช้น้ำด้านต่าง ๆ จากโครงการป่าสักฯ	34
ตาราง 4-1	พื้นที่ชลประทานและความต้องการน้ำเฉลี่ยของโครงการชลประทานเดิม	65
ตาราง 4-2	พื้นที่ชลประทานและความต้องการน้ำเฉลี่ยของโครงการชลประทานเปิดใหม่	66
ตาราง 4-3	สัดส่วนการเฉลี่ยด้วยวิธีธีเอสเสนโพลีกอนของสถานีวัดน้ำฝนของโครงการชลประทานเปิดใหม่	67
ตาราง 4-4	ปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง	68
ตาราง 4-5	ประสิทธิภาพชลประทาน	69
ตาราง 4-6	สรุปช่วงของข้อมูลและแหล่งที่มาของข้อมูลน้ำฝนที่ใช้ในการศึกษา	84
ตาราง 4-7	สัดส่วนการเฉลี่ยด้วยวิธีธีเอสเสนโพลีกอนของสถานีวัดน้ำฝนของลุ่มน้ำย่อย	86
ตาราง 4-8	สรุปช่วงของข้อมูลและแหล่งที่มาของข้อมูลน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา	87
ตาราง 4-9	ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีของสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา	88
ตาราง 4-10	อัตราการไหลเฉลี่ยรายวัน(ลบ.ม/วินาที) ของสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา	92
ตาราง 5-1	ผลการคำนวณความต้องการใช้น้ำของโครงการ	100
ตาราง 5-2	ผลการจำลองการบริหารอ่างเก็บน้ำป่าสักฯด้วยเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน	117
ตาราง 5-3	ผลการจำลองการบริหารอ่างเก็บน้ำป่าสักฯด้วยเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ สภาพการใช้น้ำอนาคต	117
ตาราง 5–4	ข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองพยากรณ์อัตราการไหลรายวัน ณ สถานี SM3 กรณีพยากรณ์แบบรวมทั้งพื้นที่	128

สารบัญตาราง

		หน้า
ตาราง 5-5	ข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองพยากรณ์อัตราการไหลรายวัน ณ สถานี SM3 กรณีพยากรณ์แบบแบ่งลุ่มน้ำย่อย	128
ตาราง 5-6	ผลการพยากรณ์จากแบบจำลองพยากรณ์อัตราการไหลรายวัน แบบรวมทั้งลุ่มน้ำ	130
ตาราง 5-7	ผลการพยากรณ์จากแบบจำลองพยากรณ์อัตราการไหลรายวัน แบบแบ่งลุ่มน้ำย่อย	130
ตาราง 5-8	สรุปตัวแปรนำเข้าและออกของแบบจำลอง ANN ฤดูฝน	141
ตาราง 5-9	ผลการพยากรณ์โดยแบบจำลอง ANNล่วงหน้า 1 ถึง 7 วัน ในฤดูฝน	142
ตาราง 5-10	สรุปตัวแปรนำเข้าและออกของแบบจำลอง ANN ฤดูแล้ง	163
ตาราง 5-11	ผลการพยากรณ์โดยแบบจำลอง ANN ล่วงหน้า 1 ถึง 7 วัน ในฤดูแล้ง	164
ตาราง 5-12	ปริมาณน้ำท่าสะสมจากการคำนวณโดยแบบจำลอง ANN เทียบกับปริมาณน้ำท่าจริงสะสมในฤดูฝน	181
ตาราง 5-13	ปริมาณน้ำท่าสะสมจากการคำนวณโดยแบบจำลอง ANN เทียบกับปริมาณน้ำท่าจริงสะสมในฤดูแล้ง	181
ตาราง 5-14	ผลการจำลองการบริหารอ่างเก็บน้ำป่าสักฯรายวัน สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน	183
ตาราง 5-15	ผลการจำลองการบริหารอ่างเก็บน้ำป่าสักฯรายวัน สภาพการใช้น้ำอนาคต	183

