

การประยุกต์ใช้นิวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้เพื่อประเมินเวลาสำรองในโครงการก่อสร้างอุโมงค์

ธนิตเชษฐ์ ดวงโสม*

กองวิชาวิศวกรรมโยธา ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

Received: 8 July 2020

Revised: 12 January 2021

Accepted: 11 March 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเวลาสำรองของโครงการ ในรูปแบบของเวลารอคอยจากเหตุการณ์ ความเสี่ยงที่เกิดขึ้นของกิจกรรมในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ ด้วยวิธีเจาะและระเบิด โดยประยุกต์ใช้นิวโรฟuzzyแบบ ปรับตัวได้ (ANFIS) ร่วมกับแผนกำหนดระยะเวลากิจกรรมแบบสายงานวิกฤต เพื่อนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการทำนาย ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความเสี่ยง โดยอาศัยข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน ของโครงการก่อสร้างโรงไฟฟ้า “น้ำเทิน 1” ทำนายความเป็นไปได้ที่จะเกิดเหตุการณ์ความเสี่ยง โดยพิจารณาจากปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเสี่ยงในกรณีต่างๆ การนำเข้าข้อมูลในระบบ ANFIS จะแบ่งข้อมูลเป็น 3 ชุด คือ ชุด A, B และ C โดยแต่ละชุดจะแบ่งข้อมูลเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ใช้เรียนรู้และทดสอบ จากนั้น เลือกชุดข้อมูลที่มีความแม่นยำมากที่สุด โดยพิจารณาจากค่าความ คลาดเคลื่อนของรากที่สองเฉลี่ย (RMSE) พบว่า ข้อมูลชุด B มีค่า RMSE น้อยที่สุด จึงมีความเหมาะสมในการนำ ข้อมูลชุดนี้มาใช้ สำหรับการประยุกต์ใช้ในโครงการก่อสร้างจริง ผลการศึกษา พบว่า ระยะเวลาการวางแผนด้วยวิธี สายงานวิกฤตแบบทั่วไป เท่ากับ 122 วัน ระยะเวลาการวางแผนแบบรวมความเสี่ยงด้วย ANFIS เท่ากับ 172 วัน และระยะเวลาการก่อสร้างจริง เท่ากับ 175 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับแล้ว ระยะเวลาการวางแผนด้วย ANFIS มีความใกล้เคียงกับระยะเวลาในการก่อสร้างจริง จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนงานก่อสร้างอุโมงค์ด้วย วิธีเจาะและระเบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การก่อสร้างอุโมงค์ นิวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้ วิธีสายงานวิกฤต

* ผู้ประสานงานหลัก; อีเมล: tanitchet.do@crma.ac.th

Application of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems for Evaluating Time Contingency in Tunnel Construction Project

Tanitchet Doungsoma*

Department of Civil Engineering, Academic Division,
Chulachomklao Royal Military Academy

Received: 8 July 2020

Revised: 12 January 2021

Accepted: 11 March 2021

Abstract

The objective of this research is to study the time contingency of the project in case of lag time from the risk event of the activities in the tunnel construction project by the method of drilling and blasting. This research applied the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) with the Critical Path Method (CPM) in order to be used as a tool for predicting the probability of risk event, based on 5 experts of the Nam Theun 1 Hydropower Construction Project to predict the probability of risk events by considering the factors which cause risk in various cases. Furthermore, the input data in the ANFIS system would be divided into three data sets: A, B, and C. Each set would be divided into two parts which were used for learning and testing. Then, the most accurate data set was chosen by considering the Root Mean Square Error (RMSE). The results showed that data set B had the smallest RMSE which was appropriate to use. When applied to the real construction project, the results showed that the duration of the general CPM method was 122 days. The duration of combined risk planning with ANFIS was 172 days and the actual construction duration was 175 days. When the results are compared, the planning duration with ANFIS is close to the actual construction duration. Therefore, this method can be effectively applied to the tunnel construction by the method of drilling and blasting.

Keywords: Tunnel Construction, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS),
Critical Path Method (CPM)

* Corresponding Author, E-mail: tanitchet.do@crma.ac.th

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงการก่อสร้างโรงไฟฟ้า “น้ำเหิน 1” ตั้งอยู่แขวงบอลิคำไซ สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว (Lao People's Democratic Republic) มีกำลังการผลิตไฟฟ้ารวม 650 เมกะวัตต์ (Song Da 9 Join Stock Company, 2016) โดยมีการแบ่งงานก่อสร้างออกเป็นหลายส่วน และส่วนของงานที่มีความน่าสนใจ คือ การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน ซึ่งเป็นงานที่มีความเสี่ยงสูง โดยทั่วไป วิธีที่ได้รับความนิยมและใช้ในการก่อสร้างมี 2 วิธี คือ การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยเครื่องจักร (Tunnel Boring Machine: TBM) และการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีเจาะและระเบิด (Drilling and Blasting Method: D & B) ความท้าทายที่สำคัญของโครงการนี้ คือ ช่วงของการก่อสร้างอุโมงค์ ADIT 1 ระยะ 320 เมตร โดยมีสภาพทางธรณีวิทยาทั่วไปเป็นชั้นหินแข็ง จึงเลือกใช้การก่อสร้างด้วยวิธีเจาะและระเบิด ซึ่งมีความเสี่ยงสูงในการปฏิบัติงาน จนอาจส่งผลกระทบทำให้ระยะเวลาการก่อสร้างเกิดความล่าช้า อันมีผลมาจากปัจจัยเสี่ยงด้านต่างๆ เช่น สภาพทางธรณีวิทยา สภาพแวดล้อม และปัจจัยทางด้านการบริหารจัดการ (Pawan and Rujirayanyong, 2019) ซึ่งสิ่งเหล่านี้ ถือว่าเป็นปัจจัยเสี่ยงของโครงการที่ควรจะนำมาพิจารณาร่วมกับการวางแผนงาน เพื่อที่จะสามารถรับมือกับความเสี่ยงได้อย่างเป็นระบบ

การวางแผนกำหนดเวลางาน โดยวิธีสายงานวิกฤต (Critical Path Method: CPM) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของงานต่างๆ ได้อย่างชัดเจน ทำให้ทราบถึงสายงานที่อยู่บนเส้นทางวิกฤต คือ กิจกรรมที่ไม่สามารถล่าช้าได้ เพราะจะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาของทั้งโครงการ แต่อย่างไรก็ตาม วิธี CPM ไม่ได้ออกแบบมาเพื่อรับมือกับความไม่แน่นอน (Uncertainty) จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวางแผนงานที่มีความเสี่ยงได้โดยตรง (Promsiri and Pawan, 2018) ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ ได้นำเสนอเทคนิคนิวโรฟuzzyแบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems: ANFIS) ร่วมกับการวางแผนงานแบบ CPM เพื่อนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการวางแผนงานโครงการที่มีความเสี่ยงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

