การจัดลำดับความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์โดยใช้วิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์แบบผสมผสาน

Prioritizing Risks of Underground Tunnel Construction with Tunnel Boring Machine Using Hybrid Multiple Criteria Decision-Making Approach

นิธิเดช คูหาทองสัมฤทธิ์[1*] วาสนา จันทร์ขำ[1] และ สุชาติ หัตถ์สุวรรณ[2]

Nitidetch Koohathongsumrit[1*] Wasana Chankham[1] and Suchart Hutsuwan[2]

[1]ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

[1]Department of Statistics, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University

[2]Program in Industrial Management Technology, Faculty of Science and Technology, Dhonburi Rajabhat University

*E-mail: Nitidetch.k@rumail.ru.ac.th

Received: 05 Aug, 2021

Revised: 31 Oct, 2021

Accepted: 11 Nov, 2021

บทคัดย่อ

การศึกษานี้นำเสนอวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์แบบผสมผสานในการจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์ วิธีการที่เสนอประกอบไปด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) และวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution: TOPSIS) โดย AHP ถูกนำมาใช้ในการกำหนดน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจโดยการเปรียบเทียบเกณฑ์การตัดสินใจและความเสี่ยงเป็นรายคู่ ในขณะที่ TOPSIS ถูกนำมาใช้เพื่อจัดลำดับความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์ โดยลำดับความเสี่ยงพิจารณาด้วยการเรียงลำดับค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้แนวคิดอุดมคติจากค่ามากไปหาน้อย สุดท้ายประยุกต์วิธีการที่เสนอในการจัดลำดับความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์ในโครงการรถไฟฟ้าสายสีส้มส่วนตะวันออก ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่เสนอสามารถเรียงลำดับความเสี่ยงได้อย่างมีเหตุผลจากค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้แนวคิดอุดมคติซึ่งคำนวณได้จากน้ำหนักความสำคัญขององค์ประกอบในการตัดสินใจทั้งหมด ประโยชน์จากการศึกษานี้เป็นแนวทางวางแผนป้องกันเหตุการณ์อันไม่พึงประสงค์ของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์โดยพิจารณาความเสี่ยงที่มีความสำคัญสูงสุดก่อน

คำสำคัญ: การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ ความเสี่ยง การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ วิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ

Abstract

This study proposed a hybrid multiple criteria decision-making approach for prioritizing risks of underground tunnel construction with a tunnel boring machine (TBM). The proposed approach consisted of analytic hierarchy process (AHP) and technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS). The AHP was employed to determine weights of decision criteria by pairwise comparisons of decision criteria and risks while the TOPSIS was used to prioritize risks of underground construction with TBM. Ranks of the risks were considered by sorting the closeness coefficients in descending order. Finally, the proposed approach was applied to rank risks of underground tunnel construction with TBM in the mass rapid-transit (MRT) orange line project for the east section. The result demonstrated that the proposed approach could rationally prioritize risks by the closeness coefficients, which were calculated by the weights of all the decision-making elements. The benefits of this study are the guidelines to prevent undesired events of the underground tunnel constructions with TBM by considering the most important risks.

Keywords: Multiple criteria decision-making, Risk, Underground tunnel construction, Analytic hierarchy process, Technique for order of preference by similarity to ideal solution

1. บทนำ

การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ในเขตเมืองเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถการพัฒนาประเทศให้สามารถรองรับการขยายตัวทางเศรษฐกิจ ยกระดับสาธารณูปโภคในประเทศ และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงทางสังคมในหลายมิติ โดยการก่อสร้างใต้ดินและอุโมงค์เป็นโครงการหนึ่งที่ช่วยให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่กล่าวมาในข้างต้น อันเนื่องมาจากข้อจำกัดบนพื้นดินที่มีจำนวนมาก เช่น การเวนคืนที่ดิน ปัญหาทางด้านจราจร ความขัดแย้งของมวลชน ทัศนียภาพ ฯลฯ [1] สอดคล้องกับนโยบายของภาครัฐที่มีการอนุมัติโครงการที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินเป็นจำนวนมาก เช่น โครงการก่อสร้างอุโมงค์สำหรับรถไฟฟ้าใต้ดิน โครงการก่อสร้างอุโมงค์ในงานเขื่อน โครงการก่อสร้างอุโมงค์ส่งน้ำ เป็นต้น ทั้งนี้การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินสำหรับรถไฟฟ้านั้นเป็นโครงการหนึ่งที่กำลังดำเนินการในปัจจุบัน มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มระดับศักยภาพการคมนาคมสาธารณะ ลดอัตราการเกิดอุบัติเหตุ แก้ปัญหาความแออัดการจราจร และลดภาระค่าครองชีพของประชาชน [2]

การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินเป็นกิจกรรมที่สำคัญอย่างหนึ่งในการก่อสร้างแนวเส้นทางรถไฟฟ้าที่เป็นโครงสร้างใต้ดินด้วยการใช้เครื่องเจาะอุโมงค์ (Tunnel Boring Machine: TBM) ในการดำเนินการ เนื่องจากเครื่องจักรดังกล่าวสร้างความเสียหายให้แก่อุโมงค์น้อยมากเมื่อเทียบกับการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินแบบดั้งเดิม เหมาะสมกับการทำงานในทุกสภาพทางธรณีวิทยา มีความปลอดภัยสูง ลำเลียงดินด้วยระบบสายพานลำเลียงส่งมายังขบวนรถบรรทุกดินเพื่อนำไปทิ้งนอกอุโมงค์ ประหยัดระยะเวลาก่อสร้าง และลดปริมาณการขุดเจาะดิน [3] อย่างไรก็ตามการใช้งานเครื่องเจาะอุโมงค์ยังมีข้อจำกัดไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนย้ายเครื่องเจาะอุโมงค์ การเปลี่ยนหัวเจาะ และมีค่าใช้จ่ายสูง [4] นอกจากนี้การก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยการใช้งานเครื่องเจาะอุโมงค์ยังมีความเสี่ยงหรือเหตุการณ์ไม่คาดคิดที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทำงานภายใต้ความไม่แน่นอนเป็นจำนวนมาก เช่น ความเสี่ยงทางธรณีวิทยา ความเสี่ยงจากเครื่องจักร ความเสี่ยงจากการบริหารงานก่อสร้าง หรือความเสี่ยงจากปัจจัยด้านอื่น ๆ [5] โดยความเสี่ยงเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อความสำเร็จของโครงการ การส่งมอบของโครงการ และความปลอดภัยของแรงงาน ดังนั้นจำเป็นต้องมีวิธีการ หรือเทคนิคที่ใช้ในการจัดลำดับความสำคัญของเหตุการณ์ความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์ เพื่อกำหนดมาตรการในการรองรับความเสี่ยงที่มีความสำคัญมากที่สุดก่อน รวมถึงป้องกันไม่ให้เกิดอุบัติเหตุขึ้น ปกป้องการปฏิบัติงาน หลีกเลี่ยงการดำเนินงานในสถานการณ์ที่มีความเสี่ยงสูง และสร้างโอกาสการเป็นส่วนหนึ่งของการบริหารงาน

มีงานวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษาการจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์และประเด็นที่เกี่ยวข้องโดยใช้วิธีการต่าง ๆ ซึ่งอาศัยข้อมูลในอดีต เช่น งานวิจัยของ Moradi และ Farsangi [6] ที่ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ความเสี่ยงทางด้านธรณีวิทยาและตัวแบบการทำนายอัตราการเกิดความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินในประเทศอิหร่าน งานวิจัยของ Yazdani-Chamzini [7] ที่ได้ประเมินความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินในประเทศอิหร่าน โดยใช้วิธีการประเมินความเสี่ยงและระบบอนุมานตรรกศาสตร์คลุมเครือในการคำนวณระดับความเสี่ยงด้วยการประเมินผ่านตัวแปรภาษาและชุดตัวเลขแบบคลุมเครือของค่าความน่าจะเป็นและระดับของผลกระทบของความเสี่ยง งานวิจัยของ Hyun และคณะ [8] ที่ได้ศึกษาการจัดลำดับความสำคัญการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินสำหรับรถไฟฟ้าในกรุงโซล สาธารณรัฐเกาหลี โดยใช้การวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว (Fault Tree Analysis: FTA) ในการคำนวณค่าความน่าจะเป็นของการเกิดความเสี่ยงและกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process: AHP) ใช้สำหรับการคำนวณผลกระทบที่ตามมา งานวิจัยของ Chung และคณะ [9] ที่พัฒนาตัวแบบการประเมินความเสี่ยงในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินโดยใช้เครือข่ายแบบเบย์ โดยพิจารณาความเสี่ยงทางด้านธรณีวิทยา ความเสี่ยงทางด้านการออกแบบ และความเสี่ยงทางด้านการก่อสร้าง งานวิจัยของ Liu, Zhai และ Liu [10] ที่นำเสนอตัวแบบในการทำนายความเสี่ยงแบบผสมผสานของงานก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินในสาธารณรัฐประชาชนจีน โดยตัวแบบได้รวมวิธีการวิเคราะห์แบบโบว์ไท (Bow-Tie Analysis) และแนวคิดของตรรกศาสตร์คลุมเครือเข้าไว้ด้วยกัน งานวิจัยของ Chung และคณะ [11] ที่ทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์เหตุการณ์ความเสี่ยงในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ และโครงข่ายแบบเบย์พร้อมทั้งนำเสนอตัวแบบในการวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงสาเหตุซึ่งเป็นตัวแบบที่มีประสิทธิภาพในการกำหนดระดับความเสี่ยงที่มีความสมเหตุผลมากขึ้น งานวิจัยของ Sharafat, Latif และ Seo [12] ที่ได้ศึกษาการประเมินความเสี่ยงของการใช้เครื่องเจาะอุโมงค์สำหรับพื้นดินที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการทำงานด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบโบว์ไท ซึ่งการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลวและการวิเคราะห์เหตุการณ์ด้วยแผนภูมิต้นไม้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าความน่าจะเป็นและผลกระทบ

เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของข้อมูลและความเสี่ยงอาจมีโอกาสเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาถึงแม้จะไม่เคยเกิดความเสี่ยงในอดีตก็ตาม จึงมีงานวิจัยที่แก้ปัญหาการจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยงในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multiple Criteria Decision-Making: MCDM) ซึ่งเป็นวิธีการตัดสินใจที่มีข้อได้เปรียบในการใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน มีความชัดเจนในการหาคำตอบ อีกทั้งสามารถเรียงลำดับทางเลือก หรือเกณฑ์การตัดสินใจได้ภายใต้การคำนวณเพียงครั้งเดียว [13] จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีงานวิจัยจำนวนไม่มากที่เกี่ยวข้องกับการนำวิธีการตัดสินใจ

แบบหลายหลักเกณฑ์ในการจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยงในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน เช่น งานวิจัยของ Nezarat, Sereshki และ Ataei [14] ที่ประยุกต์กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบคลุมเครือ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ขอบเขตในการเรียงลำดับความเสี่ยงทางด้านธรณีวิทยาของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจด้านต่าง ๆ งานวิจัยของ Yazdani-Chamzini, Yakhchali และ Mahmoodian [15] ที่นำเสนอวิธีการจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยงในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์และวิธีการกำจัดและคัดเลือกจากข้อเท็จจริงแบบคลุมเครือ (Fuzzy Elimination and Choice Expressing Reality: FELECTRE) ทั้งนี้มีงานวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งที่นำวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ในการศึกษาเพื่อคัดเลือกเครื่องเจาะอุโมงค์ที่เหมาะสม โดยสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จากบทความของ Yazdani-Chamzini [16] และ Lin, Xia และ Wu [17] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยอีกจำนวนมากที่ได้นำวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์มาใช้ในการจัดลำดับความเสี่ยงในงานด้านต่าง ๆ เช่น โลจิสติกส์และโซ่อุปทาน [18] อุตสาหกรรมการผลิต [19] การพัฒนายานพาหนะไร้คนขับ [20] โรงไฟฟ้าพลังงานหมุนเวียน [21] และการป้องกันการระบาดของไวรัสโคโรนา [22]

จากการศึกษางานวิจัยในข้างต้นพบว่าถึงแม้จะมีงานวิจัยที่ได้นำวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์มาใช้ในการจัดลำดับความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน แต่ยังไม่มีงานวิจัยใดที่แก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการนำวิธีการตัดสินใจหลายเกณฑ์แบบผสมผสานที่รวมกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์กับวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution: TOPSIS) โดยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์มีข้อดี ได้แก่ วิเคราะห์ได้ทั้งเกณฑ์การตัดสินใจเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ สามารถแปลงปัญหาที่มีความซับซ้อนให้มีความสัมพันธ์ลำดับชั้น มีการเปรียบเทียบความสำคัญขององค์ประกอบการตัดสินใจเป็นรายคู่ และการตรวจสอบความสอดคล้องของการประเมินจากผู้ตัดสินใจได้ อย่างไรก็ตามกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ไม่สามารถจัดลำดับทางเลือกจากค่าอุดมคติและคุณสมบัติที่แท้จริงของเกณฑ์การตัดสินใจ ในขณะที่วิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติมีข้อดี ได้แก่ ขั้นตอนการคำนวณที่ง่ายไม่ซับซ้อน สอดคล้องกับแนวคิดของมนุษย์ และสามารถจัดลำดับทางเลือกบนพื้นฐานของค่าอุดมคติด้านบวกและด้านลบไปพร้อมกัน แต่วิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติมีข้อด้อย ได้แก่ การกำหนดความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจที่ไม่ได้เปรียบเทียบเป็นรายคู่ และขาดวิธีการตรวจสอบความสอดคล้องของการตัดสินใจ [23] ดังนั้นวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์แบบผสมผสานที่เสนอนี้เป็นวิธีการตัดสินใจที่ถูกพัฒนาขึ้นมาด้วยการนำข้อดีของกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์และวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติมาใช้ร่วมกันและกำจัดข้อด้อยของแต่ละวิธีไปพร้อมกัน โดยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดน้ำหนักความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจด้วยการเปรียบเทียบเกณฑ์การตัดสินใจเป็นรายคู่ [24] ในขณะที่วิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติถูกใช้ในการจัดลำดับความเสี่ยงที่มีความเหมาะสมด้วยการพิจารณาระยะห่างจากอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบ [25] ถึงแม้วิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์แบบผสมผสานที่ประกอบไปด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์และวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติได้ถูกนำเสนอในวรรณกรรม เช่น งานวิจัยของ Kengpol, Rontlaong และ Tuominen [26] Wang และคณะ [27] Karahalios [28] Sharma และ Joshi [29] และ Noshad, Savari และ Roueita [30] แต่ยังไม่มีงานวิจัยใดประยุกต์วิธีการดังกล่าวกับการจัดลำดับความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์ อีกทั้งงานวิจัยส่วนมากยกเว้นงานวิจัยของ Kengpol, Rontlaong และ Tuominen [26] นิยมใช้วิธีการทั้งสองแยกจากกันโดยให้ผู้ตัดสินใจประเมินความสำคัญของทางเลือกภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจอีกครั้ง แต่ไม่ได้นำน้ำหนักความสำคัญของทางเลือกภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจซึ่งคำนวณได้จากกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์มาสังเคราะห์ต่อด้วยวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญ ดังนั้นวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์แบบผสมผสานที่เสนอในการศึกษาวิจัยนี้จึงใช้น้ำหนักความสำคัญของความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจซึ่งคำนวณได้จากกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ไปทำการจัดลำดับความเสี่ยงด้วยวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ

จากความสำคัญของปัญหาและช่องว่างของงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้น การศึกษาวิจัยนี้ต้องการนำเสนอวิธีการจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยงในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์ โดยใช้วิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์แบบผสมผสาน ซึ่งรวมกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์และวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติเข้าไว้ด้วยกัน เมื่อกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ถูกนำมาใช้ในการคำนวณน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจและน้ำหนักความสำคัญของความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจ ในขณะที่วิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติถูกนำมาใช้ในการจัดลำดับความเสี่ยงบนพื้นฐานน้ำหนักความสำคัญขององค์ประกอบในการตัดสินใจที่คำนวณได้ทั้งหมด พร้อมทั้งประยุกต์วิธีการที่เสนอกับกรณีศึกษาการจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยงในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินของโครงการรถไฟฟ้าสายสีส้มส่วนตะวันออกช่วงศูนย์วัฒนธรรมแห่งประเทศไทยถึงมีนบุรีซึ่งเป็นโครงการที่มีเป้าหมายในการวางระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนสาธารณะมีจำนวนทั้งสิ้น 17 สถานี ระยะทางรวมประมาณ 22.57 กิโลเมตร แบ่งเป็นทางวิ่งใต้ดินและเป็น

ทางยกระดับ เพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิภาพและการประยุกต์ใช้งานของวิธีการที่เสนอ อันจะเป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานภาครัฐและผู้ที่เกี่ยวข้องในการวางแผนการดำเนินโครงการต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การศึกษาวิจัยนี้ต้องการเสนอวิธีตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์แบบผสมผสานเพื่อจัดลำดับความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์ มีวิธีการวิจัยดังนี้

