

การปรับปรุงแบบจำลอง DRASTIC และประเมินความเปราะบางต่อการปนเปื้อน ไนเตรตในน้ำใต้ดิน กรณีศึกษาจังหวัดลพบุรี

Modifying the DRASTIC Model and Groundwater Vulnerability Assessment of Nitrate: A Case Study in Lopburi province

พรกมล สดสะอาด^{1,2} และแอน กัญญา อยุธยา^{1*}

Ponkamol Sodsa-ard^{1,2} and Ann Kambhu Na Ayudhya^{1*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

¹Department of Environmental Technology and Management, Kasetsart University

²กรมทรัพยากรน้ำบาดาล

²Department of Groundwater Resources

*Corresponding author: ann.k@ku.ac.th

Received: June 30, 2023

Revised: September 21, 2023

Accepted: September 28, 2023

บทคัดย่อ

แบบจำลอง DRASTIC มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการประเมินความเปราะบางต่อการปนเปื้อนมลพิษในน้ำใต้ดิน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงแบบจำลองให้มีความแม่นยำและง่ายต่อการใช้งานยิ่งขึ้น โดยปรับปรุงแบบจำลอง DRASTIC ด้วยวิธีน้ำหนักของหลักฐาน (WoE) และเพิ่มปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การปนเปื้อนไนเตรตในน้ำใต้ดินของจังหวัดลพบุรี 4 ปัจจัย ได้แก่ การใช้ประโยชน์ที่ดิน อัตราการซึมผ่านน้ำของดิน ระยะห่างจากแม่น้ำ และความหนาแน่นของแม่น้ำ ซึ่งใช้ผลวิเคราะห์ไนเตรตในน้ำใต้ดินระหว่างปี ค.ศ. 2015-2023 จำนวน 358 บ่อ ที่มีจำนวนไนเตรตเกิน 45 มิลลิกรัมต่อลิตร แบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกปี ค.ศ. 2015-2021 จำนวน 277 บ่อ ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ส่วนที่สองปี ค.ศ. 2021-2023 จำนวน 81 บ่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยวิธี Receiver Operating Characteristic--ROC และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองเดิมกับแบบจำลองปรับปรุงโดยใช้พื้นที่ใต้กราฟ Area Under Curve--AUC พบว่า แบบจำลองที่ปรับปรุงโดย WoE มีค่าความแม่นยำสูงกว่าโดยมีค่า AUC เท่ากับ 0.85 ในขณะที่แบบจำลองเดิมมีค่า AUC เท่ากับ 0.52 ผลลัพธ์ของ ROC แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองปรับปรุงโดยวิธี WoE มีการทำนายที่แม่นยำกว่า DRASTIC แบบเดิม

คำสำคัญ: การประเมินความเปราะบางของน้ำใต้ดิน น้ำหนักของหลักฐาน ไนเตรต แบบจำลอง DRASTIC

Abstract

The DRASTIC model is widely used to assess vulnerability to groundwater contamination. This research aims to improve the model to make it more accurate and user-friendly. To achieve this, the Weight of Evidence--WoE was used to enhance the DRASTIC model, and four factors affecting nitrate contamination in the groundwater of Lop Buri Province were added. These factors were land use, infiltration rate, distance from the river, and density of the waterway. To validate the model, nitrate analysis results from 358 groundwater wells with nitrates exceeding 45 mg/L were used, which were collected between 2015 and 2023. The dataset was divided into two parts: the first part (2015–2021) of 277 wells was used for modeling, and the second part (2022–2023) of 81 wells was used to validate the model using the Receiver Operating Characteristic--ROC method. The performance of the original DRASTIC model was compared with the improved model using the Area Under the Curve--AUC. The results show that the WoE-enhanced model has a higher accuracy with an AUC of 0.85, while the original model has an AUC of 0.52. The ROC analysis confirms that the WOE-enhanced model provides more accurate predictions compared to the original DRASTIC model.

Keywords: Assessment of Groundwater Vulnerability, Weights of Evidence, Nitrate, DRASTIC model



บทนำ

น้ำใต้ดินเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญเนื่องจากปัจจุบันมีการใช้น้ำใต้ดินในกิจกรรมต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากการขยายตัวของประชากรที่เพิ่มขึ้นในการตอบสนองความต้องการของประชากรทำให้มีการขยายตัวของเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม เกษตรกรรม การขยายตัวของเขตเมืองและการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน ทำให้เกิดผลกระทบที่ตามมา คือ ปัญหาสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น การปล่อยน้ำเสียของภาคอุตสาหกรรม คริวเรือนและภาคเกษตรกรรม การกระทำเหล่านี้ส่งผลทำให้เกิดความเสื่อมโทรมของชั้นน้ำใต้ดินได้ จังหวัดลพบุรีตั้งอยู่ทางภาคกลางของประเทศไทยเป็นจังหวัดที่มีสัดส่วนในการใช้ที่ดินในการเกษตรกรรมมากที่สุด และจังหวัดลพบุรียังมีศักยภาพด้านการปศุสัตว์โดยพื้นที่กิจกรรมด้านปศุสัตว์กระจายอยู่ในทุกอำเภอ อีกทั้งยังมีการเติบโตของอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง โดยภาคอุตสาหกรรมในจังหวัดลพบุรีส่วนใหญ่จะเป็นอุตสาหกรรมเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งการทำเกษตรกรรม การปศุสัตว์ และอุตสาหกรรมเหล่านี้เป็นแหล่งในการก่อให้เกิดการปนเปื้อน

ของมลพิษในเตรตในแหล่งน้ำใต้ดินถือเป็นปัญหาร้ายแรงของการจัดการทรัพยากรน้ำใต้ดิน

ในเตรตที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำใต้ดินส่วนใหญ่เกิดจากฝีมือมนุษย์ เช่น การใส่ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ ที่มากเกินไปจนความจำเป็นซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ได้แค่เพียงเล็กน้อยทำให้ส่วนที่เหลือเกิดการปนเปื้อนในระบบนิเวศ การทำปศุสัตว์ การรั่วไหลของน้ำจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน หรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากสารประกอบไนโตรเจนหลายชนิดถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เช่น แอมโมเนีย กรดไนตริก ยูเรีย เป็นต้น สารประกอบเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ การผลิตสีย้อม และการแปรรูป (Chotpantar, Parkchai & Wisitthammassri, 2020; Ducci, Della Morte, Mottola, Onorati & Pugliano, 2019; Nakagawa, Amano, Persson & Berndtsson, 2021; Wang, Chen, Li, Guo & Jiang, 2020) การเกิดไนเตรตสามารถอธิบายได้จากวัฏจักรไนโตรเจนโดยไนโตรเจนนั้นเป็นองค์ประกอบสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตซึ่งแบคทีเรียมีส่วนสำคัญในการทำให้เกิดปฏิกิริยาไนตริฟิเคชัน (Nitrification) เกิดไนเตรตและ

โนเตรต (Cabello, Roldan & Moreno-Vivian, 2004) การกระทำของมนุษย์ที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า เป็นสาเหตุหนึ่ง ในการทำให้เกิดการปนเปื้อนของไนเตรตในน้ำใต้ดินและ อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ โดยมาตรฐาน น้ำดื่มองค์การอนามัยโลกกำหนดปริมาณไนเตรตในน้ำดื่ม ไว้ไม่เกิน 45 มิลลิกรัมต่อลิตร หากมนุษย์ได้รับไนเตรตใน ปริมาณมากอาจทำให้เสี่ยงต่อโรคมะเร็งท่อน้ำลาย โมโกลบินใน เด็กทารก (Lee et al., 2021)

การอนุรักษ์และพัฒนาแหล่งน้ำใต้ดินให้ยั่งยืนนั้น ต้องสามารถรับรู้และระบุได้ว่าบริเวณนั้นมีความเสี่ยงที่จะได้รับ การปนเปื้อนของมลพิษมากหรือน้อยเพียงใด การประเมิน ความเปราะบางต่อการปนเปื้อนมลพิษของน้ำใต้ดินจึงเข้า มาเป็นเครื่องมือสำคัญในการประเมินและป้องกันมลพิษที่ จะปนเปื้อนในแหล่งน้ำใต้ดิน แบบจำลอง DRASTIC เป็น หนึ่งในวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดสำหรับการประเมิน ความเปราะบาง แบบจำลอง DRASTIC ใช้ปัจจัยทาง อุทกธรณีวิทยา 7 ปัจจัยโดยให้ค่าถ่วงน้ำหนักและคะแนน ของแต่ละปัจจัย (Aller, Bennett, Jay & Rebecca, 1987) แบบจำลอง DRASTIC เป็นการประเมินความเปราะบางในชั้น หินอุ้มน้ำ โดยพิจารณาเพียงแค่ลักษณะทางอุทกธรณีวิทยา ของชั้นหินอุ้มน้ำและไม่พิจารณาถึงลักษณะของมลพิษและ กิจกรรมของมนุษย์ อีกทั้งแบบจำลอง DRASTIC อาศัยการ ใช้ดุลยพินิจของผู้สร้างแบบจำลองและอาศัยมาตรฐานบางส่วน ในการกำหนดน้ำหนักและการให้คะแนนของปัจจัย เช่น อ้างอิงตาม (Aller et al., 1987) และความคิดเห็นของผู้ เชี่ยวชาญ ซึ่งทำให้ความแน่นอนต่ำ ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนา แบบจำลอง DRASTIC ขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแบบ แบบจำลอง DRASTIC โดยสามารถแบ่งการปรับปรุงประสิทธิภาพ ของแบบจำลองเป็นสองแนวทาง แนวทางแรก เป็นการเพิ่ม หรือลดปัจจัยของแบบจำลอง เช่น การใช้ประโยชน์ที่ดิน ความหนาของชั้นหินอุ้มน้ำ รอยเลื่อนทางธรณีวิทยา เป็นต้น (Goyal, Haritash & Singh, 2021) แนวทางที่ สอง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการปรับเปลี่ยนน้ำหนัก และคะแนนของปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่าถ่วงน้ำหนัก และคะแนนทำได้หลายวิธี เช่น แบบจำลอง Projection Purse Dynamic Clustering--PPDC (Jia et al., 2019) การนำวิธีทางสถิติมาใช้ Frequency Ratio--FR Weights of Evidence--WoE Shannon Entropy--SE เป็นต้น