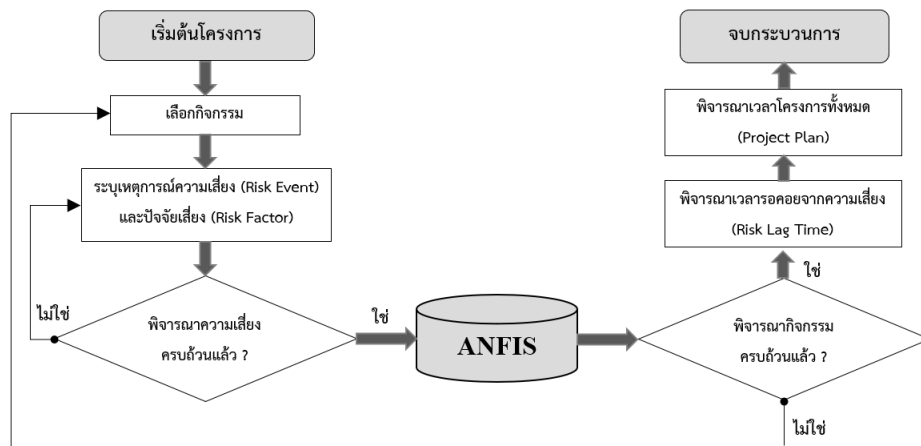
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาและกำหนดโครงสร้างการจัดแบ่งงาน (Work Breakdown Structure: WBS) ของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ ด้วยวิธีเจาะและระเบิด
2. เพื่อศึกษาและระบุความเสี่ยง (Risk Identification) โดยการกำหนดโครงสร้างการจัดแบ่งความเสี่ยง (Risk Breakdown Structure: RBS) จากเหตุการณ์ความเสี่ยง (Risk Event) และปัจจัยเสี่ยง (Risk Factor) ของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ ด้วยวิธีเจาะและระเบิด
3. เพื่อศึกษาและกำหนดระยะเวลาของโครงการก่อสร้าง โดยการพัฒนากรอบแนวทางปฏิบัติ (Framework) ในการเฟ้นเวลารอคอยของกิจกรรมก่อสร้าง และประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment) จากแบบจำลองทำนายโอกาสที่จะเกิดความเสี่ยง (Probability) และผลกระทบ (Impact) ที่เกิดขึ้น ของโครงการก่อสร้างอุโมงค์ ด้วยวิธีเจาะและระเบิด

กรอบแนวคิดในการวิจัย

ผู้วิจัยได้กำหนดกรอบแนวคิดในการวิจัย ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นที่หนึ่ง การเลือกพิจารณากิจกรรมที่มีความเสี่ยง พร้อมทั้งระบุเหตุการณ์ความเสี่ยง (Risk Event) และปัจจัยเสี่ยง (Risk Factor) ขั้นที่สอง

การเก็บรวบรวมข้อมูลในอดีตและจากผู้เชี่ยวชาญในโครงการ นำเข้าข้อมูลเพื่อเรียนรู้ (Training) และทดสอบ (Testing) ในระบบ ANFIS จากนั้นเลือกโมเดลที่มีความแม่นยำมากที่สุด ขั้นที่สาม การนำข้อมูลที่ได้จาก ANFIS หาค่าระยะเวลาสำรอง (Time Contingency) ของโครงการในรูปแบบของเวลารอคอย (Lag Time) และคำนวณหาระยะเวลาทั้งหมดของโครงการ ดังภาพที่ 1

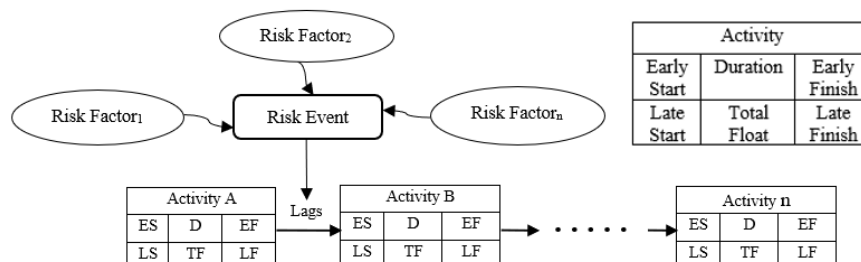


ภาพที่ 1 กรอบการทำงานของกรวางแผนโครงการที่มีความเสี่ยงด้วย ANFIS

แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. แนวคิดและทฤษฎี

1.1 วิธีสายงานวิกฤต (Critical Path Method: CPM) เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมในการกำหนดเวลาของโครงการ สามารถบอกวันเริ่มต้นและวันสิ้นสุดโครงการได้ โดยใช้ลูกศรแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมต่างๆ ความสัมพันธ์ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ความสัมพันธ์แบบเสร็จ-เริ่ม (Finish to Start) เนื่องจากเป็นรูปแบบที่เข้าใจได้ง่าย สำหรับการศึกษาครั้งนี้ ได้เพิ่มเวลารอคอย (Lag time) ที่พิจารณาพร้อมกับความเสี่ยงลงในสายงาน CPM ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์แบบ Finish to Start เมื่อพิจารณาพร้อมกับความเสี่ยง

1.2 โครงสร้างการจัดแบ่งงาน (Work Breakdown Structure: WBS) คือ การแบ่งโครงการออกเป็นกลุ่มงานย่อยตามลำดับชั้นอย่างเป็นระบบ ในแต่ละกลุ่มงานย่อยก็อาจแบ่งย่อยได้อีกจนไปถึงระดับที่เล็กที่สุด คือ ระดับกิจกรรม (Activity) โดยทั่วไปโครงสร้างของ WBS ขึ้นอยู่กับขนาดและความซับซ้อนของแต่ละโครงการ ถ้าเป็น

โครงการที่มีขนาดใหญ่อาจจะประกอบด้วยโครงการที่มีขนาดเล็กอยู่ในนั้น หรือถ้าเป็นโครงการขนาดกลางหรือขนาดเล็กอาจจะมีเพียงกิจกรรมที่ประกอบเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนมากนัก

1.3 การประเมินความเสี่ยง (Risk Assessment) คือ การพัฒนารอบแนวทางปฏิบัติการประเมินเวลารอคอยที่พิจารณาพร้อมกับความเสี่ยง ประกอบด้วย กระบวนการระบุความเสี่ยง (Risk Identification) และการวิเคราะห์ความเสี่ยง (Risk Analysis) โดยพิจารณาจากการประเมินโอกาสที่จะเกิดความเสี่ยง (Likelihood/Probability) และความรุนแรงของผลกระทบจากเหตุการณ์ความเสี่ยง (Impact) การประมาณการความเสี่ยง (Risk Estimation) ของโครงการ สามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$\text{Risk (R)} = \text{Probability (P)} \times \text{Impact (I)} \quad (1)$$