2.1. กำหนดเกณฑ์การตัดสินใจ

เกณฑ์การตัดสินใจที่ใช้ในการจัดลำดับความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินได้ถูกรวบรวมและกำหนดขึ้นจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ประกอบไปด้วย 6 เกณฑ์การตัดสินใจ ได้แก่ โอกาสในการเกิดความเสี่ยง (C_1) ผลกระทบต่อต้นทุนหากเกิดความเสี่ยง (C_2) ผลกระทบต่อระยะเวลาดำเนินโครงการหากเกิดความเสี่ยง (C_3) ความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทำงาน (C_4) ทรัพยากรที่ใช้ในการตอบสนองต่อความเสี่ยง (C_5) และผลกระทบต่อคุณภาพของโครงการหากเกิดความเสี่ยง (C_6) ตามลำดับ [14]

2.2. กำหนดเหตุการณ์ความเสี่ยง

ความเสี่ยงที่เกิดขึ้นในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินได้ถูกกำหนดขึ้น โดยความเสี่ยงเหล่านี้เป็นเหตุการณ์ที่อาจเคยเกิดขึ้นระหว่างการทำงาน หรืออาจไม่เคยเกิดขึ้นก็ได้ แต่เป็นความเสี่ยงที่ถูกคาดการณ์ไว้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากความเสี่ยงมีจำนวนมากจึงจำเป็นต้องจัดกลุ่มความเสี่ยงเพื่อให้สะดวกต่อการตัดสินใจ ประกอบไปด้วยความเสี่ยงทั้งหมด 8 ด้าน มีรายละเอียดดังนี้ [14], [31], [32], [33]

2.2.1. ความเสี่ยงด้านธรณีวิทยา

ความเสี่ยงด้านธรณีวิทยา (Geological Risks: A_1) หมายถึง เหตุการณ์ไม่คาดคิดที่เกิดขึ้นจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งต่อไปนี้ ได้แก่ สภาพของพื้นดินและชั้นหิน ขนาดคละของดิน การเคลื่อนตัวของดิน/หินเข้าสู่อุโมงค์ การรั่วซึมของน้ำเข้าสู่อุโมงค์ รอยแตกของหิน การเคลื่อนตัวของหินรอบตัวอุโมงค์ รอยแตกของคอนกรีตเสริมเหล็ก น้ำใต้ดิน การทรุดตัวของผิวดิน ความสามารถของดินที่รองรับน้ำหนักจากฐานราก รอยแยก หรือรอยเลื่อนของหิน และความแข็งของหิน

2.2.2. ความเสี่ยงด้านโครงสร้างพื้นฐาน

ความเสี่ยงด้านโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure Risks: A_2) หมายถึง เหตุการณ์ไม่คาดคิดที่เกิดขึ้นจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งต่อไปนี้ ได้แก่ การค้ำยันอุโมงค์ ระบบการระบายอากาศเพื่อการกำจัดฝุ่นความร้อน หรือควันในระหว่างการขุดเจาะ การให้แสงสว่างระหว่างทำงาน การออกแบบแนวทางราบและทางดิ่งของอุโมงค์ ระบบระบายความร้อน การใช้กระเช้ารอกและปั้นจั่นในงานอุโมงค์ สิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับการเคลื่อนย้ายและการจัดการขนย้ายเศษหินหรือดินที่ขุดได้ และการหยุดชะงักของแหล่งจ่ายไฟ

2.2.3. ความเสี่ยงด้านการปฏิบัติงาน

ความเสี่ยงด้านการปฏิบัติงาน (Operational Risks: A_3) หมายถึง เหตุการณ์ไม่คาดคิดที่เกิดขึ้นจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งต่อไปนี้ ได้แก่ ความล่าช้าในการเปลี่ยนหัวขุดเจาะ ผู้ปฏิบัติงานขาดประสบการณ์ การใช้งานระบบนำทางในการขุดเจาะอุโมงค์ ระบบฉุกเฉิน การใช้หัวเจาะที่ไม่เหมาะสมกับสภาพทางธรณีวิทยา ทิศทางการขุดเจาะ วิธีการปรับสภาพของดินที่ไม่เหมาะสม มาตรการควบคุมเสียง ความพร้อมของวัสดุก่อสร้าง การติดต่อสื่อสาร และการประสานงานระหว่างหน่วยงาน

2.2.4. ความเสี่ยงด้านการออกแบบเครื่องจักร

ความเสี่ยงด้านการออกแบบเครื่องจักร (Design of Machine Risks: A_4) หมายถึง เหตุการณ์ไม่คาดคิดที่เกิดขึ้นจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งต่อไปนี้ ได้แก่ การออกแบบหัวขุดเจาะ ขนาดหัวขุดเจาะ แรงบิด หรือแรงขับเคลื่อนของเครื่องเจาะอุโมงค์ที่มากเกินไป การติดตั้งวงแหวนเมื่อต้องการเปลี่ยนแนวอุโมงค์ การเสื่อมสภาพของปะเก็น ห้องพักดินเครื่องเจาะอุโมงค์ และการหยุดทำงานของเครื่องเจาะอุโมงค์เนื่องจากเกิดการอุดตัน

2.2.5. ความเสี่ยงด้านกฎหมายและการเมือง

ความเสี่ยงด้านกฎหมายและการเมือง (Political and Legal Risks: A_5) หมายถึง ปัญหาทางการเมืองต่าง ๆ การชุมนุม การประท้วง ข้อกำหนดและมาตรฐานความปลอดภัย การเวนคืน การเปลี่ยนแปลงข้อกฎหมาย ข้อกำหนดจากทางหน่วยงานรัฐบาล มาตรฐานในการบริหารและการจัดการด้านความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสภาพแวดล้อมในการทำงานเกี่ยวกับงานก่อสร้าง

2.2.6. ความเสี่ยงด้านเศรษฐกิจ

ความเสี่ยงด้านเศรษฐกิจ (Economic Risks: A_6) หมายถึง สภาวะถดถอยทางเศรษฐกิจ การลดลงของเงินลงทุน ราคาน้ำมันเชื้อเพลิง อัตราแลกเปลี่ยน ความผันผวนของเศรษฐกิจโลก อัตราดอกเบี้ย ภาระหนี้สิน นโยบายการคลัง นโยบายการเงิน ราคาน้ำมัน ภาวะเงินเฟ้อ และภาวะเงินฝืด

2.2.7. ความเสี่ยงด้านภัยธรรมชาติ

ความเสี่ยงด้านภัยธรรมชาติ (Natural Risks: A_7) หมายถึง ความแปรปรวนของสภาพภูมิอากาศ แผ่นดินไหว น้ำท่วม ไฟไหม้ คลื่นความร้อน อุกกาบาตตก และภัยธรรมชาติอื่น ๆ ที่ไม่คาดคิด

2.2.8. ความเสี่ยงด้านอื่น ๆ

ความเสี่ยงด้านอื่น ๆ (Other Risks: A_8) หมายถึง ปริมาณการจราจร ทัศนียภาพต่อการมองเห็น ภูมิทัศน์ของบริเวณพื้นที่ก่อสร้าง ผลกระทบต่อเขตโบราณสถาน หรือสถานที่สำคัญทางประวัติศาสตร์ การทำงานบริเวณแหล่งชุมชน นโยบายจากทางภาครัฐ และความอ่อนไหวต่อปัจจัยภายนอก

2.3. เปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจ

ผู้ตัดสินใจ (Decision Maker: DM) ซึ่งมีคุณสมบัติตามที่ได้กำหนดไว้ถูกเชิญมาเพื่อทำการประเมินความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจเป็นรายคู่และเปรียบเทียบความสำคัญความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจแต่ละเกณฑ์ พร้อมทั้งสร้างเมทริกซ์การเปรียบเทียบเกณฑ์การตัดสินใจ หรือความเสี่ยงเป็นรายคู่ (Table 1) โดยระดับการประเมินความสำคัญแบบ 9 ระดับ (Table 2) [34] หากผู้ตัดสินใจมีความเห็นว่าเกณฑ์การตัดสินใจ หรือความเสี่ยงทางด้านแถวมีความสำคัญมากกว่าเกณฑ์การตัดสินใจ หรือความเสี่ยงทางด้านหลักในเมทริกซ์การเปรียบเทียบรายคู่จะใช้ระดับการประเมินความสำคัญแบบปกติ แต่หากพิจารณาแล้วเห็นว่าเกณฑ์การตัดสินใจ หรือความเสี่ยงทางด้านแถวมีความสำคัญน้อยกว่าเกณฑ์การตัดสินใจ หรือความเสี่ยงทางด้านหลัก ระดับการประเมินความสำคัญแบบส่วนกลับจะถูกนำมาใช้ [35]