สารบัญรูป

		หน้า
รูป 1-1	พื้นที่ลุ่มน้ำป่าสัก	3
รูป 1-2	แนวทางและขั้นตอนการดำเนินการศึกษา	7
รูป 1-3	กฎมัลติเปิ้ลเฮดดิ้งในช่วงเวลา t	9
รูป 2-1	ลุ่มน้ำป่าสักและพื้นที่ศึกษา	21
รูป 2-2	เส้นชั้นปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปีในพื้นที่ลุ่มน้ำป่าสัก	25
รูป 2-3	เส้นชั้นปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปีต่อหน่วยพื้นที่ในพื้นที่ลุ่มน้ำป่าสัก	26
รูป 3-1	การแบ่งปริมาตรอ่างเก็บน้ำ	40
รูป 3-2	หลักการทำงานเบื้องต้นของ ANN	46
รูป 3-3	ฟังก์ชันการกระตุ้น	47
รูป 3-4	โครงข่าย MLFF เรียนรู้แบบ Back-propagation	48
รูป 3-5	ขั้นตอนการทำงานของการเรียนรู้ของแบบจำลอง BPNN	53
รูป 3-6	นิยามค่าความสัมพันธ์แบบ Autocorrelation ของอนุกรมเวลาต่อเนื่องชุดหนึ่ง	57
รูป 4-1	พื้นที่ชลประทานของโครงการอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์	63
รูป 4-2	แผนภูมิสำหรับการวิเคราะห์การบริหารอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์ สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน	72
รูป 4-3	แผนภูมิสำหรับการวิเคราะห์การบริหารอ่างเก็บน้ำป่าสักชลสิทธิ์ สภาพการใช้น้ำอนาคต	73
รูป 4-4	ขั้นตอนการสร้างเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำ	76
รูป 4-5	การแจกแจงความน่าจะเป็นของ NRI_t	78
รูป 4-6	เกณฑ์ที่ใช้วิเคราะห์หาช่วงฤดูแล้งและฤดูฝน	80
รูป 4-7	การแจกแจงความน่าจะเป็นของ $\sum_{i=1}^{D} NRI_t$	81
รูป 4-8	ตำแหน่งสถานีวัดน้ำฝนและน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา	83
รูป 4-9	การแบ่งพื้นที่รับน้ำของข้อมูลสถานีวัดน้ำฝน	85
รูป 4-10	การตรวจสอบกราฟมวลสะสมระหว่างฝนสะสมรายปีสถานีต่าง ๆ กับฝนสะสมรายปีเฉลี่ย 9 สถานี	90

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูป 4-11	การตรวจสอบกราฟมวลสะสมระหว่างน้ำท่าสะสมรายปีสถานีต่าง ๆ กับน้ำท่าสะสมรายปีเฉลี่ย 5 สถานี	91
รูป 4-12	การกระจายน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนที่สถานีวัดน้ำฝนบางสถานีในพื้นที่ลุ่มน้ำป่าสัก	97
รูป 4-13	ขั้นตอนการบริหารอ่างเก็บน้ำในช่วงฤดูฝน	99
รูป 4-14	ขั้นตอนการบริหารอ่างเก็บน้ำในช่วงฤดูแล้ง	101
รูป 4-15	การประยุกต์แบบจำลอง ANN พยากรณ์อัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่วงหน้า 1 วัน กับการบริหารอ่างเก็บน้ำ	104
รูป 4-16	การประยุกต์แบบจำลอง ANN พยากรณ์อัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำล่วงหน้า 2 วัน กับการบริหารอ่างเก็บน้ำ	105
รูป 5-1	เกณฑ์ RCP ที่ค่าความเสี่ยงต่าง ๆ (ก่อนปรับ) สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน	112
รูป 5-2	เกณฑ์ RCP ที่ค่าความเสี่ยงต่าง ๆ (ก่อนปรับ) สภาพการใช้น้ำอนาคต	113
รูป 5-3	เกณฑ์ RCPxxM สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน	114
รูป 5-4	เกณฑ์ RCPxxM สภาพการใช้น้ำอนาคต...	115
รูป 5-5	ความถี่ของการไหลล้นอ่าง สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน	118
รูป 5-6	ผลรวมของการไหลล้นอ่าง สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน	118
รูป 5-7	ความถี่ของการขาดแคลนน้ำ สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน	118
รูป 5-8	ผลรวมของการขาดแคลนน้ำ สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน	118
รูป 5-9	ความถี่ของการไหลล้นอ่าง สภาพการใช้น้ำอนาคต	118
รูป 5-10	ผลรวมของการไหลล้นอ่าง สภาพการใช้น้ำอนาคต	118
รูป 5-11	ความถี่ของการขาดแคลนน้ำ สภาพการใช้น้ำอนาคต	118
รูป 5-12	ผลรวมของการขาดแคลนน้ำ สภาพการใช้น้ำอนาคต	118
รูป 5-13	สถิติปริมาณน้ำเก็บกักเฉลี่ยในรอบ 31 ปี เมื่อบริหารอ่างเก็บน้ำด้วยเกณฑ์ RCP0.04M (P) สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน	121
รูป 5-14	สถิติปริมาณน้ำเก็บกักเฉลี่ยในรอบ 31 ปี เมื่อบริหารอ่างเก็บน้ำด้วยเกณฑ์ RCP0.03M (F) สภาพการใช้น้ำอนาคต	121
รูป 5-15	กราฟความสัมพันธ์สำหรับคัดเลือกตัวแปรนำเข้าในการพยากรณ์ Q_{t+1} ณ สถานี SM3 กรณีการพยากรณ์แบบรวมทั้งลุ่มน้ำ	124