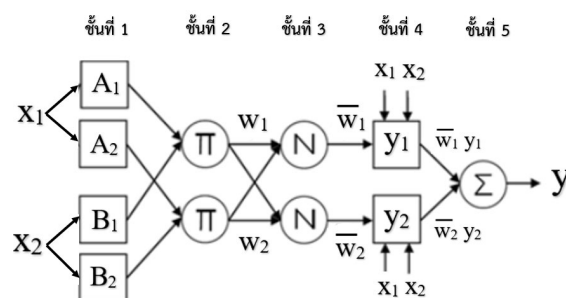
1.4 นิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems: ANFIS) เป็นการประยุกต์ผสมผสานวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) กับฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) โดยโครงข่ายประสาทเทียมมีจุดเด่นด้านการเรียนรู้จากข้อมูลและการปรับแต่งความรู้ในเครือข่ายที่มีการเชื่อมโยงกันอย่างหนาแน่นคล้ายกับสมองของมนุษย์ สำหรับฟัซซีลอจิก มีจุดเด่นในเรื่องการมีเหตุผลเชิงตรรกะ เนื่องจากโครงสร้างสามารถตีความในรูปแบบถ้า-แล้ว (If-Then Rule) ซึ่งสอดคล้องกับความคิดของมนุษย์ ดังนั้น เมื่อนำข้อดีของทั้งสองรูปแบบมารวมกัน ก็จะสามารถกลายเป็นระบบที่มีกระบวนการเรียนรู้ได้ในตัวเองและเป็นระบบที่มีความสามารถในการตีความหมายและให้เหตุผลได้อย่างดีเยี่ยม

โครงสร้างระบบ ANFIS มี 2 อินพุต แต่ละอินพุตแบ่งเป็นสองฟัซซีเซต มิติที่ 1 แบ่งฟัซซีเซตเป็น A1 และ A2 มิติที่ 2 แบ่งเป็น B1 และ B2 ส่วนข้อตามมีพารามิเตอร์เป็น r_{j0} , r_{j1} และ r_{j2} โดยโครงสร้างดังกล่าวมีพื้นฐานแบบ Takagi Sugeno Kang Model (TSK) มีจำนวน L กฎ (Pookyapon and Pawan, 2015) ดังนี้

Rule1: IF x_1 is A_1 and x_2 is B_1 THEN $y_1 = r_{10} + r_{11}x_1 + r_{12}x_2$

Rule2: IF x_1 is A_2 and x_2 is B_1 THEN $y_2 = r_{20} + r_{21}x_1 + r_{22}x_2$

RuleL: IF x_1 is A_2 and x_2 is B_2 THEN $y_2 = r_{L0} + r_{L1}x_1 + r_{L2}x_2$



ภาพที่ 3 โครงสร้างระบบอนุมานนิวโรฟัซซีแบบปรับตัวได้ (ANFIS)

โครงสร้างหลักของ ANFIS แบ่งเป็น 5 ชั้น ดังภาพที่ 3 ได้แก่

ชั้นที่ 1 ประกอบด้วยฟังก์ชันสมาชิกของตัวแปรอินพุตแต่ละตัว ดังสมการที่ 2

$$O^1_j = \mu_{A_i}(x) \quad (2)$$

ชั้นที่ 2 เป็นการคำนวณหาความสัมพันธ์ของอินพุตเวกเตอร์ที่เป็นไปได้ทั้งหมด ดังสมการที่ 3

$$W_j = \mu_{j1}(x_1) \times \mu_{j2}(x_2), j = 1 \dots L \quad (3)$$

ชั้นที่ 3 เป็นการ Normalize เพื่อหาค่าอินพุตเวกเตอร์ที่ได้จากชั้นที่ 2 ดังสมการที่ 4

$$\bar{W}_j = \frac{W_j}{W_1 + W_2 + \dots + W_L}, j = 1 \dots L \quad (4)$$

ชั้นที่ 4 เป็นการ Output Membership Function ของกฎแต่ละข้อ จากการรับค่าในชั้นที่ 3 กำหนดด้วยสมการโดย (p, q, r) เรียกว่า Consequent parameter ดังสมการที่ 5

$$O^4_j = \bar{W}_j y_j = \bar{W}_j (r_{j0} + r_{j1}x_1 + r_{j2}x_2) \quad (5)$$

ชั้นที่ 5 เป็นการคำนวณเพื่อหาค่าเอาต์พุตที่ได้จากชั้นที่ 4 เป็นจำนวนจริงผลลัพธ์ที่ได้ ดังสมการที่ 6

$$O^5_j = \bar{W}^t y = \frac{\sum_{j=1}^L \bar{W}_j y_j}{\sum_{j=1}^L \bar{W}_j} \quad (6)$$

การทดสอบหาความแม่นยำของแบบจำลอง โดยใช้ค่า Root Mean Square Error (RMSE) ซึ่งเป็นการวัดค่าความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่ประมาณได้ใกล้เคียงกับค่าจริง สามารถหาได้จากสมการที่ 7

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - D_i)^2} \times 100\% \quad (7)$$

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

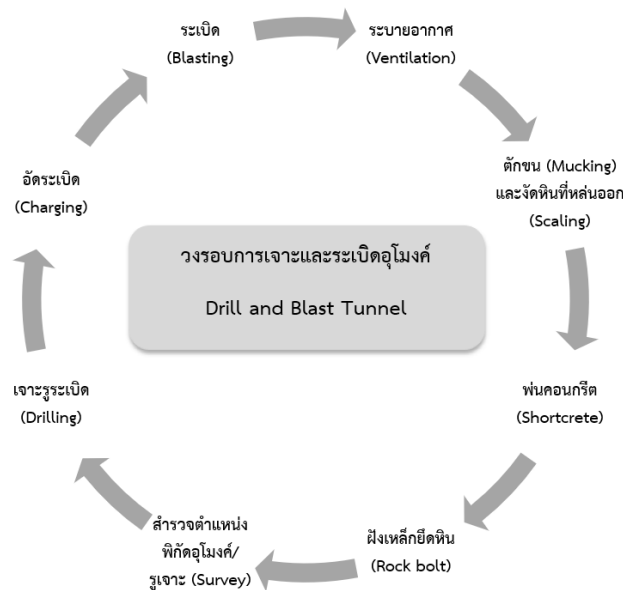
ปัจจุบันระบบ ANFIS ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น Zhang et al. (2006) ได้ประยุกต์ใช้ ANFIS เพื่อประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มคอนกรีตอัดแรงในประเทศจีน ผลการศึกษาพบว่า ค่าที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นและค่าจากการทดสอบจริงมีความใกล้เคียงกัน Ebrat and Ghodsi (2011) ได้ใช้แบบจำลอง ANFIS เพื่อประเมินความเสี่ยงของโครงการก่อสร้างในประเทศอิหร่าน โดยนำข้อมูลจากประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญและการเก็บข้อมูลที่มีในอดีต ผลจากการวิจัยพบว่า แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำมากพอสำหรับการประเมินความเสี่ยงของโครงการก่อสร้าง