Table 1 Pairwise comparison matrix

	C_1	C_2	$\cdots$	C_n
C_1	a_{11}	a_{12}	$\cdots$	a_{1n}
C_2	a_{21}	a_{22}	$\cdots$	a_{2n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
C_m	a_{m1}	a_{m2}	$\cdots$	a_{mn}

Table 2 Importance scale

Scale	Definition
1	Equal importance
2	Equal to moderate importance
3	Moderate importance
4	Moderate to strong importance
5	Strong importance
6	Strong to very strong importance
7	Very strong importance
8	Very strong to extreme Importance
9	Extreme importance

2.4. คำนวณน้ำหนักความสำคัญ

หลังจากที่ทำการสร้างเมทริกซ์การเปรียบเทียบเกณฑ์การตัดสินใจ หรือความเสี่ยงเป็นรายคู่ได้แล้ว ในขั้นตอนนี้ต้องคำนวณน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจและน้ำหนักความสำคัญความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจแต่ละเกณฑ์ตามแนวคิดกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ [23] โดยเริ่มจากการปรับบรรทัดฐานเมทริกซ์การเปรียบเทียบรายคู่ด้วยผลรวมในแต่ละหลัก แสดงดังสมการที่ (1)

$$a_{ji}^{*} = \frac{a_{ji}}{\sum_{j=1}^{m} a_{ji}} \qquad (1)$$

โดยที่

a_{ji}^{*} = ระดับการประเมินความสำคัญที่ผ่านการปรับบรรทัดฐานของเกณฑ์การตัดสินใจที่ j และ i

a_{ji} = ระดับการประเมินความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจที่ j และ i

i = 1, 2, ..., n

j = 1, 2, ..., m

จากนั้นคำนวณน้ำหนักความสำคัญด้วยการนำผลรวมในแต่ละแถวหารด้วยผลรวมทั้งหมดแสดงดังสมการที่ (2) เมื่อผลรวมของน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมดต้องมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ [36]

$$w_j = \frac{\sum_{j=1}^{m} a_{ji}^{*}}{m} \qquad (2)$$

โดยที่ w_j = น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจที่ j

สำหรับการคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจต่าง ๆ นั้น สามารถดำเนินการได้ด้วยวิธีการเดียวกันนี้ เพียงแต่เปลี่ยนจากระดับการประเมินความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจเป็นระดับการประเมินความสำคัญทางเลือกซึ่งได้กระทำไว้ในขั้นตอนที่ผ่านมา ทั้งนี้หากมีผู้ตัดสินใจมากกว่า 1 ราย ให้นำน้ำหนักความสำคัญที่คำนวณได้จากผู้ตัดสินใจทั้งหมดมาคำนวณค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Mean) เพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญตัวแทนซึ่งเป็นค่าน้ำหนักความสำคัญของกลุ่มผู้ตัดสินใจ [37]

2.5. ตรวจสอบค่าความสอดคล้องของเหตุผล

ในขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบว่าความคิดเห็นของผู้ตัดสินใจในการประเมินความสำคัญนั้นมีความสอดคล้องกันและน่าเชื่อถือที่นำไปใช้ในการวิจัยขั้นตอนต่อไปได้ หรือไม่ โดยนำเมทริกซ์การเปรียบเทียบรายคู่คูณกับเมทริกซ์ของน้ำหนักความสำคัญ เพื่อคำนวณค่าไอเกนมากที่สุด ($\lambda_{\max}$) จากค่าเฉลี่ยของผลรวมด้านแถวหารด้วยน้ำหนักความสำคัญแต่ละเกณฑ์การตัดสินใจ จากนั้นคำนวณค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) ดังสมการที่ (3)

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \qquad (3)$$

ต่อมาคำนวณอัตราส่วนความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Ratio: CR) ระหว่างค่าดัชนีความสอดคล้องกับค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Consistency

Index: RI) (Table 3) โดยอัตราส่วนความสอดคล้องกันของเหตุผลต้องมีค่าไม่เกินอัตราส่วนความสอดคล้องที่กำหนดตามขนาดของเมทริกซ์การเปรียบเทียบรายคู่ โดยเมทริกซ์ขนาด 3 × 3 ต้องมีค่าอัตราส่วนความสอดคล้องไม่เกิน 0.05 เมทริกซ์ขนาด 4 × 4 ต้องมีค่าอัตราส่วนความสอดคล้องไม่เกิน 0.08 และเมทริกซ์ขนาด 5 × 5 หรือใหญ่กว่าต้องมีค่าอัตราส่วนความสอดคล้องไม่เกิน 0.10 โดยเมทริกซ์ขนาด 2 × 2 ถือว่ามีความสอดคล้องกันของเหตุผลสมบูรณ์แบบ [38] ทั้งนี้หากอัตราส่วนความสอดคล้องกันของเหตุผลไม่เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ผู้ตัดสินใจต้องทบทวนการเปรียบเทียบความสำคัญ จนกว่าอัตราส่วนความสอดคล้องกันของเหตุผลจะมีค่าเป็นไปตามที่กำหนด [39]

Table 3 Random consistency index

Size	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

2.6. สร้างเมทริกซ์การตัดสินใจปรับบรรทัดฐาน

น้ำหนักความสำคัญความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจแต่ละเกณฑ์ที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ผ่านมาถูกกำหนดให้เป็นข้อมูลนำเข้าของวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ [40] จากนั้นทำการปรับบรรทัดฐานดังสมการที่ (4)

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^2}} \quad (4)$$

โดยที่

n_{ij} = ข้อมูลนำเข้าปรับบรรทัดฐานของความเสี่ยงที่ i ภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจที่ j

x_{ij} = ข้อมูลนำเข้าของความเสี่ยงที่ i ภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจที่ j (น้ำหนักความสำคัญของความเสี่ยงที่ i ภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจ j)

2.7. สร้างเมทริกซ์การตัดสินใจปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนัก

ในขั้นตอนนี้เมทริกซ์การตัดสินใจปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนัก (V) ถูกสร้างขึ้นจากผลคูณระหว่างข้อมูลนำเข้าปรับบรรทัดฐานทั้งหมดกับน้ำหนักความสำคัญแต่ละเกณฑ์การตัดสินใจ ดังสมการที่ (5) [41]

$$V = [v_{ij}] = n_{ij} \times w_j \quad (5)$$

โดยที่

v_{ij} = ข้อมูลนำเข้าปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนักของความเสี่ยงที่ i ภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจที่ j

2.8. คำนวณค่าอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบ

ค่าอุดมคติเชิงบวก (A^+) เป็นเซตของข้อมูลนำเข้าปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนักที่มีค่าสูงสุดในแต่ละเกณฑ์การตัดสินใจ ในขณะที่ค่าอุดมคติเชิงลบ (A^-) เป็นเซตของข้อมูลนำเข้าปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนักที่มีค่าต่ำสุดในแต่ละเกณฑ์การตัดสินใจ การคำนวณค่าอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบ แสดงดังสมการที่ (6) และสมการที่ (7) ตามลำดับ

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, ..., v_m^+\} = \{(max_j\, v_{ij} \mid j \in B), (min_j\, v_{ij} \mid j \in NB)\} \quad (6)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, ..., v_m^-\} = \{(min_j\, v_{ij} \mid j \in NB), (max_j\, v_{ij} \mid j \in B)\} \quad (7)$$

โดยที่

B = เกณฑ์การตัดสินใจที่เป็นผลประโยชน์

NB = เกณฑ์การตัดสินใจที่ไม่เป็นผลประโยชน์

สำหรับการศึกษาวิจัยนี้ถึงแม้ว่าคำนิยามของเกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมด (C_1 - C_6) เป็นเกณฑ์การตัดสินใจที่ไม่เป็นผลประโยชน์ แต่ข้อมูลนำเข้า หรือคุณสมบัติของความเสี่ยง (ทางเลือก) ภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์แบบผสมผสานที่นำเสนอนั้นเป็นน้ำหนักความสำคัญของความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจ อีกทั้งวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยนี้ต้องการจัดลำดับความสำคัญของความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์ ดังนั้นจึงกำหนดให้เกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมดเป็นเกณฑ์การตัดสินใจที่เป็นผลประโยชน์ต่อการตัดสินใจ

