



DRASTIC: แบบจำลองระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
สำหรับประเมินศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล
DRASTIC: Geographic Information System Model
for Evaluating Groundwater Pollution Potential

จิระเดช มาจันแดง¹

บทคัดย่อ

DRASTIC เป็นวิธีการประเมินศักยภาพการปนเปื้อนของน้ำบาดาล ที่ได้รับความนิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยเป็นแบบจำลองระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในรูปแบบของแบบจำลองดัชนี และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการซ้อนทับข้อมูล DRASTIC มาจากอักษรตัวหน้าในภาษาอังกฤษของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการประเมิน ประกอบด้วย ความลึกของระดับน้ำบาดาล อัตราการเพิ่มเติมน้ำสุทธิ ตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำ ตัวกลางของดิน ภูมิประเทศ เขตอ้อมอากาศ และสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ ค่าดัชนีที่ได้จะถูกนำมาจัดกลุ่มเพื่อจำแนกศักยภาพการปนเปื้อนของน้ำบาดาลในระดับต่าง ๆ การตรวจสอบความถูกต้องของ DRASTIC สามารถประเมินได้จากปริมาณและคุณภาพข้อมูลของแต่ละปัจจัย โดยเฉพาะปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงต่อแบบจำลอง

ABSTRACT

DRASTIC is the most widely used method for evaluating groundwater pollution potential. This method is the geographic information system model in the form of index model and use the overlay method for data analysis. DRASTIC are acronym of words in English, include: Depth to water, [net] Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography [slope], Impact of vadose zone, and Conductivity [hydraulic] of the aquifer. The result index is ranged for classifying the groundwater pollution potential levels. DRASTIC model validation effort is always constrained by the quantity and quality of the factors, in particular the factors have high influence in the model.

¹ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คำสำคัญ: แบบจำลอง DRASTIC แบบจำลองดัชนี ศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล

Keywords: DRASTIC model, Index model, Groundwater pollution potential

บทนำ

น้ำบาดาลถือเป็นแหล่งน้ำจืดที่สำคัญที่สุดของโลก (Villeneuve et al., 1990) และมีการนำมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย ทั้งในส่วนของ การอุปโภค บริโภค เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามหากขาดการจัดการเกี่ยวกับแหล่งน้ำบาดาลที่ดีพอ ก็อาจทำให้เกิดปัญหาในเรื่องของปริมาณและคุณภาพ โดยเฉพาะปัญหาเรื่องคุณภาพน้ำบาดาลที่เสื่อมลงจากการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล ซึ่งหากเกิดการปนเปื้อนแล้ว การกำจัดหรือบำบัดให้คุณภาพน้ำกลับมามีคุณภาพดีดังเดิมนั้นทำได้ค่อนข้างยุ่งยาก และต้องใช้งบประมาณดำเนินการจำนวนมาก แหล่งกำเนิดสารปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลส่วนใหญ่มาจากชุมชน ภาคอุตสาหกรรม และภาคเกษตรกรรม โดยชุมชนและภาคอุตสาหกรรมจะเป็นแหล่งที่มาของน้ำเสียและของเสีย ส่วนพื้นที่เกษตรกรรมมาจากการใช้สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ (pesticide) และปุ๋ย (fertilizer) ในปริมาณมาก (Giambelluca et al., 1996; Soutter and Musy, 1998; Lake et al., 2003; Thapinta and Hudak, 2003; Chae et al., 2004) ซึ่งอาจปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำบาดาล ดังนั้นการป้องกันแหล่งน้ำบาดาลจากการปนเปื้อนจึงเป็นประเด็นสำคัญที่จะต้องพิจารณาและดำเนินการอย่างเร่งด่วน (Zektser et al., 2004) ทำให้เกิดการพัฒนาแนวคิดในการประเมินศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผนบริหารจัดการเกี่ยวกับการป้องกันการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล DRASTIC เป็นแบบจำลองระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์แบบจำลองหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ประเมิน

ศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลอย่างแพร่หลาย (Fritch et al., 2000; Al-Zabet, 2002; Lee, 2003; Naqa, 2004; Babiker et al., 2005; Baalousha, 2006; Bukowski et al., 2006; Panagopoulos et al., 2006; Denny et al., 2007; Herlinger and Viero, 2007; Almasri, 2008; Gomezdelcampo and Dickerson, 2008; Jamrah et al., 2008; Ahmed, 2009; Assaf, and Saadeh, 2009; Chitsazan and Akhtari, 2009; Pathak et al., 2009; Saidi et al., 2009; Sener et al., 2009; Sinan and Razack, 2009; Tilahun and Merkel, 2009; Umar et al., 2009; Wen et al., 2009; Awawdeh and Jaradat, 2010; Boughriba et al., M., 2010; Akhavan et al., 2011; Liggett and Allen, 2011; Lima et al., 2011; Prasad et al., 2011; Srinivasamoorthy et al., 2011) รวมถึงในประเทศไทยด้วย (วันเพ็ญ, 2547; Ratana, 2000; Subtavewung, 2006; Sarapirome and Majandang, 2008) บทความนี้ได้อธิบายถึงที่มาหลักการ ปัจจัยที่ใช้ แหล่งที่มาของข้อมูล และเงื่อนไขการนำ DRASTIC ไปประยุกต์ใช้เพื่อประเมินศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล รวมถึงวิธีการในการวิเคราะห์ความอ่อนไหว และตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลอง

ความเป็นมา

DRASTIC (Aller et al., 1987) ได้รับการพัฒนาโดยสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อม ประเทศสหรัฐอเมริกา (U.S. EPA) ภายใต้โครงการพัฒนาแบบจำลองสำหรับประเมินศักยภาพการปนเปื้อนของ

แหล่งน้ำบาดาล เพื่อสร้างแบบจำลองประเมินศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลในรูปแบบของระบบการสร้างมาตรฐาน (standardized system) ที่ง่ายต่อการนำไปใช้และตีความ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในทุกสภาพอุทกธรณีวิทยาในสหรัฐอเมริกา โดยไม่จำเป็นต้องเป็นผู้เชี่ยวชาญทางอุทกธรณีวิทยาหรือการปนเปื้อนของน้ำบาดาล และข้อมูลที่ใช้ในการประเมินสามารถรวบรวมได้จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง หรือบางส่วนอาจใช้วิธีการประมาณค่าจากผลการศึกษาในอดีต ซึ่งผลการประเมินศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลที่ได้ จะเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการวางแผนบริหารจัดการการป้องกันและติดตามการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล โดยเฉพาะการวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เป็นแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อนให้สัมพันธ์กับศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล

โดยชื่อ DRASTIC มาจากการนำอักษรตัวหน้าในภาษาอังกฤษของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการประเมินมารวมกันเพื่อให้ง่ายต่อการเรียกและการอ้างอิง ประกอบด้วย 7 ปัจจัย (Aller et al., 1987) ดังนี้ ความลึกของระดับน้ำบาดาล (Depth to water) อัตราการเพิ่มเติมน้ำสุทธิ ([net] Recharge) ตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer media) ตัวกลางของดิน (Soil media) ภูมิประเทศ (Topography [slope]) เขตอิมอากาศ (Impact of vadose zone) และสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ (Conductivity [hydraulic] of the aquifer)

รูปแบบการประเมิน

สภาพอุทกธรณีวิทยาที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของน้ำบาดาลทั้งที่ไหลเข้าและออกจากพื้นที่ ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลในแต่ละพื้นที่ ดังนั้นในการประเมิน

ศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล จึงนิยมนำสภาพอุทกธรณีวิทยามาใช้เป็นปัจจัยหลักในการสร้างแบบจำลองการประเมินศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล ซึ่งแบบจำลองที่ได้ส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองที่ใช้ได้ทั่วไปไม่จำเพาะเจาะจงชนิดของสารปนเปื้อน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในทุกสภาพอุทกธรณีวิทยา โดยแบบจำลองที่มีการพิจารณาเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาพอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่มาใช้ในการประเมินศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลได้แก่ GOD (Foster, 1987) AVI (Van Stempvoort et al., 1993) DRASTIC (Aller et al., 1987) และ EPIK (Doerfliger and Zwahlen, 1997) เป็นต้น

DRASTIC ถือเป็นแบบจำลองระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (geographic information system, GIS) ชนิดหนึ่ง ในรูปแบบของแบบจำลองดัชนี (index model) เนื่องจากต้องอาศัยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในการรวบรวม จัดเก็บ ปรับปรุง วิเคราะห์ และแสดงผลข้อมูล โดยข้อมูลปัจจัยสภาพอุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ที่ใช้ใน DRASTIC ทั้งหมดจะถูกแปลงให้เป็นข้อมูลเชิงพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ (geospatial data) ทั้งในส่วนของข้อมูลเชิงพื้นที่ (spatial data) และข้อมูลลักษณะประจำ (attribute) แล้วนำข้อมูลลักษณะประจำของแต่ละปัจจัยมาคำนวณเพื่อหาค่าดัชนีในรูปแบบของระบบการจัดลำดับตัวเลข (numerical ranking system) โดยมีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน (Aller et al., 1987) ประกอบด้วย ค่าถ่วงน้ำหนัก (weights) ช่วงค่า (ranges) และค่าคะแนน (rating)

ค่าถ่วงน้ำหนัก (weights) เป็นค่าที่บอกถึงความสำคัญของแต่ละปัจจัยต่อศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 (ตารางที่ 1)

โดยปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 5 และความสำคัญน้อยสุดเท่ากับ 1 ในแบบจำลอง DRASTIC ได้มีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักไว้ 2 ชุดตามลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เป็นต้นกำเนิดของสารปนเปื้อนในพื้นที่ประกอบด้วย ชุดที่ใช้กับพื้นที่ทั่วไป และชุดที่ใช้กับพื้นที่เกษตรกรรม

ช่วงค่า (ranges) ในแต่ละปัจจัยจะถูกนำมาทำการจำแนกข้อมูลใหม่ (reclassify) โดยการแบ่งช่วงหรือจัดกลุ่มตามศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลในปัจจัยนั้น ๆ

ค่าคะแนน (rating) เป็นคะแนนที่ให้ในแต่ละช่วงหรือกลุ่มข้อมูลที่ถูกจัดขึ้นมาใหม่ ตามระดับศักยภาพต่อการปนเปื้อนของปัจจัยนั้น ๆ ซึ่งมีค่าระหว่าง 1 ถึง 10 โดยปัจจัยความลึกของระดับน้ำบาดาล อัตราการเพิ่มเติมน้ำสุทธิ ตัวกลางของดิน ภูมิภาค และสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ จะมีการกำหนดค่าคะแนนหนึ่งค่าในแต่ละช่วงหรือกลุ่มข้อมูล ส่วนปัจจัยตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำ และเขตอ้อมอากาศ จะกำหนดแบบช่วงค่าคะแนนในแต่ละกลุ่มข้อมูล ซึ่งการนำไปใช้ผู้ใช้งานจะต้องระบุค่าคะแนนเองจากช่วงค่าที่กำหนดไว้ โดยพิจารณาจากอิทธิพลของปัจจัยนั้น ๆ ว่ามีผลต่อศักยภาพการปนเปื้อนมากน้อยเพียงใดในแต่ละพื้นที่

การคำนวณของแบบจำลอง DRASTIC เป็นการคำนวณเพื่อหาค่าดัชนี (index) เชิงพื้นที่ที่บ่งชี้ศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล โดยคำนวณจากผลรวมของผลคูณระหว่างค่าถ่วงน้ำหนัก (W) และค่าคะแนน (R) ของแต่ละปัจจัย ดังแสดงในสมการ (Aller et al., 1987)

$$\text{DRASTIC index} = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + S_R S_W + T_R T_W + I_R I_W + C_R C_W \quad (1)$$

ค่าดัชนีที่ได้จากการคำนวณ จะถูกนำมาจำแนกโดยการแบ่งค่าดัชนีเป็นช่วงค่าต่างๆ เพื่อจำแนกระดับศักยภาพต่อการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล โดยพื้นที่ที่มีค่าดัชนีสูงจะเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลสูง แหล่งน้ำบาดาลบริเวณนั้นจึงมีโอกาสที่จะเกิดการปนเปื้อนได้ง่าย ดังนั้นค่าดัชนีที่ได้จึงไม่ใช่ค่าศักยภาพการปนเปื้อนแหล่งน้ำบาดาลของพื้นที่โดยตรง แต่เป็นค่าที่ใช้จำแนกศักยภาพของพื้นที่ที่มีต่อการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลในเชิงเปรียบเทียบเท่านั้น (รูปที่ 1)

ความเกี่ยวข้องของแต่ละปัจจัยกับศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล

รูปแบบความเกี่ยวข้องของปัจจัยในแบบจำลอง DRASTIC กับศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล สามารถจำแนกได้ 3 รูปแบบ คือ 1) เวลาเดินทาง (travel time) เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับระยะเวลาในการไหลซึมลงไปปนเปื้อนในแหล่งน้ำบาดาลของสารปนเปื้อน ประกอบด้วย ความลึกของระดับน้ำบาดาล ตัวกลางของดิน เขตอ้อมอากาศ อัตราการเพิ่มเติมน้ำสุทธิ สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน 2) ฟลักซ์ (flux) เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการแพร่กระจายภายในชั้นหินอุ้มน้ำของสารปนเปื้อน ประกอบด้วย ตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำ สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ และ 3) ความเข้มข้น (concentration) เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปริมาณความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ประกอบด้วย ความลึกของระดับน้ำบาดาล อัตราการเพิ่มเติมน้ำสุทธิ ตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำ ตัวกลางของดิน ภูมิภาค เขตอ้อมอากาศ สัมประสิทธิ์การยอมให้

ตารางที่ 1 ค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละปัจจัยในแบบจำลอง DRASTIC (Aller et al., 1987)

ปัจจัย	ค่าถ่วงน้ำหนัก	
	ทั่วไป	เกษตรกรรม
1. ความลึกของระดับน้ำบาดาล (D)	5	5
2. อัตราการเพิ่มเติมน้ำสุทธิ (R)	4	4
3. ตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำ (A)	3	3
4. ตัวกลางของดิน (S)	2	5
5. ภูมิประเทศ (T)	1	3
6. เขตอ้อมอากาศ (I)	5	4
7. สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ (C)	3	2

น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ โดย Aller et al. (1987) ได้กำหนดให้แต่ละปัจจัยจะมีความเกี่ยวข้องกับศักยภาพการปนเปื้อน ดังนี้