Kaewprasit and Mungsing (2015) สร้างแบบจำลองสำหรับการตัดสินใจเพื่อสร้างระบบวินิจฉัยโรคจากผลตรวจเลือด โดยผสมผสานหลักการของโครงข่ายประสาทเทียมกับฟัซซีโลจิกเข้าด้วยกัน ผลการวิจัยพบว่า ผลวินิจฉัยโรคจากผลการตรวจเลือดมีความแม่นยำสูง Tavakoli, Sharifara and Najafi (2020) ประยุกต์ใช้ ANFIS ร่วมกับ ANN (โครงข่ายประสาทเทียม) เพื่อประเมินอายุการใช้งานของระบบท่อจ่ายน้ำในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยนำเข้าข้อมูลปัจจัยด้านต่างๆ ที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ ผลจากการวิจัยพบว่า แบบจำลองมีความแม่นยำและสามารถใช้ในการทำนายอายุการใช้งานของท่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีดำเนินการวิจัย

การเก็บรวบรวมข้อมูล

ทำการรวบรวมข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีเจาะและระเบิด โดยทั่วไปแล้วจะมีลักษณะการทำงานที่เป็นวงรอบ ดังภาพที่ 4 (Pawan and Rujirayanyong, 2019) จากนั้น จัดทำโครงสร้างการจัดแบ่งงาน (WBS) ของการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีเจาะและระเบิด ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 4 วงรอบทั่วไปของการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีเจาะและระเบิด

ตารางที่ 1 โครงสร้างการจัดแบ่งงาน (WBS) ของการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีเจาะและระเบิด

WBS	สัญลักษณ์	รายการ	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	กิจกรรมก่อนหน้า
1	A	การเจาะและระเบิด	6	-
2	B	สกัดหินและขนย้าย	6	A
3	C	การทำแผนที่	3	B
4	D	สำรวจและตรวจสอบพิกัด	2	B
5	E	ติดตั้งเหล็กค้ำยันเพิ่มเติม	2	C, D
6	F	ติดตั้งตะแกรงเหล็กและพ่นคอนกรีตเคลือบชั้นที่ 1	3	E
7	G	ติดตั้งตะแกรงเหล็กและพ่นคอนกรีตเคลือบชั้นที่ 2	3	F
8	H	ฝังเหล็กยึดหินและติดตั้งท่อระบาย	1	G

การระบุความเสี่ยง (Risk Identification: RI)

การระบุความเสี่ยง ทำให้ผู้วางแผนงานมีความเข้าใจว่ากิจกรรมใดมีความเสี่ยงมากเป็นพิเศษ จำเป็นที่จะต้องพิจารณาอย่างถี่ถ้วนและเป็นระบบ โดยแยกเป็นโครงสร้างคล้ายกับ WBS ลงในกิจกรรมนั้น เรียกว่า โครงสร้าง

การจัดแบ่งความเสี่ยง (Risk Breakdown Structure: RBS) โดยแบ่งเป็น เหตุการณ์ความเสี่ยง (Risk Event) และ ปัจจัยเสี่ยง (Risk Factor) ที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ความเสี่ยงนั้น สำหรับโครงการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีเจาะและระเบิด สามารถเขียน RBS ได้ดังตารางที่ 2 นอกจากนี้ ได้จัดทำเกณฑ์ชี้วัดปัจจัยเสี่ยง โดยใช้ตัวอย่างเหตุการณ์ความเสี่ยง “น้ำท่วมพื้นที่ก่อสร้าง” ซึ่งประกอบด้วย 3 ปัจจัยเสี่ยง คือ ประสิทธิภาพในการระบายน้ำ ปริมาณน้ำใต้ดิน และอัตราการไหลซึมของน้ำใต้ดิน เพื่อช่วยในการประเมินระดับในการเกิดปัจจัยเสี่ยงในด้านต่างๆ ดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการกำหนดโครงสร้างการจัดแบ่งความเสี่ยง (RBS) ด้วยวิธีเจาะและระเบิด

RBS: Risk Breakdown Structure		โครงการก่อสร้างอุโมงค์ ด้วยวิธีเจาะและระเบิด		
เหตุการณ์ความเสี่ยง (Risk Event)	ปัจจัยเสี่ยง (Risk Factor)	ระดับความเสี่ยง		
		1	2	3
R1. น้ำท่วมพื้นที่ก่อสร้าง	R1F1. ประสิทธิภาพในการระบายน้ำ	มาก	ปานกลาง	น้อย
	R1F2. ปริมาณน้ำใต้ดิน	น้อย	ปานกลาง	มาก
	R1F3. อัตราการไหลซึมของน้ำใต้ดิน	น้อย	ปานกลาง	มาก
R2. ชั้นดินหรือหินเกิดการเคลื่อนตัว	R2F1. การสั่นสะเทือนจากการทำงาน	น้อย	ปานกลาง	มาก
	R2F2. ความแข็งแรงของระบบค้ำยัน	มาก	ปานกลาง	น้อย
	R2F3. เกิดเหตุการณ์ไม่คาดคิด	น้อย	ปานกลาง	มาก
R3. เครื่องมือเกิดความเสียหาย	R3F1. ประสิทธิภาพและความชำนาญ	น้อย	ปานกลาง	มาก
	R3F2. การบำรุงและซ่อมแซม	มาก	ปานกลาง	น้อย
	R3F3. สมรรถนะของเครื่องมือ	มาก	ปานกลาง	น้อย
R4. การร้องเรียนจากชุมชนใกล้เคียง	R4F1. มลภาวะทางเสียง	น้อย	ปานกลาง	มาก
	R4F2. มลภาวะทางอากาศ	น้อย	ปานกลาง	มาก
	R4F3. การรบกวนจากคนงาน	น้อย	ปานกลาง	มาก
R5. ผลกระทบด้านเศรษฐกิจ	R5F1. ขาดแคลนแรงงาน	น้อย	ปานกลาง	มาก
	R5F2. ขาดสภาพคล่อง	น้อย	ปานกลาง	มาก
	R5F3. ความไม่มั่นคงทางเศรษฐกิจ	น้อย	ปานกลาง	มาก
R6. ความล่าช้าของงานสำรวจ	R6F1. ความผิดพลาดจากอุปกรณ์	น้อย	ปานกลาง	มาก
	R6F2. ประสิทธิภาพของชุดสำรวจ	มาก	ปานกลาง	น้อย
	R6F3. ขาดการติดต่อสื่อสารที่ดี	น้อย	ปานกลาง	มาก