2.9. คำนวณระยะห่างจากค่าอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบ

ในขั้นตอนนี้ระยะห่างจากค่าอุดมคติเชิงบวก (d_i^+) และระยะห่างค่าอุดมคติเชิงลบ (d_i^-) จะถูกคำนวณขึ้นจากข้อมูลนำเข้าปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนักเปรียบเทียบกับค่าอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบ โดยอาศัยแนวคิดของการวัดระยะห่างยุคลิด แสดงดังสมการที่ (8) และสมการที่ (9)

$$d_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^+)^2 \right\}^{1/2} \quad (8)$$

$$d_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^-)^2 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

2.10. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้แนวคิดอุดมคติ

ในขั้นตอนนี้เป็นการจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยงในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์ โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้แนวคิดอุดมคติ (Closeness

Coefficient: CC) ความเสี่ยงที่มีความสำคัญมากที่สุดจะมีค่าค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้แนวคิดอุดมคติสูงที่สุด หรือเป็นความเสี่ยงที่มีระยะห่างจากแนวคิดอุดมคติเชิงลบน้อยที่สุดและมีระยะห่างจากแนวคิดอุดมคติมากที่สุด ส่วนความเสี่ยงอื่น ๆ จะมีลำดับความสำคัญลดลงมาตามค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้แนวคิดอุดมคติจากมากที่สุดไปหาน้อยที่สุด [42] การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้แนวคิดอุดมคติ แสดงดังสมการที่ (10)

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (10)$$

3. ผลการวิจัย

วิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์แบบผสมผสานได้ถูกประยุกต์ในการจัดลำดับความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์โครงการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินรถไฟฟ้าสายสีส้มส่วนตะวันออกช่วงศูนย์วัฒนธรรมแห่งประเทศไทยถึงมีนบุรี โดยผู้ตัดสินใจซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ในการทำงานด้านการก่อสร้างใต้ดินและทางธรณีวิทยาอย่างน้อย 10 ปี จำนวน 3 ราย (DM_1, DM_2 และ DM_3) ต้องเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจเป็นรายคู่และเปรียบเทียบความสำคัญความเสี่ยงเป็นรายคู่ภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจแต่ละเกณฑ์ ดังนั้นจึงมีเมทริกซ์การเปรียบเทียบเกณฑ์การตัดสินใจและความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมดจำนวน 21 เมทริกซ์ ประกอบไปด้วยเมทริกซ์สำหรับเปรียบเทียบเกณฑ์การตัดสินใจของผู้ตัดสินใจ 3 ราย จำนวน 3 เมทริกซ์ และเมทริกซ์สำหรับเปรียบเทียบความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจทั้ง 6 เกณฑ์ของผู้ตัดสินใจทั้ง 3 ราย จำนวน 18 เมทริกซ์ ตัวอย่างเมทริกซ์การเปรียบเทียบเกณฑ์การตัดสินใจของผู้ตัดสินใจรายที่ 1 (Table 4)

Table 4 Pairwise comparison matrix of decision criteria from the first decision maker

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
C_1	1	2	2	2	1	4
C_2	1/2	1	3	2	1	3
C_3	1/2	1/3	1	3	1/2	3
C_4	1/2	1/2	1/3	1	1/3	1
C_5	1	1	2	3	1	1
C_6	1/4	1/3	1/3	1	1	1

คำนวณน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจและความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจจากความเห็นของผู้เชี่ยวชาญแต่ละรายด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจและอัตราส่วนความสอดคล้องกันของเหตุผล (Table 5)

Table 5 Weights of each decision criterion

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	CR
DM_1	0.261	0.213	0.150	0.083	0.204	0.089	0.077
DM_2	0.176	0.132	0.229	0.140	0.226	0.096	0.085
DM_3	0.127	0.233	0.235	0.100	0.105	0.200	0.092
Avg.	0.188	0.193	0.204	0.107	0.178	0.129	

ผลการคำนวณน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจพบว่า w_1 = 0.188, w_2 = 0.193, w_3 = 0.204, w_4 = 0.107, w_5 = 0.178 และ w_6 = 0.129 ตามลำดับ ในขณะที่น้ำหนักความสำคัญของความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจ (Table 6) เช่น น้ำหนักความสำคัญความเสี่ยงด้านธรณีวิทยาภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจโอกาสในการเกิดความเสี่ยงมีค่าเท่ากับ 0.174 ส่วนน้ำหนักความสำคัญความเสี่ยงที่เหลือสามารถพิจารณาได้ด้วยวิธีเดียวกัน นอกจากนี้พบว่าอัตราส่วนความสอดคล้องกันของเหตุผลทั้งหมดมีค่าไม่เกินที่กำหนด จึงสรุปได้ว่าน้ำหนักความสำคัญที่คำนวณได้มีความน่าเชื่อถือสูงสามารถนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไปได้ ต่อมาประยุกต์แนวคิดของวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับเทียบเคียงแนวคิดอุดมคติมาเพื่อจัดลำดับความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์โดยพิจารณาทางเลือกจากน้ำหนักความสำคัญขององค์ประกอบในการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ทั้งหมด ดังนั้นน้ำหนักความสำคัญของทางเลือกภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจที่คำนวณได้ทั้งหมดถูกกำหนดเป็นข้อมูลนำเข้าและสร้างเป็นเมทริกซ์การตัดสินใจ (Table 7) จากนั้นทำการปรับบรรทัดฐานเพื่อสร้างเมทริกซ์การตัดสินใจปรับบรรทัดฐาน (Table 8) ถัดมานำน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจที่คำนวณได้จากกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์คูณกับข้อมูลนำเข้าปรับบรรทัดฐานทั้งหมด เพื่อสร้างเมทริกซ์การตัดสินใจปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนัก (Table 9)

คำนวณค่าอุดมคติเชิงบวกโดยพิจารณาข้อมูลนำเข้าปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนักที่มีค่าสูงสุดในแต่ละเกณฑ์การตัดสินใจ ดังนั้น A^+ = {0.090, 0.085, 0.114, 0.054, 0.086, 0.062} ส่วนค่าอุดมคติเชิงลบพิจารณาข้อมูลนำเข้าปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนักที่มีค่าต่ำสุดในแต่ละเกณฑ์การตัดสินใจ ดังนั้น A^- = {0.046, 0.047, 0.033, 0.014, 0.030, 0.021}

เมื่อพิจารณาค่าอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบกับข้อมูลนำเข้าปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนักแล้วสามารถคำนวณค่าระยะห่างจากอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบตามแนวคิดการวัดระยะทางยุคลิด ผลการคำนวณระยะห่างจากแนวคิดอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบ (Table 10)

ทำการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้แนวคิดอุดมคติจากอัตราส่วนระหว่างระยะห่างจากแนวคิดอุดมคติเชิงลบกับผลรวมของระยะห่างจากแนวคิดอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบเพื่อระบุความเสี่ยงที่มีความสำคัญสูงสุดซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้แนวคิดอุดมคติมากที่สุด ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้แนวคิดอุดมคติ (Table 11)

จากผลลัพธ์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าความเสี่ยงด้านการออกแบบเครื่องจักรมีความสำคัญมากที่สุด ความเสี่ยงด้านการปฏิบัติงานมีความสำคัญลำดับที่สอง ความเสี่ยงด้านโครงสร้างพื้นฐานมีความสำคัญลำดับที่สาม ในขณะที่ความเสี่ยงด้านกฎหมายและการเมือง ความเสี่ยงด้านธรณีวิทยา ความเสี่ยงด้านเศรษฐกิจ และความเสี่ยงด้านภัยธรรมชาติมีความสำคัญลดลงมาตามลำดับ โดยความเสี่ยงด้านอื่น ๆ มีความสำคัญน้อยที่สุด ดังนั้นสามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้ $A_4 > A_3 > A_2 > A_5 > A_1 > A_6 > A_7 > A_8$ ตามลำดับ