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูป 5-16 กราฟความสัมพันธ์สำหรับคัดเลือกตัวแปรนำเข้าในการพยากรณ์ Q_{t+1} ณ สถานี SM3 กรณีการพยากรณ์แบบแบ่งลุ่มน้ำย่อย 125

รูป 5-17 เปรียบเทียบผลการพยากรณ์อัตราการไหลรายวันที่สถานีวัดน้ำท่า SM3 133

รูป 5-18 กราฟความสัมพันธ์สำหรับของการคัดเลือกตัวแปรนำเข้าในการพยากรณ์ Qt+1 ณ อ่างเก็บน้ำ ของแบบจำลอง ANNฤดูฝน 136

รูป 5-19 การเปรียบเทียบผลการพยากรณ์อัตราการไหลรายวันเข้าอ่างเก็บน้ำระหว่างแบบจำลอง ANN กับข้อมูลจริงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) ในช่วงเรียนรู้ 143

รูป 5-20 การเปรียบเทียบผลการพยากรณ์อัตราการไหลรายวันเข้าอ่างเก็บน้ำระหว่างแบบจำลอง ANN กับข้อมูลจริงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) ในช่วงทดสอบ 147

รูป 5-21 การเปรียบเทียบผลการพยากรณ์อัตราการไหลรายวันเข้าอ่างเก็บน้ำระหว่างแบบจำลอง ANN กับข้อมูลจริงฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.) ในช่วงรับรองผล 153

รูป 5-22 กราฟความสัมพันธ์สำหรับของการคัดเลือกตัวแปรนำเข้าในการพยากรณ์ Qt+1 ณ อ่างเก็บน้ำ ของแบบจำลอง ANNฤดูแล้ง 159

รูป 5-23 การเปรียบเทียบผลการพยากรณ์อัตราการไหลรายวันเข้าอ่างเก็บน้ำระหว่างแบบจำลอง ANN กับข้อมูลจริงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) ในช่วงเรียนรู้ 165

รูป 5-24 การเปรียบเทียบผลการพยากรณ์อัตราการไหลรายวันเข้าอ่างเก็บน้ำระหว่างแบบจำลอง ANN กับข้อมูลจริงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) ในช่วงทดสอบ 169

รูป 5-25 การเปรียบเทียบผลการพยากรณ์อัตราการไหลรายวันเข้าอ่างเก็บน้ำระหว่างแบบจำลอง ANN กับข้อมูลจริงฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.) ในช่วงรับรองผล 175