(Khosravi, Sartaj, Karimi, Levison & Lotfi, 2021; Lakshminarayanan, Ramasamy, Anuthaman & Karuppanan, 2021)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ ของแบบจำลองให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้นจากแบบจำลอง DRASTIC เดิม จึงได้มีการเพิ่มปัจจัยของแบบจำลองได้ ได้แก่ ระยะห่างจากแม่น้ำ ความหนาแน่นของแม่น้ำ การ ใช้ประโยชน์ที่ดิน และอัตราการซึมผ่านตามชุดดินในพื้นที่ จังหวัดลพบุรี อีกทั้งยังมีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักและคะแนน ใหม่ด้วยวิธี WoE โดยเพิ่มปัจจัย 4 ปัจจัย การศึกษานี้จะ แบ่งเป็นสามส่วน ส่วนที่หนึ่ง เป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลดิบ จากหน่วยงานต่าง ๆ ส่วนที่สอง การวิเคราะห์ข้อมูลโดย การสร้างแบบจำลอง DRASTIC แบบเดิม และแบบจำลอง DRASTIC โดยวิธี WoE ส่วนที่สาม เป็นการตรวจสอบความ ถูกต้องและการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง DRASTIC แบบเดิมกับแบบจำลอง DRASTIC ที่ได้จากปรับปรุง งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการประเมินความ เปราะบางต่อการปนเปื้อนไนเตรตในแหล่งน้ำใต้ดินของ แบบจำลอง DRASTIC และประเมินความเปราะบางต่อการ ปนเปื้อนของไนเตรตในน้ำใต้ดินในจังหวัดลพบุรีเพื่อเป็น แนวทางในการอนุรักษ์และฟื้นฟูให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา

จังหวัดลพบุรีตั้งอยู่ทางภาคกลางของประเทศไทย มีขนาดพื้นที่ประมาณ 6,199.782 ตารางกิโลเมตร ตั้ง อยู่ระหว่างพิกัด ระบบ UTM WGS1984 Zone 47N ที่ 65270E ถึง 758070E และ 1619822N ถึง 1742725N สภาพภูมิประเทศของจังหวัดมีลักษณะพื้นที่เป็นภูเขาสูง อยู่ทางทิศเหนือและทิศตะวันออก ส่วนพื้นที่ทิศตะวันตก เป็นพื้นที่ราบบริเวณกว้างมีแม่น้ำลพบุรีไหลผ่าน การใช้ ประโยชน์ที่ดินส่วนใหญ่ของจังหวัดจะเป็นพื้นที่เกษตรกรรม คิดเป็นร้อยละประมาณ 70.68 ของพื้นที่จังหวัด ซึ่งการแบ่ง เขตการปกครอง ดังภาพ 1



ภาพ 1 พื้นที่ศึกษา

2. การวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละปัจจัยของแต่ละชั้นข้อมูล

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลของแต่ละปัจจัยในแบบจำลอง DRASTIC แบบเดิมซึ่งจะใช้ปัจจัย 7 ปัจจัยประกอบด้วย ความลึกของชั้นน้ำใต้ดิน (D) อัตราการเติมน้ำสู่ทิว (R) คุณสมบัติของชั้นหินอุ้มน้ำ (A) คุณสมบัติของดิน (S) ความลาดชันของภูมิประเทศ (T) อิทธิพลของเขตอิมมิกอากาศ (vadose zone) (I) และสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นน้ำใต้ดิน (C) สำหรับในการปรับปรุงแบบจำลองได้มีการเพิ่มปัจจัยอีก 4 ปัจจัย คือ การใช้ประโยชน์ที่ดิน (LU) อัตราการซึมผ่านของน้ำ (IF) ระยะห่างจากแม่น้ำ (DR) และความหนาแน่นของแม่น้ำ (RD) โดยรวบรวมข้อมูลทุติยภูมิแต่ละชั้นของปัจจัยทั้งหมดจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ และข้อมูลปัจจัยทั้งหมดจะถูกแปลงให้เป็นข้อมูลเชิงพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ ซึ่งสามารถสรุปกระบวนการในการวิจัยได้ดังภาพ 2 โดยอธิบายอย่างละเอียด ดังนี้

การวิเคราะห์ชั้นข้อมูลความลึกของระดับน้ำ (D) โดยใช้ข้อมูลจากบ่อน้ำใต้ดินจำนวน 752 บ่อ จากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล นำข้อมูลที่ได้มาทำการสร้างข้อมูลเชิงพื้นที่โดยการประเมินค่าแบบช่วงด้วยวิธีค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Inverse Distance Weighted-IDW) จาก ArcMap 10.5

การวิเคราะห์ชั้นข้อมูลอัตราการเติมน้ำสู่ทิว (R) โดยคำนวณได้จากปริมาณน้ำฝน (rainfall) จากสถานีตรวจวัดทั้ง 22 สถานี โดยนำปริมาณน้ำฝนของแต่ละสถานีมาทำการสร้างข้อมูลเชิงพื้นที่โดยการประเมินค่าแบบช่วงด้วยวิธี IDW ร้อยละความลาดชันของพื้นที่ (slope) จากแบบจำลองระดับความสูงเชิงตัวเลข (DEM) และระดับการซึมน้ำของดิน (soil permeability) การคำนวณอัตราการเติมน้ำสู่ทิวดังกล่าวที่ 1 ซึ่งใช้กระบวนการระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์โดยวิธีผลรวมถ่วงน้ำหนัก (Piscopo, 2001)

$$R = \text{Rainfall} + \text{Slope\%} + \text{Soil permeability} \quad (1)$$

การวิเคราะห์ชั้นข้อมูลคุณสมบัติของชั้นหินอุ้มน้ำ (A) การวิเคราะห์ชั้นข้อมูลคุณสมบัติชั้นดิน (S) นำเข้าข้อมูลชุดดินพิจารณาตามลักษณะของเนื้อดิน และการวิเคราะห์ชั้นข้อมูลของการใช้ประโยชน์ที่ดิน (LU) โดยนำเข้าข้อมูลในรูปแบบ Shape file (.shp) จากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล และกรมพัฒนาที่ดิน

การวิเคราะห์ชั้นข้อมูลความลาดชันของภูมิประเทศ (T) หาจาก DEM โดยข้อมูลได้มาจากฐานข้อมูลของ USGS ความละเอียด 30 เมตร และทำการหาร้อยละความลาดชันในโปรแกรม ArcMap

การวิเคราะห์ชั้นข้อมูลอิทธิพลของเขตอ้อมอากาศ (I) ซึ่งเป็นการนำเข้าสู่ข้อมูลจากบ่อน้ำใต้ดินที่มีรายละเอียดหลุมเจาะน้ำใต้ดิน (geologic log of borehole) บอกถึงลักษณะของชั้นดินชั้นหินของหลุมเจาะจำนวน 77 บ่อ ซึ่งในพื้นที่จังหวัดลพบุรีอิทธิพลของเขตอ้อมอากาศนั้นมีชั้นตะกอน ดิน และทราย ปะปนกันทำให้ไม่สามารถระบุได้แน่ชัดว่าจัดเป็นชนิดไหนจึงได้ใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยแบบฮาร์โมนิก (Harmonic) ดังสมการที่ 2

$$I_r = \frac{T}{\sum_{i=1}^N \frac{T_i}{I_r}} \quad (2)$$

เมื่อ I, T, I_r และ T_i คือ น้ำหนักเฉลี่ยแบบฮาร์โมนิกของเขตอ้อมอากาศ ความหนาแต่ละชั้นของเขตอ้อมอากาศ ค่ะแนวนของชั้น i และ ความหนาชั้น i ของเขตอ้อมอากาศ (Anantha Rao, Naik, Jain, Vinod Kumar & Dhanamjaya Rao, 2018; Hussain, 2004) ตามลำดับ โดยการให้คะแนนชั้น I อ้างอิงตาม (Aller, Bennett, Jay & Rebecca, 1987; Hussain, 2004)

การวิเคราะห์ชั้นข้อมูลสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นน้ำใต้ดิน (C) ในการศึกษาจะนำเข้าสู่ข้อมูลจุดของบ่อน้ำใต้ดินที่มีการสุบทดสอบของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ทำการประเมินค่าแบบช่วงของข้อมูลสัมประสิทธิ์ของการจ่ายน้ำ (transmissivity) และความหนาของชั้นหินให้น้ำโดยวิธี IDW และประมวลผลค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านโดยโปรแกรม ArcMap

$$K = T/b \quad (3)$$

เมื่อ K, T และ b คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (m/d) ค่าสัมประสิทธิ์ของการจ่ายน้ำ (m²/d) และความหนาของชั้นหินให้น้ำ (m) (Hamza, Ahsan & Sulaiman, 2019) ตามลำดับ

การวิเคราะห์ชั้นข้อมูลของอัตราการซึมผ่านโดยใช้หลักการของ Green-Ampt นำข้อมูลที่ได้จากการสืบค้นองค์ประกอบของดิน ได้แก่ ทราย ดินร่วน ดินเหนียว ตามกลุ่มชุดดิน มาทำการหาค่าของพารามิเตอร์ของสมการ Green-Ampt ในโปรแกรม HYDRUS-1D ทำการคำนวณ

เพื่อหาอัตราการซึมผ่าน ตามสมการที่ 4 นำเข้าสู่ข้อมูลอัตรา การซึมผ่านที่คำนวณได้เข้าในโปรแกรม ArcMap

$$I(t) = K(h_0)t + \Delta h \Delta \theta \ln \left(1 + \frac{I(t)}{\Delta h \Delta \theta} \right) \quad (4)$$