ตารางที่ 3 เกณฑ์ชี้วัดปัจจัย “ประสิทธิภาพในการระบายน้ำ”

เกณฑ์ชี้วัด	ประสิทธิภาพ ในการระบายน้ำ	ความหมาย
1	มาก	ประสิทธิภาพในการระบายน้ำได้มากจะส่งผลให้โอกาสที่น้ำจะท่วมพื้นที่ก่อสร้างได้น้อย
2	ปานกลาง	ประสิทธิภาพในการระบายน้ำได้ปานกลางจะส่งผลให้โอกาสที่น้ำจะท่วมพื้นที่ก่อสร้างได้ปานกลาง
3	น้อย	ประสิทธิภาพในการระบายน้ำได้น้อยจะส่งผลให้โอกาสที่น้ำจะท่วมพื้นที่ก่อสร้างได้มาก

ตารางที่ 4 เกณฑ์ชี้วัดปัจจัย “ปริมาณน้ำใต้ดิน”

เกณฑ์ชี้วัด	ปริมาณน้ำใต้ดิน	ความหมาย
1	น้อย	ปริมาณน้ำใต้ดินมีน้อยจะส่งผลให้โอกาสที่น้ำจะท่วมพื้นที่ก่อสร้างได้น้อย
2	ปานกลาง	ปริมาณน้ำใต้ดินมีปานกลางจะส่งผลให้โอกาสที่น้ำจะท่วมพื้นที่ก่อสร้างได้ปานกลาง
3	มาก	ปริมาณน้ำใต้ดินมีมากจะส่งผลให้โอกาสที่น้ำจะท่วมพื้นที่ก่อสร้างได้มาก

ตารางที่ 5 เกณฑ์ชี้วัดปัจจัย “อัตราการไหลซึมของน้ำใต้ดิน”

เกณฑ์ชี้วัด	อัตราการไหลซึมของน้ำใต้ดิน	ความหมาย
1	น้อย	อัตราการไหลซึมของน้ำใต้ดินน้อยจะส่งผลให้โอกาสที่น้ำจะท่วมพื้นที่ก่อสร้างได้น้อย
2	ปานกลาง	อัตราการไหลซึมของน้ำใต้ดินปานกลางจะส่งผลให้โอกาสที่น้ำจะท่วมพื้นที่ก่อสร้างได้ปานกลาง
3	มาก	อัตราการไหลซึมของน้ำใต้ดินมากจะส่งผลให้โอกาสที่น้ำจะท่วมพื้นที่ก่อสร้างได้มาก

การวิเคราะห์ความเสี่ยง (Risk Analysis)

กำหนดรูปแบบสถานการณ์การเกิดเหตุการณ์ความเสี่ยง เพื่อสอบถามความคิดเห็นผู้เชี่ยวชาญ ที่เป็นผู้ควบคุมงานก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีเจาะและระเบิด จำนวน 5 ท่าน เกี่ยวกับความเป็นไปได้ที่จะเกิดเหตุการณ์ความเสี่ยงในแต่ละสถานการณ์ ตัวอย่างการประเมินความน่าจะเป็นเกี่ยวกับความเสี่ยง “น้ำท่วมพื้นที่ก่อสร้าง” จำนวน 9 สถานการณ์ของผู้เชี่ยวชาญท่านที่ 1 ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ตัวอย่างการกำหนดสถานการณ์ที่จะเกิดเหตุการณ์ความเสี่ยง “น้ำท่วมพื้นที่ก่อสร้าง”

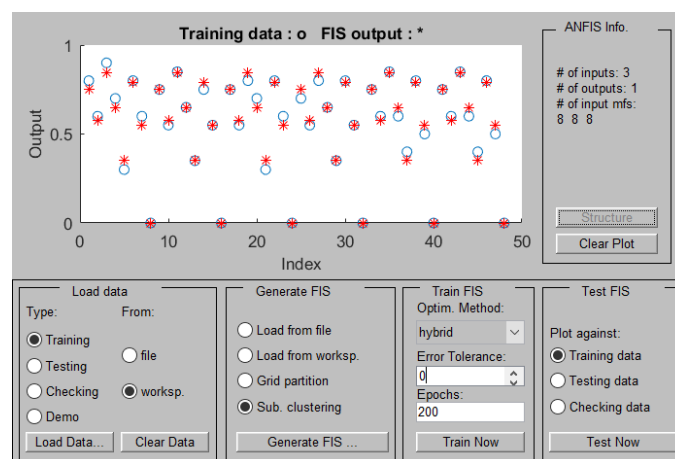
ผู้เชี่ยวชาญคนที่ 1	สถานการณ์	เหตุการณ์ความเสี่ยงเกี่ยวกับน้ำท่วมพื้นที่ก่อสร้าง								ความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญเกี่ยวกับน้ำท่วมพื้นที่ที่ก่อสร้าง
		ระดับปัจจัยเสี่ยง								
		ประสิทธิภาพในการระบายน้ำ			ปริมาณน้ำใต้ดิน			อัตราการไหลซึมของน้ำใต้ดิน		
		น้อย	ปานกลาง	มาก	มาก	ปานกลาง	น้อย	มาก	ปานกลาง	
		3	2	1	3	2	1	3	2	1
1	✓			✓			✓			1.00
2	✓				✓			✓		0.75
3	✓						✓		✓	0.55
4		✓		✓			✓			0.80
5		✓			✓			✓		0.65
6		✓					✓		✓	0.35
7			✓	✓			✓			0.80
8			✓		✓			✓		0.55
9			✓				✓		✓	0.00

พัฒนาแบบจำลองจากระบบ ANFIS

การพัฒนาโมเดลด้วยระบบ ANFIS โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ชุด คือ ชุด A, B, และ C และแต่ละชุดข้อมูลจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งสำหรับการเรียนรู้ (Training data) และส่วนที่สองสำหรับการทดสอบ (Testing data) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม MATLAB R2016b ช่วยในการพัฒนาโมเดล ภาพที่ 5 แสดงตัวอย่างการนำข้อมูลชุด A ไปฝึกฝน เพื่อพัฒนาโมเดล โดยอาศัยหลักการ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) ซึ่งใช้อัตราการเรียนรู้ ต่อ การทดสอบ เท่ากับ 90 ต่อ 10 (90/10) (Nontarungsee and Pawan, 2016) ดังนั้นจากการประเมินความเสี่ยง “น้ำท่วมพื้นที่ก่อสร้าง” จำนวนทั้งสิ้น 45 ข้อมูล แบ่งเป็นข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ 40 ข้อมูล (90%) และทดสอบ 5 ข้อมูล (10%) มีขั้นตอนดังนี้