รูป 5-26 ผลการบริหารอ่างเก็บน้ำด้วยเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำแบบต่างๆ สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน ใน ปี พ.ศ.2521 185

รูป 5-27 ผลการบริหารอ่างเก็บน้ำด้วยเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำแบบต่างๆ สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน ใน ปี พ.ศ.2523 188

รูป 5-28 ผลการบริหารอ่างเก็บน้ำด้วยเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำแบบต่างๆ สภาพการใช้น้ำอนาคต ใน ปี พ.ศ.2521 190

รูป 5-29 ผลการบริหารอ่างเก็บน้ำด้วยเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำแบบต่างๆ สภาพการใช้น้ำอนาคต ใน ปี พ.ศ.2538 191

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูป 5-30 ผลการบริหารอ่างเก็บน้ำด้วยเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำแบบต่างๆ สภาพการใช้น้ำอนาคต ใน ปี พ.ศ.2515 193

รูป 5-31 ผลการบริหารอ่างเก็บน้ำด้วยเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำแบบต่างๆ สภาพการใช้น้ำอนาคต ใน ปี พ.ศ.2517 194

รูป 5-32 ผลการบริหารอ่างเก็บน้ำด้วยเกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำแบบต่างๆ สภาพการใช้น้ำอนาคต ใน ปี พ.ศ.2523 195

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

เกณฑ์ RC42	=	เกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำป่าสักฯ ปี พ.ศ. 2542
เกณฑ์ RC46	=	เกณฑ์การปฏิบัติงานอ่างเก็บน้ำป่าสักฯ ปี พ.ศ. 2546
เกณฑ์ RCP0.02M(P)	=	เกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นโดยวิธี Probability based Rule Curves ที่ค่าความเสี่ยง 0.02 (สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน)
เกณฑ์ RCP0.03M(P)	=	เกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นโดยวิธี Probability based Rule Curves ที่ค่าความเสี่ยง 0.03 (สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน)
เกณฑ์ RCP0.04M(P)	=	เกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นโดยวิธี Probability based Rule Curves ที่ค่าความเสี่ยง 0.04 (สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน)
เกณฑ์ RCP0.05M(P)	=	เกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นโดยวิธี Probability based Rule Curves ที่ค่าความเสี่ยง 0.05 (สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน)
เกณฑ์ RCP0.10M(P)	=	เกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นโดยวิธี Probability based Rule Curves ที่ค่าความเสี่ยง 0.10 (สภาพการใช้น้ำปัจจุบัน)
เกณฑ์ RCP0.02M(F)	=	เกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นโดยวิธี Probability based Rule Curves ที่ค่าความเสี่ยง 0.02 (สภาพการใช้น้ำอนาคต)
เกณฑ์ RCP0.03M(F)	=	เกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นโดยวิธี Probability based Rule Curves ที่ค่าความเสี่ยง 0.03 (สภาพการใช้น้ำอนาคต)
เกณฑ์ RCP0.04M(F)	=	เกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นโดยวิธี Probability based Rule Curves ที่ค่าความเสี่ยง 0.04 (สภาพการใช้น้ำอนาคต)
เกณฑ์ RCP0.05M(F)	=	เกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นโดยวิธี Probability based Rule Curves ที่ค่าความเสี่ยง 0.05 (สภาพการใช้น้ำอนาคต)
เกณฑ์ RCP0.10M(F)	=	เกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นโดยวิธี Probability based Rule Curves ที่ค่าความเสี่ยง 0.10 (สภาพการใช้น้ำอนาคต)
Frequency of Spill	=	ความถี่ของการไหลล้นอ่าง
Frequency of Shortage	=	ความถี่ของการขาดน้ำ
Max. Spill	=	การไหลล้นอ่างสูงสุด
Max. Shortage	=	การขาดน้ำสูงสุด
Σ(Spill)	=	ผลรวมของการไหลล้นอ่าง