การวิเคราะห์ชั้นข้อมูลระยะห่างจากแม่น้ำและชั้นข้อมูลความหนาแน่นของแม่น้ำ โดยนำเข้าสู่ข้อมูลในรูปแบบ Shape file ใช้คำสั่ง Euclidean Distance และ Line Density ใน ArcMap สามารถสรุปกระบวนการและแหล่งที่มาในการสร้างชั้นข้อมูลได้ตามตาราง 1

3. การประเมินความเปราะบางต่อการปนเปื้อนของมลพิษในเตรตโดยวิธีการใช้แบบจำลอง DRASTIC แบบเดิม

วิเคราะห์ DRASTIC แบบเดิม นำข้อมูลเชิงพื้นที่ของแต่ละปัจจัยที่ผ่านการวิเคราะห์ข้อมูลโดยโปรแกรม ArcMap ทั้ง 7 ปัจจัย ข้อมูลแต่ละชั้นข้อมูลจะอยู่ในรูปแบบราสเตอร์ จากนั้นทำการซ้อนทับกันโดยใช้โปรแกรม ArcMap ตามสมการที่ 5

$$DRASTIC = D_w + R_w + A_w + S_w + T_w + I_w + C_w \quad (5)$$

เมื่อ w และ r คือ ค่าถ่วงน้ำหนักและค่าคะแนนตามลำดับ

ซึ่งค่าคะแนนของแต่ละปัจจัยจะอยู่ในช่วง 1-10 และค่าถ่วงน้ำหนักจาก 1-5 แสดงดังตาราง 2

4. การประเมินความเปราะบางต่อการปนเปื้อนของมลพิษในเตรตโดยแบบจำลอง DRASTIC วิธีน้ำหนักของหลักฐาน (Weights of Evidence, WoE) 11 ปัจจัย

หลังจากการวิเคราะห์ชั้นข้อมูลของทั้ง 11 ปัจจัย ข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วย WoE ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ระหว่างตำแหน่งของการปนเปื้อนในเตรตในน้ำใต้ดินและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการปนเปื้อนในเตรตในน้ำใต้ดิน โดยจะกำหนดให้ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปนเปื้อนในเตรตเป็น “หลักฐาน” และการเกิดของตำแหน่งที่พบการปนเปื้อน

ในเตรตบนหลักฐานด้วยความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ประเมินว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการปนเปื้อนส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนในเตรตในน้ำใต้ดินในอดีต ซึ่งความ

สัมพันธ์ดังกล่าวคือ ค่าน้ำหนักเชิงบวก (W^+) และค่าน้ำหนักเชิงลบ (W^-) ตามสมการที่ 6 และ 7 โดยค่าน้ำหนักเชิงบวก (W^+) จะแสดงให้เห็นถึงช่วงของปัจจัยนั้น ๆ อยู่ในบริเวณที่มีการปนเปื้อนของไนเตรตซึ่งค่ากำหนดคือมากกว่า 45 mg/L แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างช่วงของปัจจัยนั้น ๆ กับบริเวณที่ปนเปื้อน และค่าน้ำหนักเชิงลบ (W^-) จะแสดงให้เห็นถึงช่วงของปัจจัยนั้น ๆ ไม่ได้อยู่ในบริเวณที่มีการปนเปื้อนของไนเตรต แสดงถึงระดับความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างช่วงของปัจจัยนั้น ๆ กับบริเวณที่ปนเปื้อน

$$w^+ = \ln \frac{P(B/D)}{P(B/D^*)} \quad (6)$$

$$w^- = \ln \frac{P(B^*/D)}{P(B^*/D^*)} \quad (7)$$

เมื่อ P , W^+ และ W^- คือ ความน่าจะเป็น น้ำหนักเชิงบวก และน้ำหนักเชิงลบ ตามลำดับ

B และ B^* คือ การมีปัจจัยในการประเมินความเปราะบางของน้ำใต้ดิน และการไม่มีปัจจัยในการประเมินความเปราะบางของน้ำใต้ดิน ตามลำดับ

D และ D^* บริเวณที่ปนเปื้อน (พิกเซล) และบริเวณที่ไม่ปนเปื้อน (พิกเซล) ตามลำดับ

$$c = w^+ - w^- \quad (8)$$

ค่าความต่างระหว่างของน้ำหนัก (C) มีค่าเป็นบวก แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงพื้นที่เป็นบวกและค่าเป็นลบ แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงพื้นที่เป็นลบ

$$S(C) = \sqrt{S^2W^+ + S^2W^-} \quad (9)$$

เมื่อ $S(C)$ คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของน้ำหนักทั้งสองโดยคำนวณจากค่าความแปรปรวนของน้ำหนักบวก (S^2W^+) และความแปรปรวนของน้ำหนักลบ (S^2W^-)

$$WoE = C/S(C) \quad (10)$$

ค่า WoE สุดท้ายคำนวณได้จากอัตราส่วนของค่าความต่างระหว่างน้ำหนักทั้งสอง (C) ต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $S(C)$ ตามสมการที่ 6-10 หากค่า WoE เป็นบวก แสดงให้เห็นว่ากลุ่มของปัจจัยดังกล่าวมีอิทธิพลต่อการปน

เปื้อนไนเตรต ในทางกลับกันหากค่าน้ำหนักหลักฐานเป็นลบ แสดงให้เห็นว่ากลุ่มของปัจจัยดังกล่าวไม่มีอิทธิพลต่อการปนเปื้อนไนเตรต (Armas, 2011; Pourghasemi, Pradhan, Gokceoglu, Mohammadi & Moradi, 2012; Rahmati, Pourghasemi & Zeinivand, 2015) นำ WoE 11 ปัจจัยมาสร้างแบบจำลอง DRASTIC ปรับปรุง (MoDRASTIC) ดังสมการที่ 11

$$MoDRASTIC = D_{WE} + R_{WE} + A_{WE} + S_{WE} + T_{WE} + I_{WE} + C_{WE} + LU_{WE} + IF_{WE} + DR_{WE} + RD_{WE} \quad (11)$$

เมื่อ WE คือ น้ำหนักของหลักฐาน (WoE)

5. การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยวิธี Receiver Operating Characteristic--ROC

การประเมินความเปราะบางต่อการปนเปื้อนของไนเตรตในน้ำใต้ดินโดยแบบจำลอง DRASTIC แบบเดิม 7 ปัจจัย และแบบจำลอง MoDRASTIC จะถูกนำมาประเมินประสิทธิภาพด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี ROC และการวิเคราะห์พื้นที่ใต้กราฟ (Area Under Curve, AUC) ซึ่งการดำเนินการวิเคราะห์พื้นที่ใต้กราฟด้วยวิธี ROC จะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง True positive rate (TPR) และ False positive rate (FPR) ตามสมการที่ 12 และ 13

$$TPR = TP / (TP+FN) \quad (12)$$

$$FPR = FP / (FP+TN) \quad (13)$$

เมื่อ True positive rate (TPR) คือ ประสิทธิภาพแบบจำลองเมื่อแบบจำลองเตือนระดับความเปราะบางต่อการเกิดการปนเปื้อนไนเตรต โดยค่าที่ดีที่สุดเท่ากับ 1

False positive rate (FPR) คือ ความผิดพลาดของแบบจำลองเมื่อไม่มีการเตือนระดับความเปราะบางต่อการเกิดการปนเปื้อนไนเตรต โดยค่าที่ดีที่สุดเท่ากับ 0

True Positive--TP คือ แบบจำลองมีความเสี่ยงที่จะปนเปื้อนและเกิดการปนเปื้อนขึ้นจริง

False Positive--FP คือ แบบจำลองมีความเสี่ยงที่จะปนเปื้อนแต่ไม่เกิดการปนเปื้อนขึ้นจริง

True Negative--TN คือ แบบจำลองไม่มีความเสี่ยงที่จะปนเปื้อนและไม่เกิดการปนเปื้อนขึ้นจริง

False Negative--FN คือ แบบจำลองไม่มีความเสี่ยงที่จะปนเปื้อนแต่เกิดการปนเปื้อนขึ้นจริง

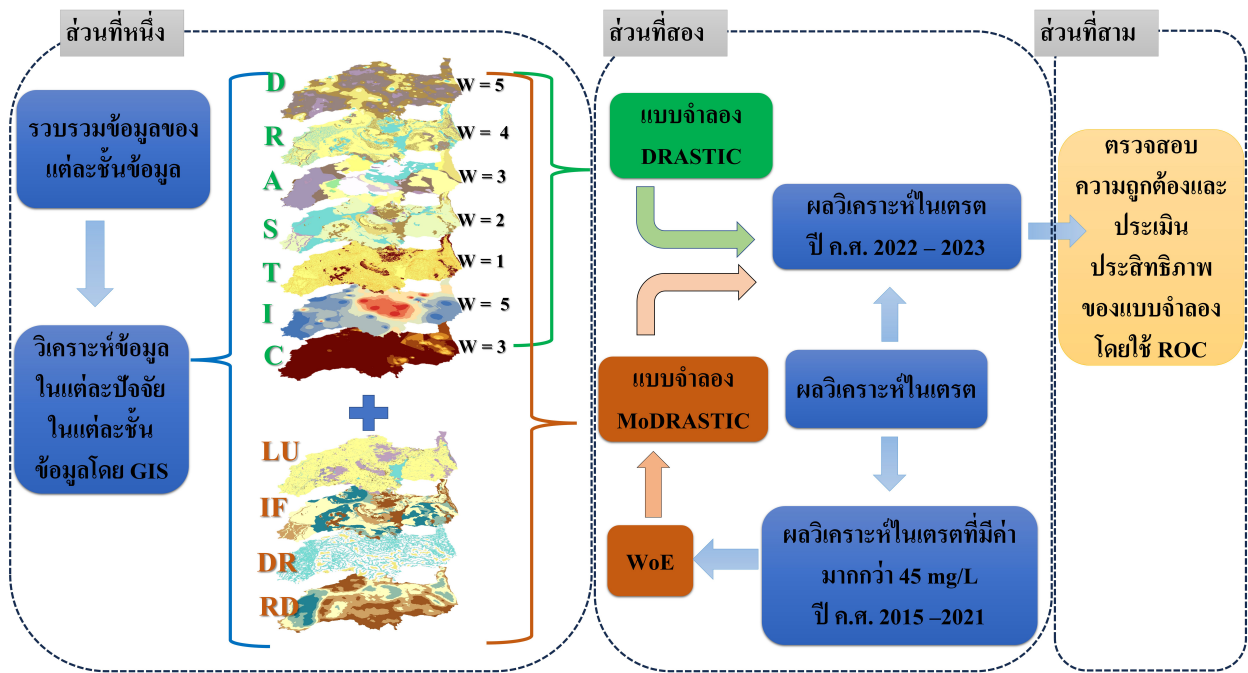
การวิเคราะห์พื้นที่ใต้กราฟ ROC ระหว่าง True positive rate (TPR) และ False positive rate (FPR) จะใช้ค่าคะแนนที่ได้จากแบบจำลอง DRASTIC กำหนดเป็นจุดตัดเพื่อแบ่งผลลัพธ์ออกเป็น 2 ค่า ได้แก่ ค่า 0 และ 1 กล่าว คือ เมื่อผลลัพธ์มีค่าต่ำกว่าค่าจุดตัดจะแทนด้วย 0