1. ความลึกของระดับน้ำบาดาล

ระดับน้ำบาดาล เป็นระดับบนสุดของเขตอ้อมน้ำ มีลักษณะต่อเนื่องกันเป็นพื้นผิวใต้ผิวดิน อาจมีระดับคงที่ตลอดทั้งปีหรือเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล การวัดความลึกของระดับน้ำบาดาลในแบบจำลอง DRASTIC ในชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดันเป็นการวัดความลึกจากระดับผิวดินถึงระดับบนสุดของเขตอ้อมน้ำ ส่วนชั้นหินอุ้มน้ำที่มีแรงดันวัดจากระดับผิวดินลงไปจนถึงระดับบนสุดของชั้นหินอุ้มน้ำนั้น ๆ หากระดับน้ำบาดาลอยู่ลึกหมายความว่าระยะทางที่สารปนเปื้อนจะเคลื่อนที่หรือไหลซึมลงสู่น้ำบาดาลก็มีระยะทางมาก โอกาสที่สารปนเปื้อนจะถูกทำให้เจือจางจากการสัมผัสกับชั้นดินชั้นหิน หรือการออกซิเดชัน (oxidation) ในเขตอ้อมอากาศระหว่างการไหลซึมก็ย่อมมีมากขึ้นด้วย ดังนั้นในการให้ค่าคะแนนความลึกของระดับน้ำบาดาลจึงให้ค่าลดลงตามระดับความลึก (ตารางที่ 2)

2. อัตราการเพิ่มเติมน้ำสุทธิ

อัตราการเพิ่มเติมน้ำสุทธิเป็นปริมาณน้ำที่ไหลซึมลงไปเพิ่มเติมในชั้นหินอุ้มน้ำต่อหน่วยพื้นที่ น้ำฝนเป็นแหล่งกำเนิดหลักของน้ำบาดาล เมื่อฝนตกน้ำบางส่วนจะไหลซึมจากผิวดินลงสู่ใต้ดินไปกักเก็บ

เพิ่มเติมในชั้นหินอุ้มน้ำ น้ำที่เพิ่มเติมลงไปนั้นถือเป็นตัวกลางสำคัญในการพาสารปนเปื้อนต่าง ๆ ให้เคลื่อนที่ลงสู่แหล่งน้ำบาดาลในแนวตั้ง และเคลื่อนที่ในแนวราบภายในชั้นหินอุ้มน้ำ ส่วนคุณภาพน้ำที่เพิ่มเติมลงไปจะเป็นปัจจัยในการควบคุมการแพร่ (dispersion) และการทำให้เจือจาง (dilution) ของสารปนเปื้อนทั้งในเขตอ้อมอากาศและเขตอ้อมน้ำ จากลักษณะทางกายภาพของชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดันที่มีชั้นหินกั้นน้ำ (confining layer) ซึ่งมีคุณสมบัติไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านหรือผ่านได้น้อยมากปิดทับอยู่ด้านบน และทำหน้าที่เหมือนกำแพงป้องกันไม่ให้สารปนเปื้อนไหลซึมลงมา ดังนั้นในชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดันจึงมีโอกาที่จะเกิดการปนเปื้อนจากการเพิ่มเติมน้ำน้อยกว่าชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดัน อย่างไรก็ดีในบางพื้นที่ชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดันที่พบไม่ได้เป็นชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดันที่แท้จริง เนื่องจากน้ำบางส่วนสามารถซึมผ่านชั้นหินกั้นน้ำลงไปได้ ทำให้น้ำบาดาลมีโอกาสปนเปื้อนมากขึ้น จากกรณีที่น้ำเป็นตัวการสำคัญในการชะล้างและการเคลื่อนที่สารปนเปื้อนทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลวลงสู่ชั้นหินอุ้มน้ำ ดังนั้นหากมีอัตราการเพิ่มเติมน้ำลงสู่น้ำบาดาลในปริมาณมาก ก็มีโอกาที่จะเกิดการปนเปื้อนของน้ำบาดาลมากขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตามหากอัตราการเพิ่มเติมน้ำมีปริมาณสูงมาก ก็อาจเกิดกระบวนการทำให้เจือจางของสารปนเปื้อนได้ ส่งผลให้โอกาสที่จะเกิดการปนเปื้อนของน้ำบาดาลลดลงตามไป

ด้วย แต่ในการประเมินโดย DRASTIC นั้นการกำหนดค่าคะแนนไม่ได้นำปัจจัยการทำให้เจือจางของสารปนเปื้อนมาพิจารณาด้วย ถึงแม้ว่าฝนจะเป็นแหล่งน้ำหลักที่เพิ่มเติมลงไปในพื้นที่น้ำ แต่การเพิ่มเติมน้ำก็อาจมาจากแหล่งอื่นได้ เช่น น้ำที่ใช้ในพื้นที่เกษตรกรรม หรือแหล่งเพิ่มเติมน้ำที่มนุษย์สร้างขึ้น (artificial recharge) เป็นต้น ซึ่งต้องบวกเข้าไปในการคำนวณอัตราการเพิ่มเติมน้ำสุทธิ โดยค่าคะแนนที่กำหนดให้จะแปรผันตรงกับอัตราการเพิ่มเติมน้ำสุทธิ (ตารางที่ 3)

3. ตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำ

ตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำ หมายถึง หินแข็งหรือหินร่วนที่กักเก็บน้ำบาดาลในชั้นหินอุ้มน้ำ เช่น กรวด ทราย หินปูน เป็นต้น ตัวกลางแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการกักเก็บน้ำที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ปริมาณน้ำที่สามารถพัฒนาได้ (yield) แตกต่างกันไปด้วย ในชั้นหินอุ้มน้ำที่เป็นหินร่วนและหินเนื้อประสม (clastic rock) น้ำบาดาลจะกักเก็บในช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอน ส่วนในชั้นหินอุ้มน้ำที่เป็นหินเนื้อประสาน (non-clastic rock) น้ำบาดาลส่วนใหญ่จะกักเก็บอยู่ในรอยแตกหรือโพรงของหิน โดยชั้นหินอุ้มน้ำที่เป็นหินแข็งจะมีการกักเก็บน้ำบาดาลอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกเป็นการกักเก็บในช่วงว่างระหว่างเม็ดตะกอนที่จับตัวกันเป็นหิน เรียกว่า ความพรุนปฐมภูมิ (primary porosity) และส่วนที่สองเป็นการกักเก็บในรอยแตกหรือโพรงจากการละลายของหินซึ่งเกิดหลังจากการแข็งตัวเป็นหิน เรียกว่า ความพรุนทุติยภูมิ (secondary porosity) ตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมเส้นทางและความยาวของการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนภายในชั้นหินอุ้มน้ำ หากสารปนเปื้อนมีความยาวในการเคลื่อนที่มากก็จะต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่ในชั้นหินอุ้มน้ำมากตามไปด้วย ส่งผลให้สารปนเปื้อน