Table 6 Weights of each risk under all decision criteria

		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	CR
C_1	DM_1	0.193	0.115	0.095	0.086	0.100	0.139	0.134	0.137	0.094
	DM_2	0.182	0.135	0.110	0.219	0.111	0.068	0.057	0.117	0.096
	DM_3	0.147	0.116	0.145	0.201	0.139	0.125	0.075	0.051	0.100
	Avg.	0.174	0.122	0.117	0.169	0.117	0.111	0.089	0.102	
C_2	DM_1	0.071	0.178	0.193	0.172	0.161	0.084	0.098	0.043	0.089
	DM_2	0.173	0.151	0.183	0.177	0.115	0.100	0.052	0.047	0.063
	DM_3	0.106	0.125	0.099	0.104	0.077	0.077	0.201	0.210	0.065
	Avg.	0.117	0.152	0.159	0.151	0.118	0.087	0.117	0.100	
C_3	DM_1	0.143	0.111	0.272	0.141	0.125	0.076	0.076	0.056	0.070
	DM_2	0.132	0.197	0.167	0.128	0.119	0.119	0.072	0.066	0.052
	DM_3	0.092	0.172	0.189	0.182	0.137	0.103	0.065	0.062	0.082
	Avg.	0.122	0.160	0.209	0.150	0.127	0.099	0.071	0.061	
C_4	DM_1	0.162	0.168	0.112	0.150	0.185	0.123	0.045	0.054	0.080
	DM_2	0.114	0.109	0.106	0.167	0.189	0.175	0.107	0.033	0.075
	DM_3	0.184	0.121	0.120	0.131	0.182	0.112	0.098	0.053	0.090
	Avg.	0.153	0.132	0.113	0.149	0.185	0.137	0.083	0.047	
C_5	DM_1	0.121	0.177	0.182	0.174	0.109	0.074	0.076	0.086	0.076
	DM_2	0.188	0.107	0.141	0.160	0.190	0.096	0.071	0.047	0.083
	DM_3	0.130	0.130	0.113	0.206	0.212	0.083	0.072	0.056	0.061
	Avg.	0.146	0.138	0.145	0.180	0.170	0.084	0.073	0.063	
C_6	DM_1	0.148	0.165	0.212	0.131	0.095	0.113	0.078	0.058	0.100
	DM_2	0.163	0.152	0.127	0.131	0.212	0.088	0.063	0.064	0.098
	DM_3	0.101	0.169	0.120	0.157	0.234	0.071	0.085	0.062	0.093
	Avg.	0.137	0.162	0.153	0.140	0.180	0.091	0.075	0.061	

Table 7 Decision matrix

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	0.174	0.117	0.122	0.153	0.146	0.137
A_2	0.122	0.152	0.160	0.132	0.138	0.162
A_3	0.117	0.159	0.209	0.113	0.145	0.153
A_4	0.169	0.151	0.150	0.149	0.180	0.140
A_5	0.117	0.118	0.127	0.185	0.170	0.180
A_6	0.111	0.087	0.099	0.137	0.084	0.091
A_7	0.089	0.117	0.071	0.083	0.073	0.075
A_8	0.102	0.100	0.061	0.047	0.063	0.061

Table 8 Normalized decision matrix

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	0.481	0.324	0.325	0.413	0.392	0.369
A_2	0.336	0.421	0.425	0.356	0.370	0.436
A_3	0.322	0.440	0.556	0.303	0.389	0.412
A_4	0.466	0.420	0.399	0.402	0.482	0.376
A_5	0.322	0.326	0.338	0.499	0.456	0.485
A_6	0.305	0.242	0.263	0.368	0.225	0.244
A_7	0.245	0.325	0.188	0.224	0.196	0.203
A_8	0.281	0.277	0.162	0.126	0.169	0.164

Table 9 Weighted normalized decision matrix

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	0.090	0.063	0.066	0.044	0.070	0.048
A_2	0.063	0.081	0.087	0.038	0.066	0.056
A_3	0.060	0.085	0.114	0.033	0.069	0.053
A_4	0.088	0.081	0.082	0.043	0.086	0.048
A_5	0.060	0.063	0.069	0.054	0.081	0.062
A_6	0.057	0.047	0.054	0.040	0.040	0.031
A_7	0.046	0.063	0.038	0.024	0.035	0.026
A_8	0.053	0.054	0.033	0.014	0.030	0.021

Table 10 Distances from positive and negative ideal solutions

	d_i^+	d_i^-		d_i^+	d_i^-
A_1	0.057	0.081	A_5	0.058	0.088
A_2	0.046	0.087	A_6	0.097	0.038
A_3	0.041	0.105	A_7	0.114	0.021
A_4	0.037	0.100	A_8	0.124	0.010

Table 11 Closeness coefficients

	CC	Rank		CC	Rank
A_1	0.585	5	A_5	0.601	4
A_2	0.651	3	A_6	0.281	6
A_3	0.718	2	A_7	0.155	7
A_4	0.730	1	A_8	0.072	8

ทั้งนี้ผลการจัดลำดับความเสี่ยงในข้างต้นนั้นขึ้นอยู่กับความเห็นของผู้ตัดสินใจ ลำดับความเสี่ยงอาจเปลี่ยนแปลงได้หากองค์ประกอบในการตัดสินใจมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบความอ่อนไหวของคำตอบภายใต้ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้น โดยตรวจสอบลำดับของความเสี่ยงเมื่อน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทำงาน (w_3) ที่ระดับต่าง ๆ ตั้งแต่ 0.100 - 0.900 ทั้งนี้เนื่องจากเกณฑ์การตัดสินใจดังกล่าวมีความสำคัญมากที่สุด ในขณะที่น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจอื่น ๆ เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนของความผันแปรที่เกิดขึ้น สามารถศึกษารายละเอียดการวิเคราะห์ความไวเพิ่มเติมได้จากงานวิจัยของ Dehdasht และคณะ [43] ผลการวิเคราะห์ความไว (Figure 1) เมื่อกำหนดให้ S_1 - S_9 แทนสถานการณ์ที่น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทำงานมีค่าเท่ากับ 0.100 - 0.900 ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ความไวพบว่าเมื่อน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทำงานมีค่าระหว่าง 0.100 - 0.200 ความเสี่ยงด้านการออกแบบเครื่องจักรยังมีความสำคัญมากที่สุด แต่เกิดการเปลี่ยนแปลงของลำดับของความเสี่ยงในลำดับที่สองถึงลำดับที่ห้า โดยเมื่อน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทำงานมีค่าเท่ากับ 0.300 ความเสี่ยงด้านการปฏิบัติงานได้กลายเป็นความเสี่ยงที่มีความสำคัญมากที่สุดและความเสี่ยงการออกแบบเครื่องจักรได้กลายเป็นความเสี่ยงที่มีความสำคัญลำดับที่สอง ส่วนลำดับของความเสี่ยงที่เหลือไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้หากน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทำงานมีค่ามากกว่า 0.300 ขึ้นไป พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะลำดับความเสี่ยงในลำดับที่สองกับลำดับที่สามเท่านั้น โดยความเสี่ยงในลำดับอื่นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเลย จากผลการวิเคราะห์ความไวสามารถสรุปได้ว่าวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์แบบคลุมเครือที่นำเสนอนั้นมีความน่าเชื่อถือสูงตอบสนองต่อความต้องการของผู้ตัดสินใจและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

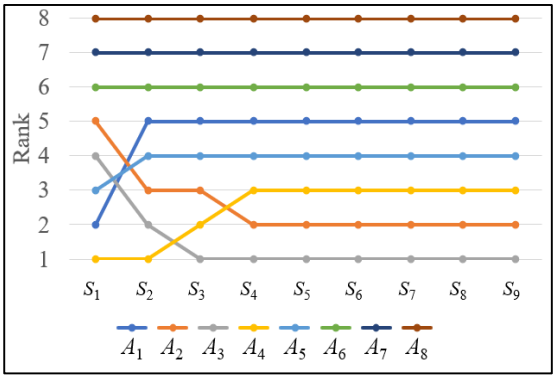

Figure 1 Sensitivity analysis results

4. อภิปรายผลการวิจัย

ผลการศึกษาวิจัยแสดงให้เห็นว่าวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์แบบผสมผสานที่เสนอนั้นแก้ปัญหาการจัดลำดับความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์ได้เป็นอย่างดี สามารถเรียงลำดับความเสี่ยงจากค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้แนวคิดอุดมคติจากค่ามากที่สุดไปหาค่าน้อยที่สุดซึ่งคำนวณได้จากน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจและน้ำหนักความสำคัญความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจแต่ละเกณฑ์ โดยผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเกณฑ์การตัดสินใจผลกระทบต่อระยะเวลาดำเนินโครงการหากเกิดความเสี่ยงมีความสำคัญสูงสุดเป็นอันดับแรก ในขณะที่เกณฑ์การตัดสินใจผลกระทบต่อต้นทุนหากเกิดความเสี่ยง โอกาสในการเกิดความเสี่ยง ทรัพยากรที่ใช้ในการตอบสนองต่อความเสี่ยง ผลกระทบต่อคุณภาพของโครงการหากเกิดความเสี่ยง และความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทำงาน มีความสำคัญลดลงมาตามลำดับ ในทำนองเดียวกันยังพบว่าความเสี่ยงด้านการออกแบบเครื่องจักรมีความสำคัญมากที่สุดและความเสี่ยงด้านอื่นมีความสำคัญน้อยที่สุด โดยพบว่าผลลัพธ์การจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยงที่ได้นั้นไม่ได้จัดลำดับจากระดับความ