(Negative) และ เมื่อผลลัพธ์มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับจุดตัดจะแทนด้วย 1 (Positive) โดยค่าพื้นที่ใต้กราฟ (Area Under Curve--AUC) จะบ่งบอกความถูกต้องของแบบจำลอง และแบบจำลองที่มีค่า AUC มากกว่าจะมีประสิทธิภาพที่มากกว่า (Gajowniczek & Ząbkowski, 2014; Fan, Upadhye & Worster, 2006; Frage, Melville & Wright, 2007; Sarakarn & Munpolsri, 2021)

ตาราง 1

แหล่งที่มาของข้อมูลและกระบวนการวิเคราะห์ของแต่ละปัจจัย

ปัจจัย	แหล่งข้อมูล	กระบวนการ/แผนที่
ความลึกของชั้นน้ำใต้ดิน (D)	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล	การประเมินค่าแบบช่วงด้วยวิธีค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (IDW)
อัตราการเติมน้ำสู่หิ (R)	กรมพัฒนาที่ดิน กรมอุตุนิยมวิทยาและฐานข้อมูล USGS	ผลรวมถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum) ในกระบวนการ GIS
คุณสมบัติของชั้นหินอุ้มน้ำ (A)	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล	แผนที่ชั้นหินอุ้มน้ำ (.shp)
คุณสมบัติของดิน (S)	กรมพัฒนาที่ดิน	แผนที่ชุดดิน (.shp)
ความลาดชันของภูมิประเทศ (T)	ฐานข้อมูล USGS (USGS, 2014)	Slope ในกระบวนการ GIS
อิทธิพลของเขตอ้อมอากาศ (I)	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล	ค่าเฉลี่ยแบบฮาร์มอนิก (Hussain, 2004)
สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นน้ำใต้ดิน (C)	กรมทรัพยากรน้ำบาดาล (Department of Groundwater Resources, 2007)	หาค่า $K = T/b$
การใช้ประโยชน์ที่ดิน (LU)	กรมพัฒนาที่ดิน	แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน (.shp)
อัตราการซึมผ่านของน้ำ (IF)	กรมพัฒนาที่ดิน	สมการ Green-Ampt
ระยะห่างจากแม่น้ำ (DR)	(Satira & Kanasri, n.d)	Euclidean Distance ในกระบวนการ GIS
ความหนาแน่นของแม่น้ำ (RD)	กรมทรัพยากรน้ำ (Department of Water Resources, 2020)	Line Density ในกระบวนการ GIS



ภาพ 2 กระบวนการในการวิจัย

ผลและอภิปรายผล

1. การวิเคราะห์ข้อมูลแต่ละปัจจัยของแต่ละชั้นข้อมูล

การวิเคราะห์ปัจจัยทั้ง 11 ปัจจัยให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลราสเตอร์โดยใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีความสัมพันธ์ต่อการปนเปื้อนของไนเตรตในน้ำใต้ดินโดยพิจารณาลักษณะทางอุทกธรณี เช่น อนุภาคของตัวกลางในการไหลผ่านของสาร เช่น เม็ดดิน ชั้นหินให้น้ำ เขตอิมมิกชัน และระยะทางในการเคลื่อนที่ของไนเตรตไปยังน้ำใต้ดิน เป็นต้น ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบราสเตอร์พบว่า ปัจจัยความลึกของระดับน้ำใต้ดินที่พบส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 4.57–5.14 เมตร คิดเป็นร้อยละ 40 ของพื้นที่ ตามภาพ 3ก ปัจจัยอัตราการเติมน้ำสุทธิเป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงความสามารถในการแพร่กระจายของมลพิษส่วนใหญ่ที่พบในจังหวัดลพบุรีอยู่ในช่วง 5-7 ร้อยละ 64.56 ของพื้นที่ ตามภาพ 3ข โดยส่วนใหญ่อยู่ในบริเวณที่มีปัจจัยของคุณสมบัติชั้นดินเป็นดินร่วนปนดินเหนียวพบร้อยละ 48.75 ของพื้นที่ ซึ่งส่วนมากพบบริเวณอำเภอหนองม่วง เมืองลพบุรี และท่าหลวง ตามภาพ 3ค ปัจจัยของชั้นหินอุ้มน้ำในพื้นที่ศึกษาร้อยละ 20.08 ของพื้นที่เป็นชั้นหินอุ้มน้ำชนิดหินภูเขาไฟ (Vc) กระจายอยู่หลายอำเภอในจังหวัดลพบุรี ในขณะที่ความลาดชันของจังหวัดลพบุรีส่วนใหญ่มีความลาดชันร้อยละ 0-2 กระจายตัวทั่วจังหวัดลพบุรี ตามภาพ 3จ และทั้งนี้ยังได้เพิ่มชั้นข้อมูลการ

ใช้ประโยชน์ที่ดินเนื่องจากมลพิษมีความสัมพันธ์กับการใช้ประโยชน์ที่ดิน เช่น ผลกระทบจากการระบายน้ำเสียของชุมชน อุตสาหกรรม และการชลประทานของภาคเกษตร เป็นต้น ส่งผลให้มลพิษเกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับประเภทของการใช้ประโยชน์ที่ดิน เพื่อที่จะพิจารณาถึงแหล่งกำเนิดและธรรมชาติของมลพิษจึงได้เพิ่มปัจจัยการใช้ประโยชน์ที่ดินเข้ามา (Elmeknassi et al., 2021) ซึ่งพบว่า สัดส่วนการใช้ประโยชน์ที่ดินของจังหวัดลพบุรีส่วนใหญ่เป็นเกษตรกรรมคิดเป็นร้อยละ 73.61 ตามภาพ 3ก ในส่วนของปัจจัยระยะห่างจากแม่น้ำและความหนาแน่นของแม่น้ำเป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการปนเปื้อนของมลพิษเนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างแม่น้ำกับน้ำใต้ดิน (O'Driscoll, Johnson & Mallinson, 2010; Trauth et al., 2018) พบว่า ระยะห่างจากแม่น้ำในช่วง 398-1,325 เมตร ร้อยละ 50.48 ของพื้นที่ กระจายอยู่ทั่วจังหวัดลพบุรี ตามภาพ 3ข และปัจจัยอัตราการซึมเป็นกระบวนการกำหนดปริมาณน้ำจากน้ำฝน การชลประทาน หรือการปนเปื้อนของสารเข้าสู่ดิน โดยพบว่าส่วนใหญ่จังหวัดลพบุรีช่วงอัตราการซึมผ่านเท่ากับ 1.89-2.53 เซนติเมตรต่อชั่วโมง ตามภาพ 3ค และผลลัพธ์ในการสร้างชั้นข้อมูลของปัจจัยต่าง ๆ และสัดส่วนของพื้นที่เป็นตามภาพ 3

2. การประเมินความเปราะบางต่อการปนเปื้อนของมลพิษไนเตรตโดยวิธีการใช้แบบจำลอง DRASTIC แบบเดิม