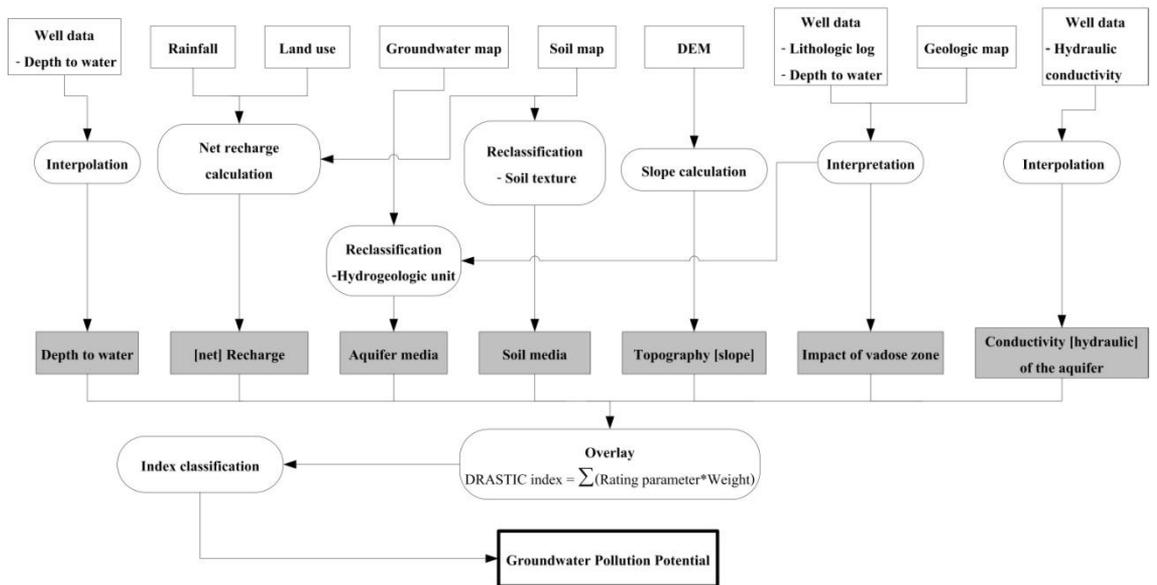
สัมผัสกับวัตถุที่เป็นตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำมากขึ้น โอกาสที่จะเกิดกระบวนการในการเจือจางต่างๆ เช่น การดูดซับ (sorption) การทำปฏิกิริยา (reactivity) และการแพร่ (dispersion) ก็จะมากขึ้นตามไปด้วย โดยทั่วไปตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำที่มีเม็ดตะกอนขนาดใหญ่ หรือมีรอยแตกหรือโพรงจำนวนมากจะมีอัตราการซึมผ่าน (permeability) สูงตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำนั้นจะมีศักยภาพต่อการปนเปื้อนสูง โดยมีช่วงค่าของคะแนนในตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำแต่ละกลุ่มดังแสดงในตารางที่ 4

4. ตัวกลางของดิน

ดินเป็นส่วนที่อยู่บนสุดของชั้นอิมมอคาส และมีความสำคัญต่อกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ ในการพิจารณาขอบเขตของดิน DRASTIC จะพิจารณาเฉพาะส่วนบนของเขตการผุพัง (weathering zone) โดยมีความลึกเฉลี่ยจากผิวดินประมาณ 3 ฟุต หรือน้อยกว่า ดินเป็นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มเติมน้ำลงสู่ น้ำบาดาล เป็นตัวควบคุมอัตราการไหลซึมของน้ำผ่านชั้นดินทั้งความเร็วและปริมาณที่สามารถซึมผ่านลงไปได้ ส่งผลให้ดินเป็นปัจจัยที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนในแนวตั้งไปยังชั้นหินอุ้มน้ำ อย่างไรก็ตามในพื้นที่ที่มีชั้นดินค่อนข้างหนา ก็อาจเกิดกระบวนการในการเจือจางสารปนเปื้อน เช่น การกรอง (filtration) การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) การดูดซับ และการระเหย (volatilization) ภายในชั้นดินได้ และการใช้ประโยชน์ที่ดินบางประเภทก็อาจเป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดสารปนเปื้อน เช่น พื้นที่การเกษตรที่มีการใช้สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ หรือสารกำจัดวัชพืช (herbicide) คุณสมบัติของตัวกลางดินในพื้นที่บริเวณนี้จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลโดยตรง โดยทั่วไปศักยภาพการปนเปื้อนของดินจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้าน ได้แก่

ชนิดของดินเหนียวที่อยู่ภายในเนื้อดิน ศักยภาพในการ ยืดและหดตัว (shrink-swell potential) ของดิน เหนียวนั้นๆ และขนาดของเม็ดดิน ดินที่ประกอบด้วย ดินเหนียวที่มีศักยภาพในการยืดและหดตัวต่ำ และเม็ด ดินขนาดเล็ก จะมีศักยภาพที่จะเกิดการปนเปื้อนน้อย ปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งคือ ปริมาณของวัสดุ

อินทรีย์ (organic material) ในดิน อย่างไรก็ตามใน แบบจำลอง DRASTIC การให้ค่าคะแนนตัวกลางของ ดินจะพิจารณาจากเนื้อดิน (soil texture) เป็นหลัก โดยอ้างอิงกับระบบการจำแนกขนาดเม็ดดินตาม มาตรฐานของ Soil Conservation Service (ตารางที่ 5)



รูปที่ 1 ขั้นตอนการประเมินศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลในแบบจำลอง DRASTIC

ตารางที่ 2 ช่วงค่าของความลึกของระดับน้ำบาดาลและค่า คะแนนที่กำหนดให้ (Aller et al., 1987)

ช่วงค่า (ฟุต)	ค่าคะแนน	ช่วงค่า (ฟุต)	ค่าคะแนน
0-5	10	50-75	3
5-15	9	75-100	2
15-30	7	> 100	1
30-50	5		

ตารางที่ 3 ช่วงค่าของอัตราการเพิ่มเติมน้ำสุทธิและค่าคะแนนที่กำหนดให้ (Aller et al., 1987)

ช่วงค่า (นิ้ว)	ค่าคะแนน
0-2	1
2-4	3
4-7	6
7-10	8
> 10	9

ตารางที่ 4 กลุ่มตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำและช่วงค่าคะแนนที่กำหนดให้ (Aller et al., 1987)

กลุ่ม	ค่าคะแนน	ค่าคะแนนแนะนำ
Massive Shale	1-3	2
Metamorphic/Igneous	2-5	3
Weathered Metamorphic/Igneous	3-5	4
Glacial Till	4-6	5
Bedded Sandstone, Limestone and Shale Sequences	5-9	6
Massive Sandstone	4-9	6
Massive Limestone	4-9	6
Sand and Gravel	4-9	8
Basalt	2-10	9
Karst Limestone	9-10	10

5. ภูมิประเทศ

ปัจจัยเกี่ยวกับภูมิประเทศโดยเฉพาะความลาดชันของพื้นที่ เป็นปัจจัยที่ควบคุมระยะเวลาที่น้ำจะอยู่ในพื้นที่ โดยน้ำเป็นตัวกลางในการนำพาสารปนเปื้อนต่าง ๆ ให้เคลื่อนที่ลงสู่แหล่งน้ำบาดาลในแนวตั้ง ดังนั้นหากน้ำอยู่ในพื้นที่เป็นเวลานานย่อมมีโอกาสที่สารปนเปื้อนจะไหลซึมลงไปดินมากขึ้น ในพื้นที่ที่มีความลาดชันสูงน้ำส่วนใหญ่จะไหลออกจากพื้นที่ตามแรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้นระยะเวลาที่น้ำอยู่ในพื้นที่จึงน้อย แต่ถ้าความลาดชันลดลงระยะเวลาที่น้ำจะอยู่ในพื้นที่ก็ยาวนานขึ้น ในบางพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินซึ่งอาจเป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดสาร

ปนเปื้อน เช่น พื้นที่เกษตรกรรมที่มีการใช้สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืช หรือสารกำจัดวัชพืช น้ำที่ไหลตามความลาดชันของพื้นที่จะเป็นตัวรวบรวมเอาสารปนเปื้อนต่าง ๆ ให้เคลื่อนที่ไปกับน้ำ ทำให้มีสารปนเปื้อนในน้ำผิวดินค่อนข้างมาก ส่งผลให้ปัจจัยเกี่ยวกับภูมิประเทศมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น โดยทั่วไปแล้วลักษณะภูมิประเทศจะสัมพันธ์กับระดับน้ำบาดาล โดยมีความชันและทิศทางการไหลของน้ำใกล้เคียงกัน ทำให้ในพื้นที่ที่มีความลาดชันมากก็มีความเร็วในการไหลของน้ำบาดาลมากด้วย ดังนั้นค่าคะแนนที่กำหนดให้จึงแปรผันตรงกับความลาดชันของพื้นที่ (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 5 กลุ่มตัวกลางของดินและค่าคะแนนที่กำหนดให้ (Aller et al., 1987)