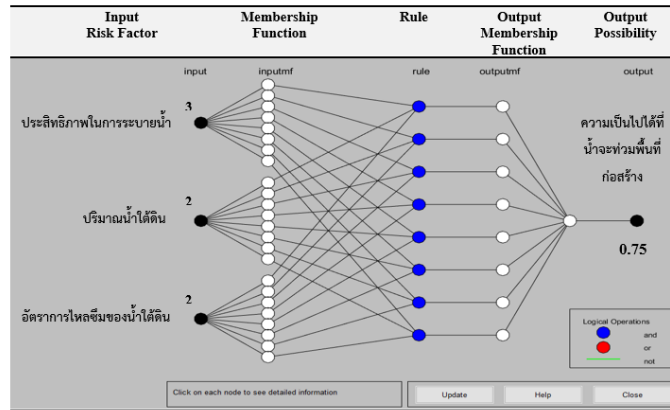
1. นำเข้าข้อมูลชุด A เพื่อฝึกฝน

- โหลดข้อมูลสำหรับการฝึกฝน (Training data)
- กำหนดจำนวนรูปแบบฟังก์ชันสมาชิกและหากกฎฟuzzy เริ่มต้น การหาตัวแบบที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้จะก่อกำเนิด (Generate) ชุดข้อมูลด้วยวิธีการจัดกลุ่มแบบลบออก (Subtractive Clustering) เรียนรู้ จำนวน 200 รอบ เพื่อฝึกฝนให้ตัวแบบเรียนรู้โดยพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของโมเดลจนลู่เข้าค่าคงที่
- โหลดข้อมูลสำหรับการทดสอบ (Testing data) มาใช้ในการทดสอบการเรียนรู้

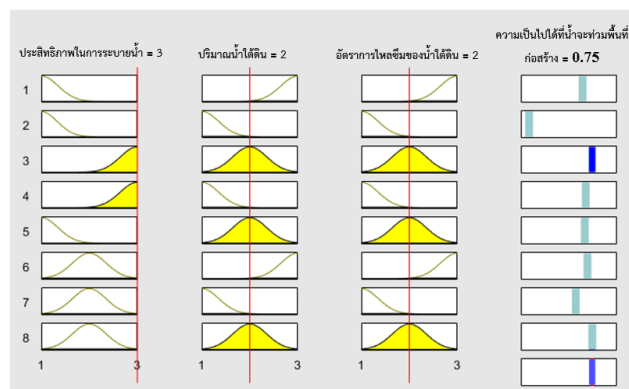


ภาพที่ 5 การนำเข้าข้อมูลเพื่อฝึกฝนในระบบ ANFIS

ผลลัพธ์การนำเข้าข้อมูลจากการเรียนรู้ ในระบบ ANFIS เมื่อครบจำนวนรอบที่กำหนดจะได้โครงสร้างแบบจำลอง ดังภาพที่ 6 นอกเหนือจากผลลัพธ์ที่แสดงออกมาเป็นโครงสร้างโมเดลแล้ว ANFIS ยังสามารถแสดงผลออกมาเป็นกฎ (Rule) ที่เหมาะสมโดยใช้ Rule Viewer ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 6 ตัวอย่างโครงสร้างแบบจำลองการทำนายการเกิดเหตุการณ์ความเสี่ยง “น้ำท่วมพื้นที่ก่อสร้าง”



ภาพที่ 7 ตัวอย่างการทดสอบข้อมูลโดยใช้ Rule Viewer

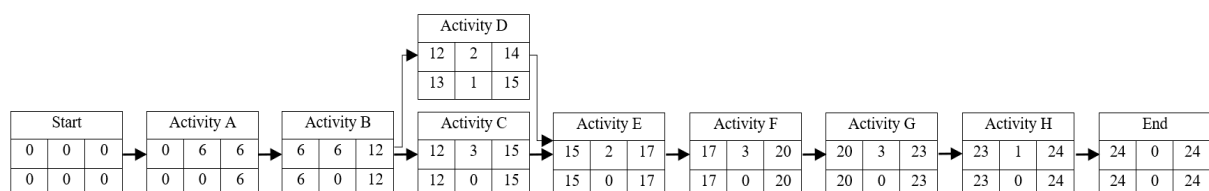
2. การเลือกโมเดลที่ดีที่สุด คือ การตรวจสอบว่าโมเดลชุดใดมีความแม่นยำและเหมาะสมในการนำมาใช้ โดยพิจารณาจากค่า RMSE ที่น้อยที่สุด สำหรับข้อมูลที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้อง จำนวน 5 ข้อมูล (10%) เป็นชุดข้อมูลที่ไม่ได้นำไปใช้ในการพัฒนาโมเดล แต่จะเป็นชุดข้อมูลที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำ ผลจากการตรวจสอบความแม่นยำของชุดข้อมูล A, B และ C ดังตารางที่ 7 พบว่า ข้อมูลชุด B มีค่า RMSE ต่ำที่สุด คือ 0.0374 จึงเหมาะสมในการนำชุดข้อมูลนี้มาใช้ในการทำนายหาค่าความเป็นไปได้จากเหตุการณ์ความเสี่ยง

ตารางที่ 7 ตรวจสอบความแม่นยำของชุดข้อมูล A, B และ C

		Data Set		
		A	B	C
Test scenario No.1	Data scenario	1	4	8
	Expert (prob)	1.00	0.80	0.55
	ANFIS (prob)	0.92	0.84	0.55
	APE (%)	8.00	5.00	0.00
Test scenario No.2	Data scenario	10	13	17
	Expert (prob)	0.90	0.85	0.55
	ANFIS (prob)	0.92	0.84	0.55
	APE (%)	2.22	1.18	0.00
Test scenario No.3	Data scenario	19	22	26
	Expert (prob)	0.95	0.80	0.60
	ANFIS (prob)	0.92	0.84	0.55
	APE (%)	3.16	5.00	8.33
Test scenario No.4	Data scenario	28	31	35
	Expert (prob)	1.00	0.90	0.60
	ANFIS (prob)	0.92	0.84	0.55
	APE (%)	8.00	6.67	8.33
Test scenario No.5	Data scenario	37	40	44
	Expert (prob)	1.00	0.85	0.50
	ANFIS (prob)	0.92	0.84	0.55
	APE (%)	8.00	1.18	10.00
RMSE		0.0640	0.0374	0.0387