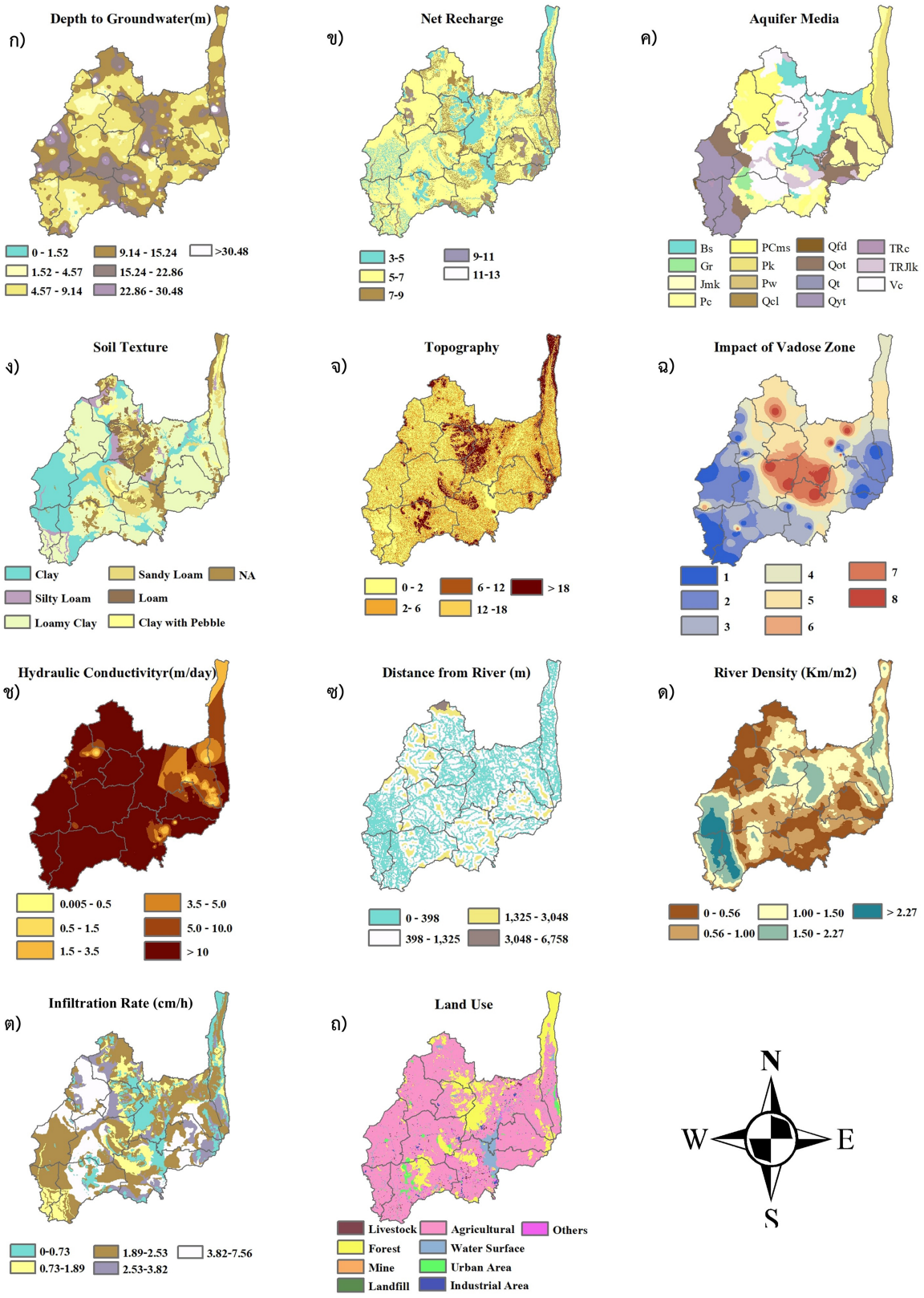
หลังจากทำการแบ่งช่วงชั้นข้อมูลของปัจจัย โดยช่วงชั้นข้อมูลของแต่ละปัจจัยจะมีการให้คะแนนตามความสัมพันธ์ต่อการเกิดมลพิษจากคะแนนมากไปน้อย ซึ่งคะแนนที่มาก หมายถึง ช่วงชั้นปัจจัยนั้นมีความเปราะบางต่อการปนเปื้อนของมลพิษมากและทำการซ้อนทับชั้นข้อมูลของแต่ละปัจจัย โดยระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ให้อยู่ในขอบเขตพื้นที่จังหวัดลพบุรีซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษา ผลลัพธ์ที่ออกมามีค่าความเปราะบางต่อการปนเปื้อนของมลพิษไนเตรตตั้งแต่ 60-184 ซึ่งทำการแบ่งช่วงของข้อมูลโดยใช้คำสั่ง Reclassify แบ่งลักษณะของช่วงแบบ Natural Breaks (Jenks) เป็น 5 ระดับ คือ ต่ำ ค่อนข้างต่ำ ปานกลาง ค่อนข้างสูง และสูง ตามภาพ 4 พบว่า ในจังหวัดลพบุรีส่วนใหญ่มีค่าความเปราะบางต่อการปนเปื้อนมลพิษไนเตรตในระดับปานกลางมีค่าเท่ากับ 113-127.11 กระจายครอบคลุมทั่วจังหวัดคิดเป็นร้อยละ 32.37 ของพื้นที่ทั้งหมด ค่าความเปราะบางระดับค่อนข้างต่ำมีค่าเท่ากับ 97.93-113 คิดเป็นร้อยละ 22.81 ของพื้นที่ พบส่วนใหญ่ในบริเวณอำเภอเมืองลพบุรี บ้านหมี่ โคกสำโรง และชัยบาดาลเนื่องจากลักษณะเนื้อดินในบริเวณดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นดินเหนียวที่เกิดจากการทับถมของตะกอนลำน้ำจากแม่น้ำลพบุรีพบในเขตอำเภอเมือง ท่าวัง และบ้านหมี่ อีกทั้งยังเป็นบริเวณที่มีคะแนนเขตอ้อมอากาศค่อนข้างต่ำ ซึ่งเขตอ้อมอากาศเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการปนเปื้อนของไนเตรตซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถของตัวกลางในการยอมให้น้ำซึมผ่าน พิจารณาจากขนาดอนุภาคตัวกลาง ชนิดของตัวกลาง รอยแตกของตัวกลางและรวมถึงความหนาของชั้นเขตอ้อมอากาศ อีกทั้งยังเป็นบริเวณที่มีความลึกของระดับน้ำใต้ดินที่สูงในบริเวณอำเภอบ้านหมี่จึงทำให้ค่าความเปราะบางต่อการปนเปื้อนของมลพิษไนเตรตค่อนข้างต่ำ ในส่วนค่าความเปราะบางต่อการปนเปื้อนมลพิษไนเตรตในระดับสูงมีค่าเท่ากับ 143.15-184 ปกคลุมบริเวณตอนกลางของจังหวัดคิดเป็นร้อยละ 9.44 ของพื้นที่ จังหวัดลพบุรี เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีคะแนนชั้นข้อมูลเขตอ้อมอากาศที่สูงเป็นบริเวณที่ชั้นหินเป็นหินบะซอลต์ ซึ่งหินบะซอลต์เกิดจากการแข็งตัวของลาวา ลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างของหินบะซอลต์ขึ้นอยู่กับการก่อตัวของหินและการเย็นตัวของหิน โดยมีหลายลักษณะ เช่น พื้นผิวเรียบเนื้อละเอียด พื้นผิวที่มีรูพรุน เป็นต้น ซึ่งทำให้ความสามารถในการซึมผ่านของหินบะซอลต์นั้นจะมีความแปรผันสูงขึ้นอยู่กับ

กับหลายปัจจัย เช่น อัตราการเย็นตัวของลาวา การแตกหักของชั้นหิน (Navarro, Taramoto, Engelbrcht & Kiang, 2020) เป็นต้น

3. การประเมินความเปราะบางต่อการปนเปื้อนของมลพิษไนเตรตโดยแบบจำลอง MoDRASTIC

การสร้างแบบจำลอง MoDRASTIC ด้วยวิธี WoE ระบุความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่พบปริมาณไนเตรตเกินมาตรฐานน้ำบาดาล คือ มากกว่า 45 มิลลิกรัมต่อลิตรกับกลุ่มของปัจจัย 11 ปัจจัย จะเห็นว่า ปัจจัยความลึกของระดับน้ำใต้ดินช่วง 9.14-15.24 มีอิทธิพลมากที่สุด (WoE=1.05) ในขณะที่ความลึกของระดับน้ำใต้ดินช่วง 15.24-22.86 มีอิทธิพลต่ำต่อการปนเปื้อน (WoE=-1.34) อัตราการเติมน้ำสุทธิต่อการปนเปื้อนมากที่สุด (WoE=2.38) ชั้นหินให้น้ำหินคาร์บอนเตยุคเพอร์เมียน (Pc) มีอิทธิพลมากที่สุด (WoE=1.89) อิทธิพลของชั้นดินที่มีผลต่อการปนเปื้อนมากที่สุด คือ ดินร่วนปนดินเหนียว (WoE=4.97) ร้อยละความลาดชันที่มีอิทธิพล คือ ช่วงร้อยละ 2-6 (WoE=2.90) ในขณะที่การใช้ประโยชน์ที่ดินที่ส่งผลต่อการปนเปื้อน คือ พื้นที่เมือง (WoE=3.81) ส่วนอัตราการซึมผ่านของดินที่ส่งผลกระทบมากที่สุด คือ ช่วง 1.89-2.53 เซนติเมตรต่อชั่วโมง (WoE=1.79) และระยะห่างจากแม่น้ำ ความหนาแน่นของทางน้ำที่มีอิทธิพล คือ 1,325-3,048 เมตร (WoE=1.40) และ 0-0.56 กิโลเมตรต่อตารางกิโลเมตร (WoE=2.49) ตามลำดับ โดยจากผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่า บางปัจจัยไม่ปฏิบัติตามหลักการ เช่น ปัจจัยความลึกของระดับน้ำใต้ดิน

ตามหลักการแล้วบ่อที่มีความลึกน้อยกว่าจะมีผลกระทบในการเกิดการปนเปื้อนมากกว่า แต่จากผลลัพธ์พบว่า ที่ช่วงความลึก 4.57-9.14 เมตร (WoE=-0.51) ไม่มีอิทธิพลต่อการปนเปื้อนต่างจากที่ช่วงความลึก 9.14-15.24 (WoE=1.05) ที่มีอิทธิพลมากที่สุดแต่มีความลึกที่มากกว่า ซึ่งเกิดจากมีปัจจัยอื่นมาควบคุมความเปราะบางมากกว่า ปัจจัยความลึกของระดับน้ำใต้ดิน ผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่า WoE ของแต่ละปัจจัย แสดงดังตาราง 2



ภาพ 3 แผนที่ปัจจัยของแบบจำลอง: ก) ความลึกของชั้นน้ำ ข) อัตราการเติมน้ำสู่สุทธิ ค) คุณสมบัติชั้นหินอุ้มน้ำ ง) คุณสมบัติดิน จ) ความลาดชันของภูมิประเทศ ฉ) อิทธิพลของเขตอ้อมอากาศ ช) สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นน้ำใต้ดิน ช) ระยะห่างจากแม่น้ำ ด) ความหนาแน่นของแม่น้ำ ต) อัตราการซึมผ่านของน้ำ ถ) การใช้ประโยชน์ที่ดิน