กลุ่ม	ค่าคะแนน	กลุ่ม	ค่าคะแนน
Thin or Absent	10	Loam	5
Gravel	10	Silty Loam	4
Sand	9	Clay Loam	3
Peat	8	Muck	2
Shrinking and/or Aggregated Clay	7	Nonshrink and Nonaggregated Clay	1
Sandy Loam	6		

ตารางที่ 6 ช่วงค่าของความลาดชันของพื้นที่และค่าคะแนนที่กำหนดให้ (Aller et al., 1987)

ช่วงค่า (%)	ค่าคะแนน
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
> 18	1

ตารางที่ 7 กลุ่มตัวกลางของเขตอิมอากาศและช่วงค่าคะแนนที่กำหนดให้ (Aller et al., 1987)

กลุ่ม	ค่าคะแนน	ค่าคะแนนแนะนำ
Confining Layer	1	1
Silt/Clay	2-6	3
Shale	2-5	3
Limestone	2-7	6
Sandstone	4-8	6
Bedded Limestone, Sandstone, Shale	4-8	6
Sand and Gravel with significant Silt and Clay	4-8	6
Metamorphic/Igneous	2-8	4
Sand and Gravel	6-9	8
Basalt	2-10	9
Karst Limestone	8-10	10

6. เขตอิมอากาศ

เขตอิมอากาศ (vadose zone) เป็นเขตที่อยู่เหนือระดับน้ำบาดาล ตัวกลางของเขตอิมอากาศแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติต่อการเจือจางสารปนเปื้อนที่แตกต่างกันออกไป โดยกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเจือจางสารปนเปื้อนที่เกิดขึ้น ได้แก่ การย่อยสลายทางชีวภาพ การทำให้เป็นกลาง (neutralization) การกรอง ปฏิกริยาทางเคมี การระเหย และการแพร่ ซึ่งในส่วนของกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพและการระเหย จะเกิดที่ความลึกไม่มากนัก และจะลดน้อยลงตามระดับความลึกที่เพิ่มขึ้น ตัวกลางในเขตอิมอากาศจะเป็นตัวควบคุมความยาวและเส้นทางของแนวการไหล ซึ่งมีผลต่อระยะเวลาที่สารปนเปื้อนจะอยู่ในเขตอิมอากาศและ

ปริมาณผิวสัมผัสของสารปนเปื้อนกับตัวกลางในเขตอิมอากาศ โดยยังอยู่ในเขตอิมอากาศนานและผิวสัมผัสกับตัวกลางในเขตอิมอากาศมากเท่าใด โอกาสที่สารปนเปื้อนจะถูกทำให้เจือจางก็มีโอกาสเพิ่มมากขึ้น รอยแตกของหินจะเป็นตัวควบคุมเส้นทางการไหลได้เป็นอย่างดี ในการประเมินโดยวิธี DRASTIC ในชั้นหินอุ้มน้ำไร้แรงดันจะถือว่าชั้นตะกอนหรือชั้นหินที่อยู่เหนือระดับน้ำบาดาลเป็นเขตอิมอากาศทั้งหมด แต่หากทำการประเมินเฉพาะชั้นหินอุ้มน้ำมีแรงดัน ในการพิจารณาถึงเขตอิมอากาศจะนับรวมเขตอิมน้ำที่อยู่เหนือชั้นหินอุ้มน้ำที่สนใจเข้าไปด้วย โดยมีช่วงค่าคะแนนในแต่ละกลุ่มตัวกลางของเขตอิมอากาศดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 8 ช่วงค่าของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำและค่าคะแนนที่กำหนดให้ (Aller et al., 1987)

ช่วงค่า (แกลลอน/วัน/ฟุต)	ค่าคะแนน
1-100	1
100-300	2
300-700	4
700-1000	6
1000-2000	8
> 2000	10

7. สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ

สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำเป็นค่าที่บ่งบอกว่าน้ำสามารถไหลผ่านตัวกลางในชั้นหินอุ้มน้ำได้ดีมากน้อยเพียงใด และยังมีผลต่ออัตราการไหลของน้ำบาดาลภายใต้ความชันทางชลศาสตร์ (hydraulic gradient) อัตราการไหลของน้ำบาดาลนี้เองจะเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากจุดที่เกิดการปนเปื้อนไปยังจุดอื่นๆ ในชั้นหินอุ้มน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านขึ้นอยู่กับความต่อเนื่องของช่องว่างภายในชั้นหินอุ้มน้ำ โดยอาจเป็นช่องว่างระหว่างเม็ดตะกอน รอยแตก โพรง หรือระนาบการวางตัวของหิน ซึ่งถ้าชั้นหินอุ้มน้ำมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านสูง แสดงว่ามีศักยภาพต่อการปนเปื้อนสูงด้วย เนื่องจากสารปนเปื้อนจะสามารถเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่เกิดการปนเปื้อนไปยังตำแหน่งอื่นๆ ในชั้นหินอุ้มน้ำได้อย่างรวดเร็ว โดยค่าคะแนนที่กำหนดให้จะแปรผันตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ (ตารางที่ 8)

แหล่งที่มาของข้อมูล

ข้อมูลที่นำมาใช้ในการสร้างชั้นข้อมูลเชิงพื้นที่ของแต่ละปัจจัยในแบบจำลอง DRASTIC สามารถรวบรวมได้จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในด้านนั้น ๆ โดยมี

รายละเอียดที่มาของข้อมูลพื้นฐานในแต่ละปัจจัยจากหน่วยงานในประเทศไทยดังนี้

1. ความลึกของระดับน้ำบาดาล วิเคราะห์จากข้อมูลความลึกของระดับน้ำบาดาลในบ่อบาดาล หลังการเจาะพัฒนาบ่อ หรือข้อมูลจากการติดตามระดับน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์ ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล
2. อัตราการเพิ่มเติมน้ำสุทธิ วิเคราะห์จากข้อมูลปริมาณน้ำฝนของกรมอุตุนิยมวิทยา ร่วมกับข้อมูลดินและการใช้ประโยชน์ที่ดินของกรมพัฒนาที่ดิน
3. ตัวกลางของชั้นหินอุ้มน้ำ วิเคราะห์จากแผนที่ธรณีวิทยาของกรมทรัพยากรธรณี ร่วมกับแผนที่น้ำบาดาลและการหยั่งธรณี (well logs) ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล
4. ตัวกลางของดิน วิเคราะห์จากแผนที่ดินของกรมพัฒนาที่ดิน
5. ภูมิประเทศ วิเคราะห์จากแผนที่ภูมิประเทศของกรมแผนที่ทหาร แต่หากต้องการข้อมูลที่มีความละเอียดเพิ่มมากขึ้นก็อาจใช้ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (digital elevation model, DEM) ของกรมพัฒนาที่ดิน
6. เขตอ้อมอากาศ วิเคราะห์จากแผนที่ธรณีวิทยาของกรมทรัพยากรธรณี และการหยั่งธรณี (well logs) ของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล

7. สัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ วิเคราะห์จากค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านจากการสูบทดสอบของกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ซึ่งจะให้ค่าที่มีความถูกต้องสูง แต่หากไม่มีข้อมูลจากการสูบทดสอบก็อาจประมาณค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของชั้นหินอุ้มน้ำ (K) จากข้อมูลการทดสอบปริมาณน้ำบาดาลเบื้องต้นหลังการเจาะและพัฒนาบ่อบาดาล สามารถคำนวณจากสมการ (U.S. EPA, 1994)

$$K = \frac{T}{b} = 2000 \times \frac{\text{specific capacity}}{b} \quad (2)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การจ่ายน้ำ (transmissivity) มีหน่วยเป็นแกลลอนต่อวันต่อฟุต และ b คือ ความหนาของชั้นหินอุ้มน้ำมีหน่วยเป็นฟุต ส่วนค่า specific capacity สามารถคำนวณได้จากสมการ (U.S. EPA, 1994)

$$\text{specific capacity} = \frac{Q}{wd} \quad (3)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณน้ำที่สูบออก (แกลลอนต่อนาที) wd คือ ระยะน้ำลด (drawdown) หรือการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลก่อนและหลังการสูบ (ฟุต)