$\Sigma(\text{Spill})^2$	=	ผลรวมการไหลล้นอ่างกำลังสอง
$\Sigma(\text{Shortage})$	=	ผลรวมของการขาดน้ำ
$\Sigma(\text{Shortage})^2$	=	ผลรวมการขาดน้ำกำลังสอง
SM1	=	สถานีวัดน้ำท่า SM1
S4B	=	สถานีวัดน้ำท่า S4B
SM3	=	สถานีวัดน้ำท่า SM3
RES	=	อ่างเก็บน้ำ
R1	=	ปริมาณฝนเฉลี่ยพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย 1
R2	=	ปริมาณฝนเฉลี่ยพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย 2
R3	=	ปริมาณฝนเฉลี่ยพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย 3
R4	=	ปริมาณฝนเฉลี่ยพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย 4
R5	=	ปริมาณฝนเฉลี่ยพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย 5
FC RES	=	ผลการพยากรณ์อัตราการไหลเข้าอ่างเก็บน้ำ จากแบบจำลอง ANN
Q_j	=	อัตราการไหลวันที่ j
S_j	=	ความจุอ่างเก็บน้ำในวันที่ j.
I_j	=	ปริมาณน้ำท่าเข้าอ่างเก็บน้ำในวันที่ j
R_j	=	ปริมาณฝนที่ตกลงในบริเวณอ่างเก็บน้ำในวันที่ j
O_j	=	ปริมาณน้ำที่ปล่อยจากอ่างเก็บน้ำในวันที่ j
E_j	=	การระเหยในวันที่ j, ล้าน ลบ.ม.
EI	=	ดรรชนีวัดประสิทธิภาพ
RMSE	=	ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย
MAD	=	ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสัมบูรณ์
MSE	=	ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย
Max.Absolute Error	=	ค่าคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์สูงสุด

W/O ANN	=	การบริหารอ่างเก็บน้ำโดยไม่ประยุกต์ใช้แบบจำลอง ANN
FC1	=	การบริหารอ่างเก็บน้ำโดยประยุกต์ใช้แบบจำลอง ANN พยากรณ์ล่วงหน้า 1 วัน
FC2	=	การบริหารอ่างเก็บน้ำโดยประยุกต์ใช้แบบจำลอง ANN พยากรณ์ล่วงหน้า 2 วัน
FC3	=	การบริหารอ่างเก็บน้ำโดยประยุกต์ใช้แบบจำลอง ANN พยากรณ์ล่วงหน้า 3 วัน
FC4	=	การบริหารอ่างเก็บน้ำโดยประยุกต์ใช้แบบจำลอง ANN พยากรณ์ล่วงหน้า 4 วัน
FC5	=	การบริหารอ่างเก็บน้ำโดยประยุกต์ใช้แบบจำลอง ANN พยากรณ์ล่วงหน้า 5 วัน
FC6	=	การบริหารอ่างเก็บน้ำโดยประยุกต์ใช้แบบจำลอง ANN พยากรณ์ล่วงหน้า 6 วัน
FC7	=	การบริหารอ่างเก็บน้ำโดยประยุกต์ใช้แบบจำลอง ANN พยากรณ์ล่วงหน้า 7 วัน
$\sum Spill_{FC}$	=	ปริมาณการล้นของน้ำเมื่อใช้แบบจำลอง ANN
$\sum Spill_{w/o\ ANN}$	=	ปริมาณการล้นของน้ำเมื่อไม่ใช้แบบจำลอง ANN
		สภาวะขาดแคลนน้ำ
$\sum Short_{FC}$	=	ปริมาณการขาดแคลนน้ำเมื่อใช้แบบจำลอง ANN
$\sum Short_{w/o\ ANN}$	=	ปริมาณการขาดแคลนน้ำเมื่อไม่ใช้แบบจำลอง ANN
$\sum ESpill_{FC}$	=	ปริมาณน้ำไหลล้นจากการบริหารจริงเป็นความคลาดเคลื่อนจากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง ANN
$\sum EShort_{FC}$	=	ปริมาณน้ำที่ขาดแคลนจากการบริหารจริงเป็นความคลาดเคลื่อนจากการประยุกต์ใช้แบบจำลอง ANN