ตาราง 2

ค่าถ่วงน้ำหนัก ค่าคะแนนของแต่ละช่วงปัจจัย และผลของ WoE

ปัจจัย	ช่วงปัจจัย	r	WoE	ปัจจัย	ช่วงปัจจัย	r	WoE
ความลึกถึงระดับน้ำ (m) w=5	0-1.52	10	0	ความลาดชันของภูมิประเทศ (%) w=1	0-2	10	-1.88
	1.52-4.57	9	0.93		2-6	9	2.90
	4.57-9.14	7	-0.51		6-12	5	0.91
	9.14-15.24	5	1.05		12-18	3	0
	15.24-22.86	3	-1.34		>18	1	0
	22.86-30.48	2	-0.66	อิทธิพลของเขตภูมิอากาศ w=5	1	1	-1.01
	> 30.48	1	0.28		2	2	-1.07
อัตราการเติมน้ำสุทธิ w=4	3-5	1	-3.10	3	3	2.04	
	5-7	3	2.38	4	4	1.89	
	7-9	5	0.75	5	5	-2.61	
	9-11	8	-0.33	6	6	-1.20	
คุณสมบัติของชั้นหินอุ้มน้ำ w=3	Gr	4	0.27	7	7	-0.63	
	Vc	4	-1.12	8	8	1.45	
	TRc	5	0	สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นน้ำใต้ดิน (m/day) w=3	0.005-0.5	1	0
	Pw	5	0		0.5-1.5	2	0.04
	TRJlk	6	-1.15		1.5-3.5	4	-0.95
	Jmk	6	0		3.5-5	6	1.18
	Pc	6	1.89		5.0-10	8	0.81
	Pcms	6	0.37		>10	10	-1.03
	Pk	6	1.30	การใช้ประโยชน์ที่ดิน	เกษตรกรรม	-	-0.28
	Qyt	7	-2.46		ปศุสัตว์	-	0.36
	Qcl	7	0		เมือง	-	3.81
	Qt	8	0		อุตสาหกรรม	-	-0.31
	Qfd	8	0		ป่าไม้	-	0
	Bs	9	1.53		เหมืองแร่	-	0
	Qot	9	-1.46		ที่ทิ้งขยะ	-	0
					แหล่งน้ำ	-	0
					พื้นที่อื่นๆ	-	-0.53

ตาราง 2 (ต่อ)

ปัจจัย	ช่วงปัจจัย	r	WoE	ปัจจัย	ช่วงปัจจัย	r	WoE
คุณสมบัติ ของดิน w=2	Clay	1	-2.88	อัตราการซึม ผ่านของน้ำ (cm/h)	0-0.73	-	-2.84
	Loamy Clay	3	4.97		0.73-1.89	-	-0.55
	Silty Loam	4	-0.85		1.89-2.53	-	1.79
	Loam	5	-0.85		2.53-3.82	-	0.81
	Sandy Loam	6	0.57		3.82-7.56	-	-0.08
	Clay with Pebble	10	-1.67	ความ หนาแน่น ของแม่น้ำ (Km/m ²)	0-0.56	-	2.49
	Other	0	0	0.56-1.0	-	-0.28	
ระยะห่าง จากแม่น้ำ (m)	0-398	-	-0.91	1.0-1.5	-	-1.00	
	398-1,325	-	0.11	1.50-2.27	-	-1.17	
	1,325-3,048	-	1.40	>2.27	-	-1.44	
	3,048-6,758	-	-				

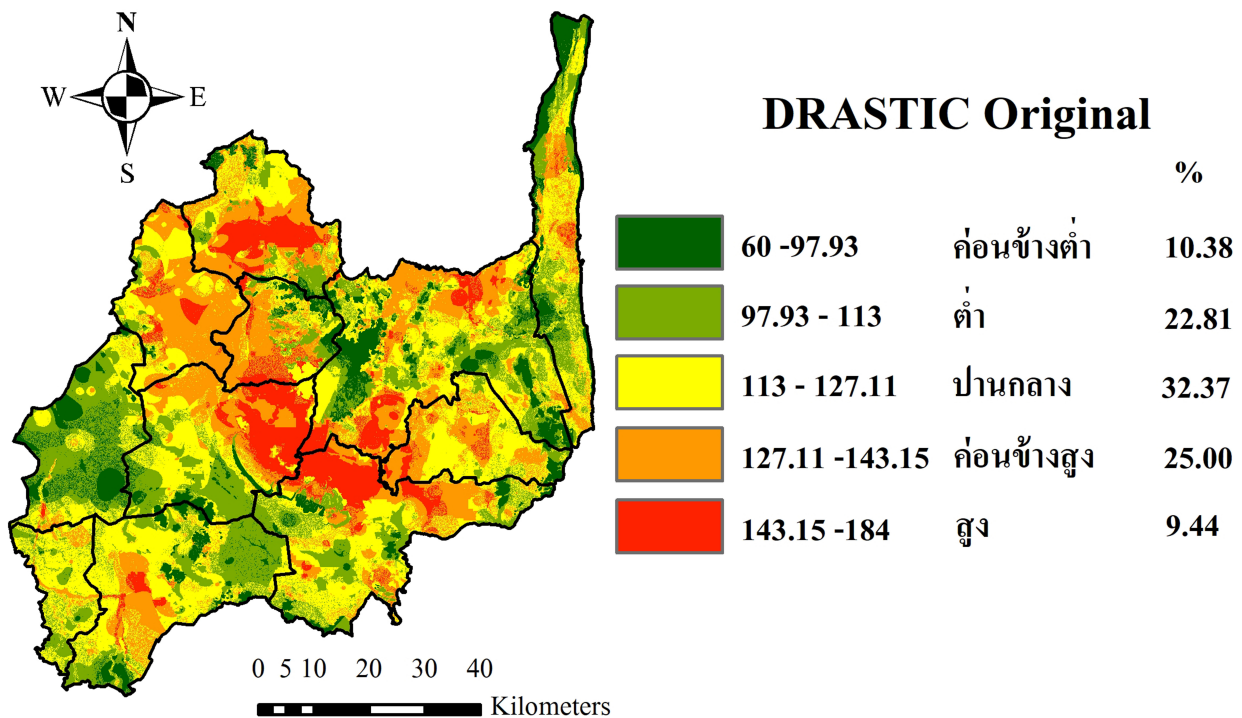
การสร้างจำลอง MoDRASTIC โดยการซ้อนทับระหว่างค่า WoE ของชั้นข้อมูลปัจจัยต่าง ๆ พบว่า ผลลัพธ์ในการประเมินความเปราะบางอยู่ในช่วง -16 ถึง 27 โดยแบ่งผลลัพธ์ออกเป็น 5 ช่วง ตามภาพ 5 ซึ่งพบว่า แบบจำลอง MoDRASTIC ในจังหวัดลพบุรีส่วนใหญ่มีค่าความเปราะบางต่อการปนเปื้อนมลพิษในเตรตในระดับค่อนข้างสูงและปานกลางกระจายครอบคลุมทั่วจังหวัดคิดเป็นร้อยละ 22.49 และ 22.54 ของพื้นที่ทั้งหมดตามลำดับ ซึ่งอาจเนื่องมาจากหลายปัจจัย เช่น จำนวนประชากรที่อยู่หนาแน่นในบริเวณอำเภอเมือง ส่งผลให้สิ่งปฏิกูลในครัวเรือนมีจำนวนมากและการบำบัดน้ำเสียในประเทศยังมีการใช้บ่อเกรอะ บ่อซึม อาจทำให้น้ำเสียไหลลงสู่ระดับน้ำใต้ดิน (Huang, Chang & Li, 2018; Jia, Bian & Wang, 2018) จากการศึกษาวิจัยจะเห็นว่า การใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่เขตเมืองมีอิทธิพลต่อการปนเปื้อนไนเตรต อีกทั้งปัจจัยระยะห่างและความหนาแน่นของแม่น้ำยังมีความสัมพันธ์กับการปนเปื้อนของมลพิษ เนื่องจากบ่อน้ำใต้ดินมีการเติมน้ำผ่านแม่น้ำมายังบ่อน้ำใต้ดินทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างแม่น้ำกับบ่อน้ำใต้ดิน บ่อน้ำใต้ดินที่มีระยะห่างจากแม่น้ำค่อนข้างสูงโอกาสในการเติมน้ำจากแม่น้ำมาสู่

น้ำใต้ดินค่อนข้างต่ำทำให้น้ำบริเวณนั้นมีแร่ธาตุสูงส่งผลให้มีความเข้มข้นของมลพิษมาก Hoehn and Scholtis (2011) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาวิจัยนี้พบบริเวณอำเภอหนองม่วง อำเภอท่าหลวง และอำเภอพัฒนานิคม มีพื้นที่ระยะห่างจากแม่น้ำค่อนข้างสูงนั้นมีอิทธิพลต่อการปนเปื้อนไนเตรตสูง อีกทั้งจะเห็นว่าค่าความเปราะบางต่อการปนเปื้อนมลพิษในเตรตในระดับค่อนข้างต่ำกระจายครอบคลุมทั่วจังหวัดคิดเป็นร้อยละ 20.61 ของพื้นที่ทั้งหมดพบกระจายทั่วบริเวณอำเภอท่าม่วง บ้านหมี่ และสระโบสถ์ เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความลึกถึงระดับน้ำใต้ดินที่อยู่ในช่วง 15.24–22.86 เมตร (WoE=1.34) เป็นบริเวณที่มีเขตอ้อมอากาศและอัตราการเติมน้ำสู่ที่ค่อนข้างต่ำ และในบริเวณนี้มีแม่น้ำที่หนาแน่นและเป็นพื้นที่ใกล้แม่น้ำซึ่งพบค่า WoE เป็นลบ อีกทั้งบริเวณอำเภอท่าม่วงส่วนใหญ่ยังมีอัตราการซึมผ่านของน้ำที่ต่ำ คือ 0.73-1.89 เซนติเมตรต่อชั่วโมงซึ่งมีอัตราการซึมน้อยกว่าบริเวณอื่นทั้งยังมีค่าอิทธิพลทางลบต่อการปนเปื้อน (WoE=-0.55)