เงื่อนไขของ DRASTIC

แม้ว่า DRASTIC จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในทุกสภาพอุทกธรณีวิทยา แต่ก็ยังมีเงื่อนไขการนำไปใช้ดังนี้ (Aller et al., 1987)

1. ผลการประเมินใช้ได้เฉพาะกับแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อนที่อยู่บนผิวดิน
2. น้ำเป็นตัวการหลักในการพาสารปนเปื้อนให้เกิดการเคลื่อนที่

3. สารปนเปื้อนมีการเคลื่อนที่ในชั้นอุ้มน้ำด้วยความเร็วเทียบเท่าการไหลของน้ำบาดาล

4. พื้นที่ที่นำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้จะต้องมีขนาดใหญ่กว่า 100 เอเคอร์ (0.4 ตารางกิโลเมตร)

ซึ่งจากเงื่อนไขขนาดของพื้นที่ที่สามารถนำไปใช้ได้ แสดงให้เห็นว่า DRASTIC เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองในมาตราส่วนระดับภูมิภาค (regional scale) เป็นหลัก (National Research Council, 1993) อย่างไรก็ตามในการพิจารณานำไปใช้จริงนั้นอาจไม่ต้องคำนึงถึงขนาดพื้นที่ที่จะทำการจำลองก็ได้ แต่จะต้องพิจารณาถึงความหลากหลายเชิงพื้นที่ (spatial variation) ของแต่ละปัจจัยเป็นหลัก เนื่องจาก DRASTIC ต้องอาศัยความหลากหลายเชิงพื้นที่ (spatial variation) ของแต่ละปัจจัยในการจำแนกศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล ดังนั้นหากปัจจัยต่างๆ มีค่าความหลากหลายเชิงพื้นที่น้อย ผลการจำลองที่ได้ก็就会有ความหลากหลายเชิงพื้นที่ของศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลน้อยตามไปด้วย

การวิเคราะห์ความอ่อนไหว

การวิเคราะห์ความอ่อนไหว (sensitivity analysis) ของแบบจำลอง DRASTIC จะเป็นการประเมินถึงอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อแบบจำลอง ซึ่งผลที่ได้อาจใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงแบบจำลองให้ดีขึ้น หรือใช้ประเมินความถูกต้องของแบบจำลองในเบื้องต้นได้ เนื่องจากความถูกต้องของแบบจำลอง DRASTIC จะขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณภาพของข้อมูลที่นำมาใช้แปลงเป็นข้อมูลเชิงพื้นที่ในแต่ละปัจจัย ดังนั้นหากทราบว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อแบบจำลองค่อนข้างมาก ถ้าข้อมูลเบื้องต้นของปัจจัยนั้นมีปริมาณเพียงพอและมีคุณภาพดี ผลการจำลองที่

ได้ก็น่าจะมีความถูกต้องพอสมควร หรือหากต้องการปรับปรุงแบบจำลอง ก็ควรที่จะให้ความสนใจในการเก็บข้อมูลเบื้องต้นของปัจจัยนั้น ๆ ให้มีความถูกต้องมากที่สุด การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง DRASTIC แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ map removal และ single-parameter

1. map removal

เป็นการวิเคราะห์โดยการลดจำนวนปัจจัยที่ใช้ในการจำลอง เพื่อตรวจสอบว่าปัจจัยที่ไม่ได้ใช้ในการคำนวณนี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีมากน้อยเพียงใด โดยคำนวณจากสมการ (Babiker et al., 2005) ในทุกกริดเซลล์ (grid cell)

$$S = (|V/N-V'/n|/V) \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ S คือ ความอ่อนไหวที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงปัจจัย V และ V' คือ ค่าดัชนีมีตัวแปรครบทั้ง 7 ตัว และค่าดัชนีที่มีการนำเอาปัจจัยออก (เหลือ 6 ตัว) ตามลำดับ N และ n คือ จำนวนปัจจัยที่ใช้คำนวณ

การแปลผลการคำนวณที่ได้จะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยทั้งพื้นที่ศึกษา โดยปัจจัยใดที่มีค่าเฉลี่ยสูงปัจจัยนั้นจะเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแบบจำลองสูง

2. single-parameter

เป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบถึงอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อค่าดัชนีที่คำนวณได้กับค่าถ่วงน้ำหนักที่กำหนดให้แก่แบบจำลอง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ (Napolitano and Fabbri, 1996) ในทุกกริดเซลล์

$$W = (PrPw / V) \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ W คือ ประสิทธิภาพ (effective) ของค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละปัจจัย Pr และ Pw คือ ค่าคะแนนและค่าถ่วงน้ำหนัก V คือ ค่าดัชนีที่คำนวณได้

การแปลผลการคำนวณที่ได้จะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยทั้งพื้นที่ของผลการคำนวณเทียบกับเปอร์เซ็นต์ค่าถ่วงน้ำหนักที่กำหนดให้แก่แบบจำลอง หากค่าเฉลี่ยของผลการคำนวณมีค่ามากกว่าเปอร์เซ็นต์ค่าถ่วงน้ำหนัก แสดงว่าปัจจัยนั้นมีอิทธิพลต่อค่าดัชนีมาก เนื่องจากมีคุณลักษณะของข้อมูลที่มีศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลสูง ค่าคะแนนของปัจจัยนั้นส่วนใหญ่จึงมีค่าสูง ส่งผลให้ค่าดัชนีที่ได้มีค่าสูงตามไปด้วย

การตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลอง

เนื่องจากการประเมินศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลเป็นการทำนายผลที่จะเกิดขึ้นในอนาคตเช่นเดียวกับการพยากรณ์อากาศ แต่การประเมินศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลจะเป็นการทำนายกระบวนการที่เกิดขึ้นใต้ผิวดินและไม่ได้ระบุถึงระยะเวลาที่แน่นอน (National Research Council, 1993) ทำให้การตรวจสอบความถูกต้องทำได้ค่อนข้างยาก โดยวิธีการตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองจาก DRASTIC ที่นิยมใช้คือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างระดับศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลกับค่าปริมาณไนเตรดที่ตรวจวัดจากบ่อบาดาล โดยในพื้นที่ที่มีระดับศักยภาพสูงก็ควรที่จะมีค่าปริมาณไนเตรดสูงตามไปด้วย เช่นเดียวกับในพื้นที่ที่มีระดับศักยภาพต่ำก็ควรที่จะมีค่าปริมาณไนเตรดต่ำ อย่างไรก็ตามผลการตรวจสอบความถูกต้องในบางพื้นที่พบว่าค่าความสัมพันธ์ที่ได้ค่อนข้างต่ำหรือไม่สามารถระบุความสัมพันธ์ได้ (Ducci, 1999; Al-adamat et al., 2003; Stigter et al., 2006; Almasri, 2008; Debernardi et al., 2008) ซึ่งผลการตรวจสอบความถูกต้องที่ได้อาจยังสรุปไม่ได้ว่าผลการจำลองมีความถูกต้องต่ำ เนื่องจาก DRASTIC เป็นการวิเคราะห์ถึง