ผลการวิจัย

หลังจากที่ได้ทำการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การประยุกต์ใช้แบบจำลอง ANFIS ที่พัฒนาขึ้นมากับโครงการก่อสร้างจริง ในโครงการก่อสร้างอุโมงค์ ADIT 1 ด้วยวิธีเจาะและระเบิดระยะทาง 320 เมตร โดยจัดทำแผนกำหนดเวลาเป็นแบบ สายงานวิกฤต (CPM) กิจกรรม A, B, C, E, F, G และ H เป็นกิจกรรมที่อยู่บนสายงานวิกฤต มีระยะเวลาปฏิบัติงานเป็นวงรอบ 24 ชั่วโมง ในขณะที่กิจกรรม D ไม่ได้อยู่บนสายงานวิกฤตและมีเวลาลอยตัว (Float) 1 ชั่วโมง ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แผนกำหนดเวลาการก่อสร้างอุโมงค์ ADIT 1

การวิเคราะห์และการประเมินความเสี่ยงของผู้เชี่ยวชาญ จากสภาพแวดล้อมและสภาพทางธรณีวิทยาที่หน้างานก่อสร้าง พบว่า กิจกรรมที่มีความเสี่ยงประกอบด้วย กิจกรรมที่ 1 คือ การเจาะและระเบิด (A) มีเหตุการณ์ความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น คือ น้ำท่วมพื้นที่ก่อสร้าง (R1) และชั้นดินหรือหินเกิดการเคลื่อนตัว (R2) กิจกรรมที่ 2 คือ สักรวจและตรวจสอบพิกัด (D) มีเหตุการณ์ความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นคือ ความคลาดเคลื่อนของงานสำรวจ (R6) จากนั้นทำการประเมินระดับปัจจัยเสี่ยงกรณีต่างๆ นำเข้าข้อมูลในระบบ ANFIS ได้ค่าความเป็นไปได้ของเหตุการณ์ความเสี่ยง ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าความเป็นไปได้ของเหตุการณ์ความเสี่ยงโดยแบบจำลอง ANFIS

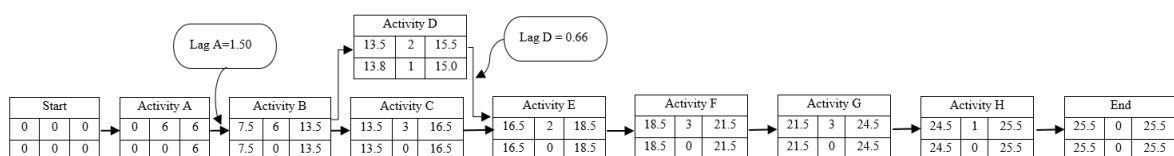
กิจกรรม (Activity)	เหตุการณ์ความเสี่ยง (Risk Event)	ปัจจัยเสี่ยง (Risk Factor)	ระดับ ปัจจัยเสี่ยง	ความเป็นไปได้ของ เหตุการณ์ความเสี่ยง โดย ANFIS
(A) การเจาะและระเบิด	(R1) น้ำท่วมพื้นที่ก่อสร้าง	R1F1. ประสิทธิภาพ ในการระบายน้ำ	2	0.75
		R1F2. ปริมาณ น้ำใต้ดิน	3	
		R1F3. อัตราการไหล ซึมของน้ำใต้ดิน	2	
	(R2) ชั้นดินหรือหิน เกิดการเคลื่อนตัว	R2F1. การสั่น สะเทือนจาก การทำงาน	3	0.58
		R2F2. ความแข็งแรง ของระบบค้ำยัน	1	
		R2F3. เกิดเหตุการณ์ ไม่คาดคิด	1	
(D) สำรวจและ ตรวจสอบพิกัด	(R6) ความล่าช้า ของงานสำรวจ	R6F1. ความผิดพลาด จากอุปกรณ์	1	0.55
		R6F2. ประสิทธิภาพ ของชุดสำรวจ	2	
		R6F3. ขาดการ ติดต่อสื่อสารที่ดี	2	

ตารางที่ 9 การหาค่าเวลารอคอยจากเหตุการณ์ความเสี่ยง

กิจกรรม	เหตุการณ์ ความเสี่ยง	ระยะเวลาปกติ (ชั่วโมง)	ความเป็นไปได้ ของเหตุการณ์ (Probability)	ระยะเวลาสำรอง จากผู้เชี่ยวชาญ (Impact) (ชั่วโมง)	เวลารอคอยจาก ความเสี่ยง $Risk = Prob. \times$ Impact (ชั่วโมง)
(A) การเจาะ และระเบิด	(R1) น้ำท่วมพื้นที่ ก่อสร้าง	6	0.75	2.0	1.50
	(R2) ชั้นดินหรือ หินเกิดการ เคลื่อนตัว	6	0.58	2.0	1.16
(D) สำรวจและ ตรวจสอบพิกัด	(R6) ความล่าช้า ของงานสำรวจ	2	0.55	1.2	0.66

จากตารางที่ 9 เมื่อพิจารณากิจกรรม A พบว่ามีเหตุการณ์ความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น 2 เหตุการณ์ คือ R1 และ R2 กรณีที่มีเหตุการณ์ความเสี่ยงมากกว่าหนึ่งเหตุการณ์เกิดขึ้นในกิจกรรมเดียวกัน เวลารอคอยจากความเสี่ยงที่จะเพิ่มเข้าไปในกิจกรรม จะเลือกจากเหตุการณ์ความเสี่ยงที่มีค่ามากที่สุด เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วในกิจกรรมเดียวกัน เหตุการณ์ความเสี่ยงจะเกิดขึ้นทีละเหตุการณ์ หรือถ้าเกิดมากกว่าหนึ่งเหตุการณ์ก็มักจะเกิดในลักษณะคู่ขนานกันไป ดังนั้น การเลือกเวลารอคอยที่มากที่สุดก็จะครอบคลุมเวลารอคอยของเหตุการณ์อื่นในกิจกรรมเดียวกันด้วย จากตารางพบว่า เวลารอคอยที่มากที่สุดจากเหตุการณ์ความเสี่ยงของกิจกรรม A มีค่าเท่ากับ 1.50 ชั่วโมง ในส่วนของกิจกรรม D มีเหตุการณ์ความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น 1 เหตุการณ์ คือ R6 ดังนั้นจึงมีเวลารอคอยที่รวมความเสี่ยงแล้ว เท่ากับ 0.66 ชั่วโมง

เมื่อได้เวลารอคอยที่รวมความเสี่ยงจากกิจกรรม A และ D ทำการคำนวณระยะเวลาทั้งหมดของโครงการอีกครั้ง จากผลการคำนวณระยะเวลาของโครงการที่รวมเวลารอคอยจากความเสี่ยงแล้ว พบว่า ระยะเวลาของโครงการทั้งหมดในหนึ่งวงรอบการทำงานเท่ากับ 25.50 ชั่วโมง ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ระยะเวลาของโครงการเมื่อรวมเวลารอคอยจากความเสี่ยง