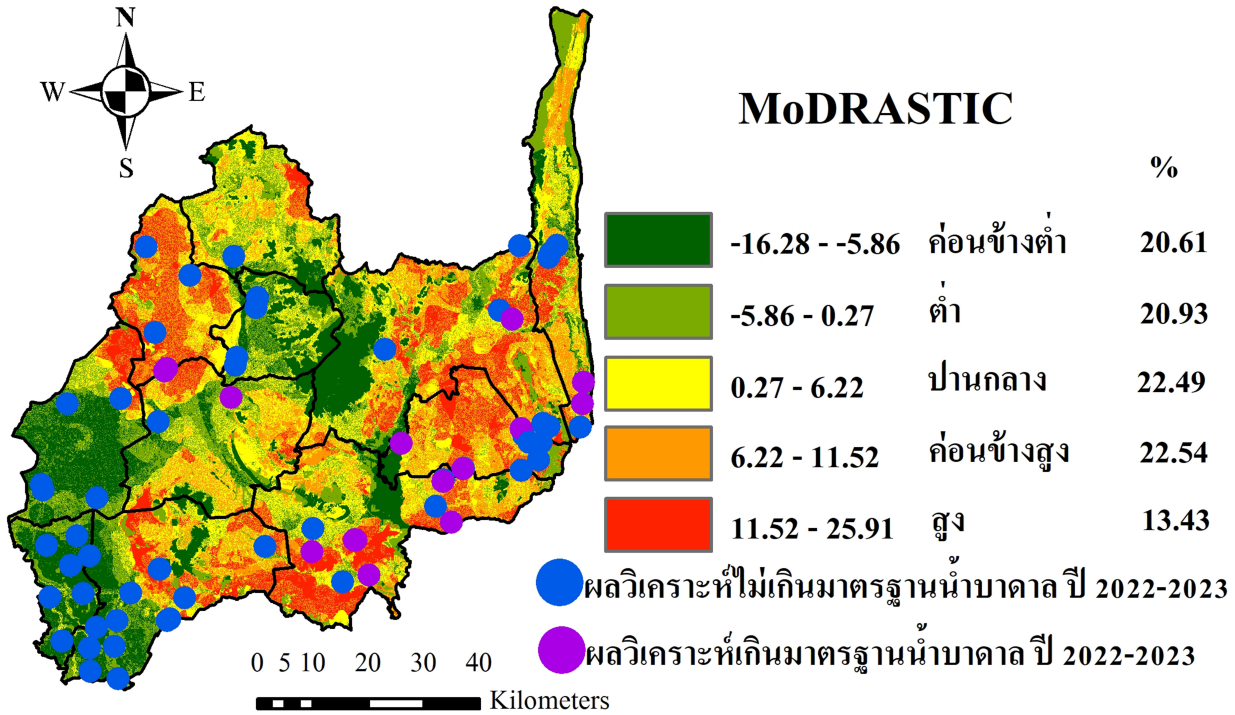
เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลอง DRASTIC ดั้งเดิม จะเห็นบริเวณความเปราะบางในระดับต่ำจะอยู่บริเวณอำเภอเมือง บ้านหมี่ โคกสำโรง ส่วนบริเวณความเปราะบางใน

ระดับสูงอยู่บริเวณหนองม่วง โคกเจริญ และโคกสำโรง ซึ่งค่อนข้างแตกต่างจากแบบจำลอง MoDRASTIC ที่บริเวณความแปรปรวนในระดับสูงกระจายอยู่หลายบริเวณทั่วจังหวัด เช่น บริเวณอำเภอเมือง หนองม่วง พัฒนานิคม ท่าหลวง ชัยบาดาล และลำสนธิ อีกทั้งจะพบว่าบริเวณความแปรปรวนในระดับสูงของแบบจำลอง MoDRASTIC นั้นหากเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ไนเตรตปี ค.ศ. 2022–2023 จะพบว่าบริเวณอำเภอหนองม่วง พัฒนานิคม ท่าหลวง ชัยบาดาล และลำสนธิ มีการตรวจพบปริมาณไนเตรตเกินมาตรฐานน้ำบาดาล (มากกว่า 45 mg/L) ในบางบ่อ ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าของการประเมินความแปรปรวนต่อการปนเปื้อนไนเตรตในแบบจำลอง MoDRASTIC ในบริเวณที่มีความแปรปรวนในระดับสูง ในส่วนของบริเวณอำเภอเมืองลพบุรีนั้นแม้ว่าแบบจำลองจะมีค่าอยู่ในระดับสูงแต่จากผลวิเคราะห์ที่ไม่พบปริมาณไนเตรตที่เกินมาตรฐานน้ำบาดาล ตามภาพที่ 5 อาจเนื่องมาจากในบริเวณนี้มีปัจจัย

ของระยะห่างจากแม่น้ำค่อนข้างน้อย และยังพบว่า บ่อบาดาลมีการนำน้ำขึ้นมาใช้ในระยะเวลาที่ลึกกว่าระดับน้ำใต้ดินมากจึงอาจเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้บริเวณดังกล่าวไม่พบไนเตรตที่เกินมาตรฐาน จากการเปรียบเทียบแบบจำลองทั้ง 2 ค่อนข้างแตกต่างกันเนื่องจากการสร้างแบบจำลอง MoDRASTIC นั้นจะใช้การคิดคำนวณค่าน้ำหนักนั้นจากความสัมพันธ์ของปัจจัยกับบริเวณที่เกิดการปนเปื้อนของไนเตรตในอดีตและอีกทั้งการเพิ่มปัจจัยในแบบจำลอง MoDRASTIC ทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำกว่าแบบจำลอง DRASTIC แบบจำลองดั้งเดิมที่คิดจากการให้น้ำหนักและคะแนนของปัจจัยตามที่มีอิทธิพลต่อการปนเปื้อนของน้ำใต้ดินซึ่งการให้คะแนนของแต่ละปัจจัยมาจากความคิดเห็นของผู้สร้างแบบจำลองทำให้แบบจำลองอาจมีการคลาดเคลื่อนซึ่งสามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้ง 2 โดยวิธีการ ROC



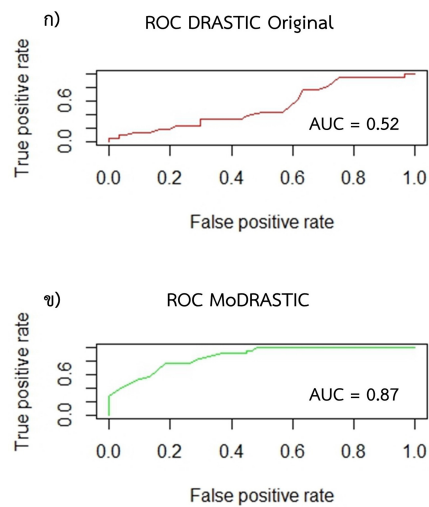
ภาพ 4 แบบจำลองการประเมินความแปรปรวนต่อการปนเปื้อนของมลพิษไนเตรตในน้ำใต้ดินโดย DRASTIC



ภาพ 5 แบบจำลองการประเมินความแปรปรวนต่อการปนเปื้อนของมลพิษในเตรตในน้ำใต้ดิน MoDRASTIC

4. การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยวิธี receiver operating characteristic--ROC

ประสิทธิภาพของแบบจำลองการประเมินความแปรปรวนต่อการปนเปื้อนของมลพิษในเตรตโดยที่สร้างจากแบบจำลอง DRASTIC ดั้งเดิมและแบบจำลอง MoDRASTIC ด้วยวิธี ROC โดยใช้ AUC ในการประเมินประสิทธิภาพความถูกต้องโดยรวมของแบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพที่สมบูรณ์จะต้องมี AUC เท่ากับ 1 และหากต่ำกว่า 0.5 ถือว่าแบบจำลองไม่มีประสิทธิภาพ กล่าวคือแบบจำลองควรมี TPR ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งหมายถึงแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการคาดการณ์หากแบบจำลองแสดงพื้นที่ปนเปื้อน และแบบจำลองควรมี FPR เข้าใกล้ 0 ซึ่งหมายถึงแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการคาดการณ์หากแบบจำลองแสดงพื้นที่ไม่ปนเปื้อน จากการหาความสัมพันธ์ระหว่าง TPR และ FPR และทำการวิเคราะห์พื้นที่ใต้กราฟ ผลการวิจัยพบว่า แบบจำลอง MoDRASTIC มีค่าการทำนายที่ถูกต้องในการประเมินความแปรปรวนต่อการปนเปื้อนในเตรตในน้ำใต้ดิน AUC เท่ากับ 0.85 อยู่ในเกณฑ์ที่ดีและค่าความแม่นยำของโมเดล เท่ากับ 0.83 ในขณะที่ค่าการทำนายของ DRASTIC ดั้งเดิมมีค่าพื้นที่ใต้กราฟเท่ากับ 0.52 และค่าความแม่นยำของโมเดลเท่ากับ 0.75 ค่าดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างต่ำ แสดงดังภาพ 6



ภาพ 6 แสดงพื้นที่ใต้กราฟของวิธี ROC: ก) DRASTIC Original ข) MoDRASTIC

สรุป

จากการศึกษาการประเมินความแปรปรวนต่อการปนเปื้อนของมลพิษในเตรตโดยแบบจำลอง DRASTIC แบบดั้งเดิมและจากการปรับปรุงโดยวิธี WoE 11 ปัจจัยใน