ปัจจัยทางกายภาพต่าง ๆ ที่มีผลต่อศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล แต่ไม่ได้พิจารณาถึงกระบวนการทางกายภาพและทางเคมีที่เกิดขึ้น อีกทั้งองค์ประกอบที่แตกต่างกันของสภาพอุทกธรณีวิทยาในแต่ละพื้นที่ที่มีรายละเอียดมากกว่าปัจจัยทางกายภาพที่ใช้ใน DRASTIC ก็อาจส่งผลให้ค่าความสัมพันธ์มีค่าต่ำได้ โดย Debernardi et al. (2008) ได้อธิบายถึงสาเหตุที่เกิดขึ้นดังนี้

พื้นที่ศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลสูงแต่พบค่าปริมาณไนเตรดต่ำมีสาเหตุมาจาก

1. ไม่มีแหล่งกำเนิดไนเตรดในพื้นที่ ทำให้ค่าปริมาณไนเตรดที่ตรวจวัดจากบ่อบาดาลมีค่าต่ำ
2. มีแหล่งกำเนิดไนเตรดในพื้นที่ แต่อาจพบปริมาณไนเตรดต่ำได้ เนื่องจากชั้นหินอุ้มน้ำมีความสามารถในการทำให้เจือจางสูง ทำให้สารปนเปื้อนมีความเข้มข้นลดลง

พื้นที่ศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลต่ำแต่พบค่าปริมาณไนเตรดสูงมีสาเหตุมาจาก

1. เกิดการปนเปื้อนไนเตรดที่มีความเข้มข้นสูงในพื้นที่ต้นน้ำ (upstream) ของน้ำบาดาล แล้วไหลไปปนเปื้อนในพื้นที่ปลายน้ำ (downstream) ซึ่งมีความศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลต่ำ ทำให้อาจพบค่าปริมาณไนเตรดสูงได้
2. ชั้นหินอุ้มน้ำมีความสามารถในการทำให้เจือจางต่ำ เมื่อเกิดการปนเปื้อนความเข้มข้นของไนเตรดจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลง
3. มีสารประกอบไนโตรเจนเพิ่มเติมลงสู่ชั้นหินอุ้มน้ำในปริมาณสูง

นอกจากนี้อาจมีสาเหตุมาจากบ่อบาดาลที่มีการจัดการไม่ดีหรือก่อสร้างไม่ได้มาตรฐาน ทำให้ไนเตรดสามารถไหลลงไปในบ่อบาดาลได้โดยตรง และเกิดการปนเปื้อนขึ้น

สรุป

DRASTIC ถือเป็นแบบจำลองที่มีความสะดวก รวดเร็ว และไม่ยุ่งยาก ทั้งในส่วนของ การนำไปใช้และการตีความผลที่ได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทุกสภาพอุทกธรณีวิทยา อีกทั้งข้อมูล ที่นำมาใช้ก็สามารถหาได้จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง แผน ที่ศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาลที่ได้ ถือเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการวางแผนการใช้ประโยชน์ ที่ดินที่เป็นแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อน โดยพิจารณาความสัมพันธ์กับศักยภาพการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล รวมทั้งการวางแผนการติดตามการปนเปื้อนของแหล่งน้ำบาดาล อย่างไรก็ตาม DRASTIC ก็ยังมีเงื่อนไขที่ผู้ใช้ต้องคำนึงถึง อีกทั้งการตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ ดังนั้นในการตรวจสอบความถูกต้องในเบื้องต้นอาจจะประเมินได้จากผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของแบบจำลอง ซึ่งจะแสดงถึงอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อแบบจำลอง ความถูกต้องของแบบจำลอง DRASTIC จึงขึ้นอยู่กับปริมาณและคุณภาพของข้อมูลที่นำมาใช้เป็นสำคัญ

เอกสารอ้างอิง

- วันเพ็ญ บัวระพา. (2547). การประยุกต์ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อทำแผนที่ความอ่อนไหวต่อการปนเปื้อนของแหล่งน้ำใต้ดินในลุ่มน้ำพองตอนล่าง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น. 88 หน้า
- Ahmed, A.A. (2009). Using Generic and Pesticide DRASTIC GIS-based models for vulnerability assessment of the Quaternary aquifer at Sohag, Egypt. *Hydrogeology Journal* 17(5): 1203-1217.
- Akhavan, S., Mousavi, S.F., Abedi-Koupai, J. and Abbaspour, K.C. (2011). Conditioning

- DRASTIC model to simulate nitrate pollution case study: Hamadan-Bahar plain. *Environmental Earth Sciences* 63(6): 1155-1167.
- Al-Adamat, R.A.N., Foster, I.D.L., and Baban, S.M.J. (2003). Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC. *Applied Geography* 23: 303-324.
- Al-Zabet, T. (2002). Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. *Environmental Geology* 43: 203-208.
- Aller, L., Bennet, I., Lehr, J.H., Petty, R.J., and Hackett, G. (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Illinois: U.S. Environmental Protection Agency. pp. 1-29.
- Almasri, M.N. (2008). Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. *Journal of Environmental Management* 88: 577-593.
- Assaf, H. and Saadeh, M. (2009). Geostatistical Assessment of Groundwater Nitrate Contamination with Reflection on DRASTIC Vulnerability Assessment: The Case of the Upper Litani Basin, Lebanon. *Water Resources Management* 23(4): 775-796.
- Awawdeh, M.M. and Jaradat, R.A. (2010). Evaluation of aquifers vulnerability to contamination in the Yarmouk River basin, Jordan, based on DRASTIC method. *Arabian Journal of Geosciences* 3(3): 273-282.
- Baalousha, H. (2006). Vulnerability assessment for the Gaza Strip, Palestine using DRASTIC. *Environmental Geology* 50(3): 405-414.
- Boughriba, M., Barkaoui, A., Zarhloule, Y., Lahmer, Z., El Houadi, B. and Verdoya, M. (2010). Groundwater vulnerability and risk mapping of the Angad transboundary aquifer using DRASTIC index method in GIS environment. *Arabian Journal of Geosciences* 3(2): 207-220.
- Bukowski, P., Bromek, T. and Augustyniak, I. (2006). Using the DRASTIC System to Assess the Vulnerability of Ground Water to Pollution in Mined Areas of the Upper Silesian Coal Basin. *Mine Water and the Environment* 25(1): 15-22.
- Chae, G., Kim, K., Yun, S., Kim, K., Kim, S., Choi, B., Kim, H. and Rhee, C.W. (2004). Hydrogeochemistry of alluvial groundwaters in an agricultural area: an implication for groundwater contamination susceptibility. *Chemosphere* 55: 369-378.
- Chitsazan, M. and Akhtari, Y. (2009). A GIS-based DRASTIC Model for Assessing Aquifer Vulnerability in Kherran Plain, Khuzestan, Iran. *Water Resources Management* 23(6): 1137-1155.
- Debernardi, L., De Luca, D.A., and Lasagna, M. (2008). Correlation between nitrate concentration in groundwater and parameters affecting aquifer intrinsic vulnerability. *Environmental Geology* 55: 539-558.
- Denny, S.C., Allen, D.M. and Journeay, J.M. (2007). DRASTIC-Fm: a modified vulnerability mapping method for structurally controlled aquifers in the southern Gulf Islands, British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal* 15(3): 483-493.
- Doerfliger, N. and Zwahlen, F. (1995). EPIK: a new method for outlining of protection areas in karst environment, In Günay, G. and