เสี่ยงซึ่งคำนวณได้จากข้อมูลในอดีต แต่จัดลำดับจากน้ำหนักความสำคัญขององค์ประกอบในการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ซึ่งมีความเป็นเหตุเป็นผลในสถานการณ์การทำงานจริงเป็นอย่างมาก ผลจากการศึกษาวิจัยยังแสดงให้เห็นว่าความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์ไม่ได้จำกัดเฉพาะความเสี่ยงที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักร หรือความเสี่ยงทางธรณีวิทยาเท่านั้น แต่ยังมีความเสี่ยงอีกหลายด้านที่ส่งผลต่อการเกิดเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด โดยถึงแม้จะไม่เคยมีเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความเสี่ยงด้านใด ๆ เกิดขึ้นก็ตาม แต่ความเสี่ยงด้านนั้นก็มีความจำเป็นต้องได้รับความสนใจ การควบคุม หรือความใส่ใจเป็นพิเศษ เนื่องจากไม่สามารถทราบได้ว่าเหตุการณ์ที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้จะเกิดขึ้นเมื่อใด หรือในช่วงระยะเวลาใด อย่างไรก็ตามผลลัพธ์จากการศึกษาวิจัยนี้อาจเปลี่ยนแปลงได้หากมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจ หรือความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจ อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือทั้งสองอย่าง

นอกจากนี้ผลจากการศึกษาวิจัยนี้ยังสอดคล้องกับผลการศึกษาวิจัยของ Nezarat, Sereshki และ Ataei [14], Yazdani-Chamzini, Yakhchali และ Mahmoodian [15], Tarei, Thakkar และ Nag [44], Oz และคณะ [45] และ Koohathongsumrit และ Meethom [46] ที่สามารถจัดลำดับความเสี่ยงของการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดิน หรือเหตุการณ์ไม่คาดคิดสำหรับงานด้านอื่นจากการเปรียบเทียบองค์ประกอบของการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์เป็นรายคู่และใช้วิธีการตัดสินใจหลายหลักเกณฑ์การแก้ปัญหาการตัดสินใจเพื่อให้ได้คำตอบสุดท้าย

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยงในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์โดยการประยุกต์ใช้วิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์แบบผสมผสาน กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ถูกนำมาใช้รวบรวมข้อมูลจากการเปรียบเทียบความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจและความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจแต่ละเกณฑ์เป็นรายคู่ เพื่อกำหนดน้ำหนักความสำคัญให้กับเกณฑ์การตัดสินใจและความเสี่ยงภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจด้านต่าง ๆ พร้อมทั้งมีการตรวจสอบความสอดคล้องกันของเหตุผลจากการเปรียบเทียบความสำคัญ ผลลัพธ์จากกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ถูกกำหนดให้เป็นข้อมูลนำเข้าเพื่อวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไปด้วยวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติซึ่งถูกใช้เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้แนวคิดอุดมคติสำหรับการจัดลำดับความเสี่ยงจากระยะห่างแนวคิดอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบ สุดท้ายนำวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์แบบผสมผสานที่เสนอประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาจริงเพื่อเป็นการยืนยันประสิทธิภาพและการใช้งานได้ของวิธีการที่เสนอ

จากการประยุกต์ใช้วิธีการที่เสนอสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์และวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติสามารถทำงานร่วมกันเพื่อจัดลำดับความสำคัญความเสี่ยงได้เป็นอย่างดี มีการนำจุดเด่นของแต่ละวิธีมาประยุกต์ใช้ร่วมกันและลดจุดด้อยของแต่ละวิธีไปพร้อมกันในการตัดสินใจครั้งเดียว โดยมีข้อดี ได้แก่ 1) สามารถจัดลำดับองค์ประกอบการตัดสินใจได้อย่างมีเหตุผลจากค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้แนวคิดอุดมคติซึ่งคำนวณได้โดยใช้ข้อมูลน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจและทางเลือกภายใต้เกณฑ์การตัดสินใจ 2) ตอบสนองต่อสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบการตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ 3) มีขั้นตอนการคำนวณที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และเลียนแบบแนวคิดของมนุษย์ และ 4) สามารถใช้วิเคราะห์เกณฑ์การตัดสินใจเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพได้ ทั้งนี้วิธีการที่เสนอยังมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ 1) ผู้ตัดสินใจต้องมีความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับระดับการประเมินความสำคัญและความหมายเพื่อใช้ในการตัดสินใจ 2) ไม่สามารถจัดการกับความคลุมเครือที่เกิดขึ้นจากการตัดสินใจได้ในบางกรณีได้ เนื่องจากระดับการประเมินความสำคัญเป็นตัวเลขที่ชัดเจน 3) อาจไม่มีประสิทธิภาพการตัดสินใจเท่าที่ควรหากองค์ประกอบในการตัดสินใจไม่ได้มีความสัมพันธ์แบบลำดับชั้น และ 4) การตรวจสอบความสอดคล้องกันของผู้ตัดสินใจอาจกระทำได้ยากในกรณีที่เกณฑ์การตัดสิน หรือความเสี่ยงเพิ่มขึ้น

สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการที่เสนอเป็นลำดับของความเสี่ยงในการก่อสร้างอุโมงค์ใต้ดินด้วยเครื่องเจาะอุโมงค์ โดยพบว่าความเสี่ยงด้านการออกแบบเครื่องจักรมีความสำคัญมากที่สุด นอกจากนี้คำตอบที่ได้จากวิธีการที่เสนอยังมีความสอดคล้องกับสถานการณ์แห่งความเป็นจริงที่ความเสี่ยงมีโอกาสในการเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาถึงแม้จะไม่เคยเกิดความเสี่ยงนั้นขึ้นก็ตาม ผลจากการวิจัยนี้จึงเป็นประโยชน์ให้กับวิศวกรผู้รับผิดชอบ หรือผู้ที่เกี่ยวข้องในการควบคุม กำกับ หรือดูแล ขั้นตอนการทำงานต่าง ๆ ที่อาจก่อให้เกิดความเสี่ยงขึ้น และยังสามารถกำหนดมาตรการเป็นรูปธรรมในการรองรับหรือป้องกันเหตุการณ์ความเสี่ยงที่มีความสำคัญสูงสุดก่อน เช่น มีการตรวจรับรองเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการขุดเจาะให้อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ดีและปลอดภัยเป็นประจำก่อนนำเครื่องจักรและอุปกรณ์เหล่านั้นไปใช้งาน จัดให้บุคคลที่มีความสามารถตรวจสอบเครื่องจักรและอุปกรณ์ก่อนเริ่มงานกะใหม่ทุกครั้ง กำหนดระบบการบำรุงรักษาตามแผนงานโดยพิจารณาจากชั่วโมงการทำงานทั้งหมดเปรียบเทียบกับชั่วโมงการทำงานรวมตามแผน และจัดให้มีคู่มือการใช้งานเครื่องเจาะอุโมงค์และมอบให้แรงงานที่ทำงานในอุโมงค์ใช้เป็นคู่มือในการทำงานตลอดเวลาปฏิบัติงาน พร้อมทั้งอบรมและฝึกปฏิบัติจนกว่าแรงงานจะสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย

สำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคตอาจนำวิธีการที่เสนอใช้กับการคัดเลือกหัวเจาะสำหรับเครื่องเจาะอุโมงค์ หรือประยุกต์แนวคิดของตรรกศาสตร์คลุมเครือใช้ร่วมกับวิธีการตัดสินใจที่เสนอเพื่อลดความคลุมเครือที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดสินใจ รวมถึงนำวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์อื่นรวมกับวิธีการที่เสนอ เช่น กระบวนการโครงข่ายเชิงวิเคราะห์ (Analytic Network Process: ANP) การวิเคราะห์โอบล้อมข้อมูล (Data Envelopment Analysis: DEA) และวิธีไวโกร์ (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje: VIKOR) นอกจากนี้อาจประยุกต์แนวคิดของวิธีการตัดสินใจหลายหลักเกณฑ์แบบผสมผสานประยุกต์กับปัญหาการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์อื่น เช่น การคัดเลือกผู้จัดหาวัตถุดิบ การเลือกทำเลที่ตั้ง การคัดเลือกแผน หรือนโยบายการดำเนินงาน และการวางแผนการผลิต

6. References

[1] Admiraal, H. and Cornaro, A. 2016. Why underground space should be included in urban planning policy - And how this will enhance an urban underground future. **Tunnelling and Underground Space Technology.** 55(2): 214-220.

[2] Chen, Y. and et al. 2019. The impact on neighbourhood residential property valuations of a newly proposed public transport project: the Sydney Northwest Metro case study. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives.** 3: 100070.