พื้นที่ศึกษาจังหวัดลพบุรี ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระดับความเปราะบางต่อการปนเปื้อนไนเตรตในระดับสูงของแต่ละแบบจำลองพบว่า ในแบบจำลอง DRASTIC จะมีพื้นที่ระดับความเปราะบางระดับสูงอยู่ที่ร้อยละ 9.44 ของพื้นที่ ในขณะที่แบบจำลอง MoDRASTIC จะมีพื้นที่ระดับความเปราะบางระดับสูงอยู่ที่ร้อยละ 13.43 ของพื้นที่ ทั้งนี้แบบจำลอง DRASTIC มีความแม่นยำที่ต่ำสำหรับพื้นที่การศึกษานี้ ในขณะที่ MoDRASTIC มีความแม่นยำในการทำนายที่มากกว่า ข้อดีของการปรับปรุงโดยวิธี WoE มาใช้ในการปรับปรุงแบบจำลอง DRASTIC คือ การให้คะแนนและค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยจะง่ายและแม่นยำขึ้น อีกทั้งการคำนึงถึงกิจกรรมของมนุษย์และสภาพแวดล้อมที่ตั้งของบ่อน้ำใต้ดินเพิ่มความแม่นยำให้กับแบบจำลอง เนื่องจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ส่งผลต่อการปนเปื้อนของน้ำใต้ดิน และจากการ

ประเมินความเปราะบางต่อการปนเปื้อนของไนเตรตของน้ำใต้ดินในพื้นที่จังหวัดลพบุรีพบว่า บริเวณอำเภอเมืองหนองม่วง พัฒนานิคม ท่าหลวง และชัยบาดาลมีความเปราะบางต่อการปนเปื้อนไนเตรตในน้ำใต้ดินในระดับสูง ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถนำไปเป็นเครื่องมือในการประกอบการพิจารณาวางแผนในการอนุรักษ์และพัฒนาแหล่งน้ำใต้ดิน กล่าวคือ สามารถนำแบบจำลองที่ได้รับการปรับปรุงมาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการวางแผนจัดการกำหนดทิศทางในการใช้ทรัพยากรการใช้ประโยชน์ที่ดินและการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับพื้นที่ อีกทั้งยังสามารถช่วยในการจัดลำดับความสำคัญในการป้องกัน ติดตามและปรับปรุงคุณภาพน้ำใต้ดินในบริเวณดังกล่าวได้สะดวกและแม่นยำยิ่งขึ้น



References

- Aller, L., Bennett, T., Jay, L. H., & Rebecca, P. J. (1987). *Drastic: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings: EPA/600/2-87/035*. Retrieved from <https://bit.ly/46RuyJD>
- Armaş, I. (2011). Weights of evidence method for landslide susceptibility mapping. Prahova Subcarpathians, Romania. *Natural Hazards*, 60(3), 937-950. doi:10.1007/s11069-011-9879-4
- Cabello, P., Roldan, M. D., & Moreno-Vivian, C. (2004). Nitrate reduction and the nitrogen cycle in archaea. *Microbiology (reading)*, 150(Pt 11), 3527-3546. doi:10.1099/mic.0.27303-0
- Chotpantararat, S., Parkchai, T., & Wisitthammasri, W. (2020). Multivariate statistical analysis of Hydrochemical data and stable isotopes of groundwater contaminated with nitrate at Huay Sai Royal Development Study Center and Adjacent Areas in Phetchaburi Province, Thailand. *Water*, 12(4). doi:10.3390/w12041127
- Department of Groundwater Resources. (2007). *Groundwater exploration and mapping of limestone aquifer project: Area 2*. Bangkok: Department of Groundwater Resources. (in Thai)
- Department of Water Resources. (2023). *Water source information*. Retrieved from <https://webgis.dwr.go.th/downloads>
- Ducci, D., Della Morte, R., Mottola, A., Onorati, G., & Pugliano, G. (2019). Nitrate trends in groundwater of the Campania region (southern Italy). *Environmental Science and Pollution Research*, 26(3), 2120-2131. doi:10.1007/s11356-017-0978-y

- Elmeknassi, M., El Mandour, A., Elgettafi, M., Himi, M., Tijani, R., El Khantouri, F. A., & Casas, A. (2021). A GIS-based approach for geospatial modeling of groundwater vulnerability and pollution risk mapping in Bou-Areg and Gareb aquifers, Northeastern Morocco. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(37), 51612-51631. doi:10.1007/s11356-021-14336-0
- Fan, J., Upadhye, S., & Worster, A. (2006). Understanding receiver operating characteristic (ROC) curves. *Canadian Journal of Emergency Medicine*, 8(1), 19-20. doi:10.1017/s1481803500013336
- Fraga, C. G., Melville, A. M., & Wright, B. W. (2007). ROC-curve approach for determining the detection limit of a field chemical sensor. *Analyst*, 132(3), 230-236. doi:10.1039/b607843e
- Gajowniczek, K., & Ząbkowski, T. (2014). Estimating the ROC curve and its significance for classification models' assessment. *Quantitative Methods in Economics*, 15(2), 382-391.
- Goyal, D., Haritash, A. K., & Singh, S. K. (2021). A comprehensive review of groundwater vulnerability assessment using index-based, modelling, and coupling methods. *Journal of Environmental Management*, 296, 113161. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113161
- Hamza, S. M., Ahsan, A., & Sulaiman, W. N. A. (2019). GIS-based spatial analysis accurately predicts alluvial well depletion and effectively establishes relationship between aquifer parameters. *International Journal of Water Resources and Arid Environments*, 8(1), 49-60.
- Hoehn, E., & Scholtis, A. (2011). Exchange between a river and groundwater, assessed with hydrochemical data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(3), 983-988. doi:10.5194/hess-15-983-2011
- Huang, Y., Chang, Q., & Li, Z. (2018). Land use change impacts on the amount and quality of recharge water in the loess tablelands of China. *Science Total Environ*, 628, 443-452. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.076
- Hussain, H. M. (2004). *Assessment of groundwater vulnerability in an alluvial interfluvium using GIS*. (Doctoral dissertation). Indian Institute of Technology Roorkee. Roorkee.
- Jia, Z., Bian, J., & Wang, Y. (2018). Impacts of urban land use on the spatial distribution of groundwater pollution, Harbin City, Northeast China. *Journal of Contaminant Hydrology*, 215, 29-38. doi: 10.1016/j.jconhyd.2018.06.005
- Jia, Z., Bian, J., Wang, Y., Wan, H., Sun, X., & Li, Q. (2019). Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate in porous aquifers based on a DRASTIC method modified by projection pursuit dynamic clustering model. *Journal of Contaminant Hydrology*, 226, 103522. doi: 10.1016/j.jconhyd.2019.103522
- Khosravi, K., Sartaj, M., Karimi, M., Levison, J., & Lotfi, A. (2021). A GIS-based groundwater pollution potential using DRASTIC, modified DRASTIC, and bivariate statistical models. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(36), 50525-50541. doi: 10.1007/s11356-021-13706-y

- Lakshminarayanan, B., Ramasamy, S., Anuthaman, S. N., & Karuppanan, S. (2021). New DRASTIC framework for groundwater vulnerability assessment: bivariate and multi-criteria decision-making approach coupled with metaheuristic algorithm. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(3), 4474-4496. doi:10.1007/s11356-021-15966-0
- Lee, C. M., Choi, H., Kim, Y., Kim, M., Kim, H., & Hamm, S. Y. (2021). Characterizing land use effect on shallow groundwater contamination by using self-organizing map and buffer zone. *Science of The Total Environment*, 800, 149632. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149632
- Nakagawa, K., Amano, H., Persson, M., & Berndtsson, R. (2021). Spatiotemporal variation of nitrate concentrations in soil and groundwater of an intensely polluted agricultural area. *Scientific Reports*, 11, 2598. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82188-2>
- Navarro, J., Teramoto, E. H., Engelbrecht, B. Z., & Kiang, C. H. (2020). Assessing hydrofacies and hydraulic properties of basaltic aquifers derived from geophysical logging. *Brazilian Journal of Geology*, 50(4). doi:10.1590/2317-4889202020200013
- O'Driscoll, M., Johnson, P., & Mallinson, D. (2010). Geological controls and effects of floodplain asymmetry on river-groundwater interactions in the southeastern Coastal Plain, USA. *Hydrogeology Journal*, 18(5), 1265-1279. doi:10.1007/s10040-010-0595-z
- Piscopo, G. (2001). *Groundwater vulnerability map explanatory notes. Centre for Natural Resources NSW Department of Land and Water Conservation: Lachlan Catchment*. Retrieved from https://water.dpie.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0004/151762/Castlereagh-map-notes.pdf
- Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., Gokceoglu, C., Mohammadi, M., & Moradi, H. R. (2012). Application of weights-of-evidence and certainty factor models and their comparison in landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(7), 2351-2365. doi: 10.1007/s12517-012-0532-7
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2015). Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, 31(1), 42-70. doi:10.1080/10106049.2015.1041559
- Sarakarn, P., & Mulpolsri, P. (2021). Optimal cut-off points for receiver operating characteristic (ROC) curve analysis in developing tools of health innovations: example using STATA. *Thai Bulletin of Pharmaceutical Sciences*, 16(1), 93-108 (in Thai)
- Trauth, N., Musolff, A., Knoller, K., Kaden, U. S., Keller, T., Werban, U., & Fleckenstein, J. H. (2018). River water infiltration enhances denitrification efficiency in riparian groundwater. *Water research*, 130, 185-199. doi: 10.1016/j.watres.2017.11.058
- Udomsri, S., & Hoontrakul, K. (n.d). *Surface texture of the soil series in Thailand*. Bangkok: Land Development Departmen. (in Thai)

U.S. Geological Survey. (2014). *Digital Elevation Model (DEM)*. Retrieved from <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Wang, K., Chen, H., Li, F., Guo, F., & Jiang, G. (2020). Spatial distribution characteristics of nitrogen pollution in a typical karst groundwater system. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(10), 351. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05401-y>