- Johnson, I. (1995). In: Proceedings 5th International symposium and field seminar on karst waters and environmental impacts, Antalya. Balkema, Rotterdam. 117-123.
- Ducci, D. (1999). GIS techniques for mapping groundwater contamination risk. *Natural Hazard* 20: 279-294.
- Foster, S.S.D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: van Duijvenbooden, W. and van Waegeningh, H.G. (eds) TNO Committee on Hydrological Research, The Hague. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Proceedings and Information 38: 69-86.
- Fritch, T.G., McKnight, C.L., Yelderman Jr, J.C. and Arnold J.G. (2000). An Aquifer Vulnerability Assessment of the Paluxy Aquifer, Central Texas, USA, Using GIS and a Modified DRASTIC Approach. *Environmental Management* 25(3): 337-345.
- Giambelluca, T.W., Loague, K., Green, R.E. and Nullet, M.A. (1996). Uncertainty in recharge estimation: impact on groundwater vulnerability assessments for the Pearl Harbor Basin, O'ahu, Hawai'i, USA. *Journal of Contaminant Hydrology* 23: 85-112.
- Gomezdelcampo, E. and Dickerson, J.R. (2008). A modified DRASTIC model for Siting Confined Animal Feeding Operations in Williams County, Ohio, USA. *Environmental Geology* 55(8): 1821-1832.
- Herlinger, R. and Viero, A.P. (2007). Groundwater vulnerability assessment in coastal plain of Rio Grande do Sul State, Brazil, using drastic and adsorption capacity of soils. *Environmental Geology* 52(5): 819-829.
- Jamrah, A., Al-Futaisi, A., Rajmohan, N. and Al-Yaroubi, S. (2008). Assessment of groundwater vulnerability in the coastal region of Oman using DRASTIC index method in GIS environment. *Environmental Monitoring and Assessment* 147: 125-138.
- Lake, I.R., Lovett, A.A., Hiscock, K.M., Betson, M., Foley, A., Suñnenberg, G., Evers, S. and Fletcher, S. (2003). Evaluating factors influencing groundwater vulnerability to nitrate pollution: developing the potential of GIS. *Journal of Environmental Management* 68(3): 315-328.
- Lee, S. (2003). Evaluation of waste disposal site using the DRASTIC system in Southern Korea. *Environmental Geology* 44(6): 654-664.
- Liggett, J.E. and Allen, D.M. (2011). Evaluating the sensitivity of DRASTIC using different data sources, interpretations and mapping approaches. *Environmental Earth Sciences* 62(8): 1577-1595.
- Lima, M.L., Zelaya, K. and Massone, H. (2011). Groundwater Vulnerability Assessment Combining the Drastic and Dyna-Clue Model in the Argentine Pampas. *Environmental Management* 47(5): 828-839.
- Napolitano, P. and Fabbri, A.G. (1996). Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS, In Kovar, K. and Nachtnebel, H.P. (eds.). In: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management: Proceedings of the HydroGIS' 96 Conference Held in Vienna in April 1996 (IAHS Proceedings & Reports). IAHS Publication, Wallingford. 559-566.
- Naqa, A.E. (2004). Aquifer vulnerability assessment using the DRASTIC model at Russeifa landfill,

- northeast Jordan. *Environmental Geology* 47(1): 51-62.
- National Research Council. (1993). *Groundwater Vulnerability Assessment. Predicting Relative Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty*. Washington, DC: National Academy Press. pp. 8, 19.
- Panagopoulos, G.P., Antonakos, A.K. and Lambrakis, N.J. (2006). Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal* 14(6): 894-911.
- Pathak, D.R., Hiratsuka, A., Awata, I. and Chen, L. (2009). Groundwater vulnerability assessment in shallow aquifer of Kathmandu Valley using GIS-based DRASTIC model. *Environmental Geology* 57(7): 1569-1578.
- Prasad, R.K., Singh, V. S., Krishnamacharyulu, S.K.G. and Banerjee, P. (2011). Application of drastic model and GIS: for assessing vulnerability in hard rock granitic aquifer. *Environmental Monitoring and Assessment* 176: 143-155.
- Ratana, P. (2000). *Drastic groundwater vulnerability mapping using gis technology*. Master of Science, Bogor Agricultural University. Bogor. 1 vol (in various pagings).
- Saidi, S., Bouri, S. and Dhia, H.B. (2009). Groundwater vulnerability and risk mapping of the Hajeb-jelma aquifer (Central Tunisia) using a GIS-based DRASTIC model. *Environmental Earth Sciences* 59(7): 1579-1588.
- Sarapirome, S. and Majandang, J. (2008). *Groundwater Vulnerability Mapping Using a GIS-based DRASTIC Model at Lam Takhong Subbasin, Nakhon Ratchasima, Thailand*. In: *Proceedings of the International Symposia on Geoscience Resources and Environments of Asian Terranes (GREAT 2008)*, 4th IGCP 516, and 5th APSEG. Department of Geology, Chulalongkorn University, Bangkok. 559-564.
- Sener, E., Sener, S. and Davraz, A. (2009). Assessment of aquifer vulnerability based on GIS and DRASTIC methods: a case study of the Senirkent-Uluborlu Basin (Isparta, Turkey). *Hydrogeology Journal* 17(8): 2023-2035.
- Sinan, M. and Razack, M. (2009). An extension to the DRASTIC model to assess groundwater vulnerability to pollution: application to the Haouz aquifer of Marrakech (Morocco). *Environmental Geology* 57(2): 349-363.
- Soutter, M. and Musy, A. (1998). Coupling 1D Monte-Carlo simulations and geostatistics to assess groundwater vulnerability to pesticide contamination on a regional scale. *Journal of Contaminant Hydrology* 32: 25-39.
- Srinivasamoorthy, K., Vijayaraghavan, K., Vasanthavigar, M., Sarma, V.S., Rajivgandhi, R., Chidambaram, S., Anandhan, P. and Manivannan, R. (2011). Assessment of groundwater vulnerability in Mettur region, Tamilnadu, India using drastic and GIS techniques. *Arabian Journal of Geosciences* 4: 1215-1228.
- Stigter, T.Y., Ribeir, L., and Carvalho Dill, A.M.M. (2006). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal* 14: 79-99.
- Subtavewung, T. (2006). *Vulnerability Assessment of Groundwater Resources, Chiang Mai Basin, Northern Thailand*. Master of Science, Chiang Mai University. Thailand. 136 pp.

- Thapinta, A. and Hudak, P. (2003). Use of geographic information systems for assessing groundwater pollution potential by pesticides in Central Thailand. *Environmental International* 29: 87-93.
- Tilahun, K. and Merkel, B.J. (2009). Assessment of groundwater vulnerability to pollution in Dire Dawa, Ethiopia using DRASTIC. *Environmental Earth Sciences* 59(7): 1485-1496.
- Umar, R., Ahmed, I. and Alam, F. (2009). Mapping groundwater vulnerable zones using modified DRASTIC approach of an alluvial aquifer in parts of central Ganga plain, Western Uttar Pradesh. *Journal of the Geological Society of India* 73(2): 193-201.
- United States Environmental Protection Agency. (1994). *Handbook: Ground Water and Wellhead Protection*. Washington, DC: Office of Ground-Water Protection. pp. 55.
- Van Stempvoort, D., Evert, L., and Wassenaar, L. (1993). Aquifer vulnerability index: A GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal* 18: 25-37.
- Villeneuve, J.P., Banton, O. and Lafrance, P. (1990). A probabilistic approach for the groundwater vulnerability to contamination by pesticides: the VULPEST model. *Ecological Modelling* 51: 47-58.
- Wen, X., Wu, J. and Si, J. (2009). A GIS-based DRASTIC model for assessing shallow groundwater vulnerability in the Zhangye Basin, northwestern China. *Environmental Geology* 57(6): 1435-1442.
- Zektser, I.S., Karimova, O.A., Bijuoli, J. and Bucci, M. (2004). Regional estimation of fresh groundwater vulnerability: methodological aspects and practical applications. *Water Resources* 31(6): 645-650.