[3] Zhang, Q., Liu, Z. and Tan, J. 2019. Prediction of geological conditions for a tunnel boring machine using big operational data. **Automation in Construction.** 100: 73-83.

[4] Huo, J. and et al. 2017. Application of a small-timescale fatigue, crack-growth model to the plane stress/ strain transition in predicting the lifetime of a tunnel-boring-machine cutter head. **Engineering Failure Analysis.** 71: 11-30.

[5] Liu, W. and et al. 2018. Safety risk factors of metro tunnel construction in China: An integrated study with EFA and SEM. **Safety Science.** 105: 98-113.

[6] Moradi, M.R. and Farsangi, M.A.E. 2014. Application of the risk matrix method for geotechnical risk analysis and prediction of the advance rate in rock TBM tunneling. **Rock Mechanics and Rock Engineering.** 47(5): 1951-1960.

[7] Yazdani-Chamzini, A. 2014. Proposing a new methodology based on fuzzy logic for tunnelling risk assessment. **Journal of Civil Engineering and Management.** 20(1): 82-94.

[8] Hyun, K.C. and et al. 2015. Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels. **Tunnelling and Underground Space Technology.** 49: 121-129.

[9] Chung, H. and et al. 2019. Bayesian networks-based shield TBM risk management system: methodology development and application. **KSCE Journal of Civil Engineering.** 23(1): 452-465.

[10] Liu, W., Zhai, S. and Liu, W. 2019. Predictive analysis of settlement risk in tunnel construction: a bow-tie-Bayesian network approach. **Advances in Civil Engineering.** 2019: 2045125.

[11] Chung, H. and et al. 2021. A causal network-based risk matrix model applicable to shield TBM tunneling projects. **Sustainability.** 13(9): 4846.

[12] Sharafat, A., Latif, K. and Seo, J. 2021. Risk analysis of TBM tunneling projects based on generic bow-tie risk analysis approach in difficult ground conditions. **Tunnelling and Underground Space Technology.** 111: 103860.

[13] Singh, M. and et al. 2020. MCDM approach for selection of raw material in pulp and papermaking industry. **Materials and Manufacturing Processes.** 35(3): 241-249.

[14] Nezarat, H., Sereshki, F. and Ataei, M. 2015. Ranking of geological risks in mechanized tunneling by using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP). **Tunnelling and Underground Space Technology.** 50: 358-364.

[15] Yazdani-Chamzini, A., Yakhchali, S.H. and Mahmoodian, M. 2013. Risk ranking of tunnel construction projects by using the ELECTRE technique under a fuzzy environment. **International Journal of Management Science and Engineering Management.** 8(1): 1-14.

[16] Yazdani-Chamzini, A. and Yakhchali, S. H. 2012. Tunnel boring machine (TBM) selection using fuzzy multicriteria decision making methods. **Tunnelling and Underground Space Technology.** 30: 194-204.

[17] Lin, L., Xia, Y. and Wu, D. 2020. A hybrid fuzzy multiple criteria decision-making approach for comprehensive performance evaluation of tunnel boring machine disc cutter. **Computers & Industrial Engineering.** 149: 106793.

[18] Kengpol, A. and Tuammee, S. 2016. The development of a decision support framework for a quantitative risk assessment in multimodal green logistics: An empirical study. **International Journal of Production Research.** 54(4): 1020-1038.

[19] Lo, H.W. and et al. 2020. A hybrid MCDM-based FMEA model for identification of critical failure modes in manufacturing. **Soft Computing.** 24(20): 15733-15745.

[20] Bakioglu, G. and Atahan, A. O. 2021. AHP integrated TOPSIS and VIKOR methods with Pythagorean fuzzy sets to prioritize risks in self-driving vehicles. **Applied Soft Computing.** 99: 106948.

[21] Zhang, H. J., Zhou, Y. and Gan, Q. H. 2019. An extended PROMETHEE-II-based risk prioritization method for equipment failures in the geothermal power plant. **International Journal of Fuzzy Systems.** 21(8): 2490-2509.

[22] Ghorui, N. and et al. 2021. Identification of dominant risk factor involved in spread of COVID-19 using hesitant fuzzy MCDM methodology. **Results in Physics.** 21: 103811.

[23] Koohathongsumrit, N. and Meethom, W. 2021. Route selection in multimodal transportation networks: a hybrid multiple criteria decision-making approach. **Journal of Industrial and Production Engineering.** 38(3): 171-185.

[24] Khorramshahgol, R. and Al-Husain, R. 2021. A GP-AHP approach to design responsive supply chains for pareto customers. **Operations Research Perspectives.** 8: 100172.

[25] Abdel-Basset, M. and et al. 2020. An integrated plithogenic MCDM approach for financial performance evaluation of manufacturing industries. **Risk Management.** 22(3): 192-218.

[26] Kengpol, A., Rontlaong, P. and Tuominen, M. 2013. A decision support system for selection of solar power plant locations by applying fuzzy AHP and TOPSIS: An empirical study. **Journal of Software Engineering and Applications.** 6(9): 470-481.

[27] Wang, L. and et al. 2020. ISA evaluation framework for security of internet of health things system using AHP-TOPSIS methods. **IEEE Access.** 8: 152316-152332.

[28] Karahalios, H. 2017. The application of the AHP-TOPSIS for evaluating ballast water treatment systems by ship operators. **Transportation Research Part D: Transport and Environment.** 52: 172-184.

[29] Sharma, M. and Joshi, S. 2019. Brand sustainability among young consumers: an AHP-TOPSIS approach. **Young Consumers.** 20(4): 314-337.

[30] Noshad, M., Savari, M. and Roueita, G. 2018. A hybrid AHP-TOPSIS method for prospectively modeling of ultrasound assisted osmotic dehydration of strawberry. **Journal of Food Process Engineering.** 41(8): e12928.

[31] Deng, M. 2018. Challenges and thoughts on risk management and control for the group construction of a super-long tunnel by TBM. **Engineering.** 4(1): 112-122.

[32] Qiu, W. and et al. 2020. Establishing a sustainable evaluation indicator system for railway tunnel in China. **Journal of Cleaner Production.** 268: 122150.

[33] Noori, A. M. and et al. 2020. Feasibility of intelligent models for prediction of utilization factor of TBM. **Geotechnical and Geological Engineering.** 38(3): 3125-3143.

[34] Saaty, T.L. 1990. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research.** 48(1): 9-26.

[35] Koohathongsumrit, N. and Meethom, W. 2021. An integrated approach of fuzzy risk assessment model and data envelopment analysis for route selection in multimodal transportation networks. **Expert Systems with Applications.** 171: 114342.

[36] Wang, Z. and et al. 2020. Failure mode and effects analysis using extended matter-element model and AHP. **Computers & Industrial Engineering.** 140: 106233.

[37] Balogun, A.L. and et al. 2017. Fuzzy MCDM-based GIS model for subsea oil pipeline route optimization: An integrated approach. **Marine Georesources & Geotechnology.** 35(7): 961-969.

[38] Chen, T., Lin, Y.C. and Chiu, M.C. 2019. Approximating alpha-cut operations approach for effective and efficient fuzzy analytic hierarchy process analysis. **Applied Soft Computing.** 85: 105855.

[39] Koohathongsumrit, N. 2019. Application of fuzzy logic system based risk assessment to select an optimal multimodal transportation route. **KMUTT Research and Development Journal.** 42(4): 353-374. (*in Thai*)

[40] Hwang, C. and Yoon, K. 1981. **Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey.** Berlin: Springer.

[41] Chen, P. 2021. Effects of the entropy weight on TOPSIS. **Expert Systems with Applications.** 168: 114186.

[42] dos Santos, B.M., Godoy, L.P. and Campos, L.M.S. 2019. Performance evaluation of green suppliers using entropy-TOPSIS-F. **Journal of Cleaner Production.** 207: 498-509.

[43] Dehdasht, G. and et al. 2020. A hybrid approach using entropy and TOPSIS to select key drivers for a successful and sustainable lean construction implementation. **PLoS One.** 15(2): e0228746.

[44] Tarei, P.K., Thakkar, J.J. and Nag, B. 2018. A hybrid approach for quantifying supply chain risk and prioritizing the risk drivers. **Journal of Manufacturing Technology Management.** 29(3): 533-569.

[45] Oz, N.E. and et al. 2018. Risk assessment for clearing and grading process of a natural gas pipeline project: an extended TOPSIS model with Pythagorean fuzzy sets for prioritizing hazards. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal.** 25(6): 1615-1632.

[46] Koohathongsumrit, N. and Meethom, W. 2019. Identifying the key physical characteristics factors of freight transportation routing. **Suranaree Journal of Science and Technology.** 26(4): 454-463.