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบระยะเวลาการวางแผนงานแบบ CPM แบบ ANFIS และระยะเวลาก่อสร้างจริง

แผนงานในการก่อสร้างอุโมงค์ ADIT 1 ด้วยวิธีเจาะและระเบิด (ความยาว 320 เมตร)	ระยะเวลาการก่อสร้างต่อ หนึ่งวงรอบการทำงาน		ระยะเวลาการก่อสร้าง ทั้งหมด (วัน)
	(ชั่วโมง)	(วัน)	
ระยะเวลาเมื่อวางแผนด้วย CPM (ปกติ)	24.00	1.00	122
ระยะเวลาเมื่อวางแผนด้วย ANFIS (รวมความเสี่ยง)	25.50	1.07	172
ระยะเวลาก่อสร้างจริง	-	-	175

จากตารางที่ 10 แผนงานในการก่อสร้างอุโมงค์ ADIT 1 ระยะทาง 320 เมตร ด้วยวิธีการเจาะและระเบิด ผลการเก็บข้อมูลของชุดสำรวจพบว่า อัตราการเจาะอุโมงค์โดยเฉลี่ย เท่ากับ 2 เมตรต่อวงรอบของการทำงาน เมื่อวางแผนด้วยวิธี CPM (ไม่รวมความเสี่ยง) จะได้ระยะเวลารวมของโครงการเท่ากับ 122 วัน ด้วยอัตราการทำงาน 1 วันต่อวงรอบการทำงาน แต่เมื่อพิจารณาระยะเวลาก่อสร้างที่เกิดขึ้นจริงมีค่าเท่ากับ 175 วัน ซึ่งมีค่าความแตกต่างจากที่วางแผนไว้ถึง 53 วัน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการปรับวิธีการวางแผนใหม่โดยใช้แบบจำลอง ANFIS และรวมเวลารอคอยที่เกิดจากความเสี่ยง เพื่อคำนวณหาเวลาสำรองของโครงการ พบว่า ได้ระยะเวลารวมของโครงการเท่ากับ 172 วัน ด้วยอัตราการทำงาน 1.07 วันต่อวงรอบการทำงาน ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับเวลาการก่อสร้างที่เกิดขึ้นจริง ดังนั้น การนำแบบจำลอง ANFIS เข้ามาช่วยในการวางแผนงานกิจกรรมที่มีความเสี่ยง ทำให้ได้ระยะเวลาของโครงการมีความใกล้เคียงกับการปฏิบัติงานจริง และถือเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสำหรับการวางแผนงานโครงการก่อสร้าง

อภิปรายผล

ผลการศึกษาสรุปได้ว่า การก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีการเจาะและระเบิด เป็นงานที่มีความเสี่ยงสูง ผู้วางแผนงานควรที่จะนำความเสี่ยงเข้ามาพิจารณาร่วมกับการวางแผนงานแบบปกติ ด้วยการเผื่อเวลาสำรองในรูปแบบของเวลารอคอยที่พิจารณาจากเหตุการณ์ความเสี่ยงและปัจจัยเสี่ยง จากการศึกษาในครั้งนี้ สามารถนำแบบจำลอง ANFIS มาประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างอุโมงค์ด้วยวิธีเจาะและระเบิด ได้อย่างเป็นระบบและมีประสิทธิภาพ ทำให้ระยะเวลาของแผนงานโครงการก่อสร้างมีความใกล้เคียงกับการปฏิบัติงานจริง

ข้อเสนอแนะ

โครงการก่อสร้างโดยส่วนใหญ่มักจะเผชิญกับความเสี่ยงที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของการปฏิบัติงาน และปัจจัยหลายอย่าง ดังนั้น ในการปฏิบัติงานจริง จะต้องอาศัยทั้งหลักวิชาการและประสบการณ์ส่วนตัวของผู้วางแผนงาน ในการที่จะกำหนดเหตุการณ์ความเสี่ยงและปัจจัยเสี่ยงได้อย่างรอบคอบ

ในการศึกษาครั้งนี้ มุ่งเน้นไปที่การรวบรวมข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญที่ชำนาญการควบคุมที่หน้างานก่อสร้าง สำหรับการวิจัยในอนาคต ควรที่จะเพิ่มเติมข้อมูลจากส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ผู้ควบคุมงาน ผู้บริหารโครงการ ผู้รับเหมา ผู้ออกแบบ และเจ้าของโครงการ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- Ebrat, M. and Ghodsi, R. (2011). Risk Assessment of Construction Projects using Network based Adaptive Fuzzy System. *International Journal of Academic Research*, 3, 411-417.
- Kaewprasert, R. and Mungsing, S. (2015). Semantic Decision Making based on Adaptive Neuro-Fuzzy Rules for Blood Diagnosis. *Sripatum Review of Science and Technology*, 7, 47-60. (in Thai)
- Nontarungsee, S. and Pawan, P. (2016). Application of ANFIS for Evaluating the Strength of the Concrete Road During Construction. *Sripatum Review of Science and Technology*, 8, 79-87. (in Thai)
- Pawan, P. and Rujirayanyong, T. (2019). Contingency Estimation based on Risk Events of Tunnel Construction: Case study Nam Theun 1 Hydropower Project. *The Proceedings of the 4th RSU International Research Conference*, 26 April 2019 at RSU, 364-374.
- Pookayaporn, S., Pawan, P. and Yomnak, T. (2015). Application of Expert Systems for Selecting Wall Systems. *Sripatum Review of Science and Technology*, 7, 61-69. (in Thai)
- Promsiri, A. and Pawan, P. (2018). Lag Time in Project Scheduling Network with respect to Risk event of Weir Construction. *Sripatum Review of Science and Technology*, 10, 198-210. (in Thai)
- Song Da 9 Join Stock Company. (2016). *NAM THEUN 1 Hydropower Plant*. [Online]. Retrieved March 15, 2020, from: <http://www.songda9.com/nam-theun-1-hydropower-plant-27834>.
- Tavakoli, R., Sharifara, A. and Najafi, M. (2020). Artificial Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy Models to Predict Remaining Useful Life of Water Pipelines. *The Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2020*, 17-21 May 2020 at Henderson, Nevada, 191-204.
- Zhang, Z., Ding, D., Rao, L. and Bi, Z. (2006). An ANFIS Based Approach for Predicting the Ultimate Bearing Capacity of Single Piles. *The Proceedings of GeoShanghai International Conference 2006*, 6-8 June 2006 at Shanghai, China, 159-166.