

การแปลงคำตอบบนไลตติลล์ของการจำลองการเคลื่อนที่มลพิษน้ำบาดาลลงในเอ็กซ์เซลสเปรดชีต

Implementing Analytical Solutions of Groundwater Contaminant Transport Modeling into EXCEL Spreadsheet

กิจการ พรหมมา

Kitchakarn Promma

ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

*Corresponding author, E-mail: kitpromma@yahoo.com

บทคัดย่อ

คำตอบบนไลตติลล์จำลองการเคลื่อนที่ของมลพิษน้ำบาดาลเป็นสูตรคณิตศาสตร์ที่คำนวณได้ครั้งละ 1 ค่า ถ้าใส่ลงไปในเอ็กซ์เซลสเปรดชีตจะช่วยให้คำนวณง่ายและได้ครั้งละหลายค่า วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อแปลงคำตอบโดเมนนิโกให้คำนวณความเข้มข้นของตัวชี้วัดมลพิษได้ในเอ็กซ์เซลสเปรดชีต วิธีทำเริ่มต้นด้วยการนำพจน์ในคำตอบโดเมนนิโกไปใช้เป็นสมการต่าง ๆ ของเอ็กซ์เซลสเปรดชีต เมื่อคูณกลับค่าของพจน์เหล่านั้นจะได้ความเข้มข้นของมลพิษในตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวแกน x ภาพจำลองพุ่มมลพิษ 3 มิติเกิดจากการคำนวณซ้ำ ๆ โดยคงค่าระยะทาง x และ y หรือ x และ z และเปลี่ยนแปลงค่า z และ y ตามลำดับ สรุปว่าการแปลงคำตอบโดเมนนิโกลงไปในเอ็กซ์เซลสเปรดชีตสามารถทำได้และใช้งานง่าย

คำสำคัญ: คำตอบบนไลตติลล์ เอ็กซ์เซลสเปรดชีต การจำลองแบบการเคลื่อนที่มลพิษน้ำบาดาล

Abstract

Analytical solutions for simulate contaminant transport in groundwater are mathematical formula that yield 1 concentration value at a time. If the solutions are implemented into an EXCEL spreadsheet, the spreadsheet will simplify the calculation by calculating several concentrations simultaneously. The objective of this paper is to implement the Domenico solution to calculate concentrations of indicative contaminants into the EXCEL spreadsheet. This study is done by putting in individual terms to the Domenico solution in spreadsheet columns. The calculation result was concentrations of the contaminant along the x axis. Three-dimensional plumes were made by repetitive calculations, while fixing x - y or x - z and varying z and y , respectively. In conclusion, it is simple to implement the Domenico solution into EXCEL spreadsheet and easy to use it.

Keywords: analytical solution, EXCEL spreadsheet, groundwater contaminant transport modeling

1. บทนำ

แบบจำลองการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลมักเขียนขึ้นโดยใช้ชุดคำสั่งภาษาคอมพิวเตอร์แบบจำลองมีทั้งชนิดอนาไลติคัลและนัมเมอร์คัล ปัจจุบันนิยมใช้วิธีนัมเมอร์คัล ซึ่งเป็นการประมาณคำตอบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณซ้ำ ๆ สมการเชิงอนุพันธ์ถูกแปลงให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ จากนั้นมีการแก้สมการเมทริกซ์ด้วยอัลกอริทึมเฉพาะทาง มีโปรแกรมแพร่หลายจำนวนมาก แต่โปรแกรมเหล่านี้ยังคงเกิดปัญหาการสั่นเทิ้มหรือความผิดพลาดทางนัมเมอร์คัลที่แก้ไขยังไม่สำเร็จ อีกทั้งโปรแกรมมักมีราคาแพง รายละเอียดแสดงไว้ใน Zheng and Bennett (2002)

บทความวิจัยนี้ใช้แบบจำลองชนิดอนาไลติคัล เพราะใช้งานง่าย ฟรี ไม่มีข้อบกพร่องทางนัมเมอร์คัล และใช้ประมาณค่าความยาวและขอบเขตของพุ่มมลพิษสำเร็จลงได้อย่างรวดเร็ว

สมการการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลเกิดจากกระบวนการแอดเวกชันและดิสเพอร์ชัน เมื่อการไหลของน้ำบาดาลเป็นไปอย่างคงที่ในทิศทางขนานกับแกน x จะเขียนสมการได้เป็น (Bear, 1979)

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

โปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้นนี้ใช้หลักการของคำตอบโดเมนนิโก (Domenico & Robbins, 1985) ซึ่งเป็นที่แพร่หลายในตำราด้านน้ำบาดาลยอดนิยม (Domenico & Schwartz, 1998) คำตอบโดเมนนิโกเป็นคำตอบอนาไลติคัลชนิดประมาณค่าจากคำตอบจริง มีพจน์ต่าง ๆ ที่สามารถนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมลงใน

เอ็กซ์เซลสเปรดชีตได้ เช่น เอรอร์ฟังก์ชัน คอมพลิเมนต์ารีเอรอร์ฟังก์ชัน และการบวกลบคูณหาร เมื่อผู้ใช้งานกรอกค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ศึกษาของตนเองลงไป โปรแกรมจะคำนวณค่าและวาดกราฟโดยอัตโนมัติ กราฟที่ได้รับเป็นโค้งมลสารที่ขนานไปกับแกนของพุ่ม พุ่มคือภาพการแพร่กระจายของมลสารใน 3 มิติ ผู้ใช้งานสามารถสั่งพิมพ์กราฟได้ตามต้องการ หรือนำผลไปสะสมเพื่อวาดภาพตัดขวางพุ่มหรือแผนที่พุ่มในช่วงระยะเวลาที่สนใจได้

สมการที่ (1) มีหลายคำตอบ คำตอบที่ใช้ในการวิจัยนี้คือ คำตอบโดเมนนิโก โดยกำหนดให้แหล่งกำเนิดเป็นระนาบแนวดิ่ง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$C(x,y,z,t) = \left(\frac{C_0}{8} \right) \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x-vt}{\sqrt{4D_x t}} \right) \right] \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y + \frac{W}{2}}{\sqrt{4D_y t}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y - \frac{W}{2}}{\sqrt{4D_y t}} \right) \right] \left[\operatorname{erf} \left(\frac{z + H}{\sqrt{4D_z t}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z - H}{\sqrt{4D_z t}} \right) \right] \quad (2)$$

โดยที่ C = ความเข้มข้นของมลสาร [มก./ล.]

$D_x = \alpha_x v$, $D_y = \alpha_y v$, $D_z = \alpha_z v$ คือค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกดิสเพอร์ชันในทิศทาง x , y และ z [ตร.ม./วัน]

$\alpha_{x,y,z}$ = ดิสเพอร์ซีวิตี [ม.]

$v = v_{gw}/R_f$ = ความเร็วการเคลื่อนที่ของมลพิษ [ม./วัน]

$v_{gw} = -(K/n)(\partial h/\partial x)$ = ความเร็วการไหลของน้ำบาดาล [ม./วัน]

R_f = ปัจจัยความหน่วง [ไม่มีหน่วย]

$\lambda = -\ln 2/t_{1/2}$ = ค่าคงที่การสลายตัว [ต่อวัน]

$t_{1/2}$ = ครึ่งชีวิต [วัน]

x, y, z = ระยะทางจากแหล่งกำเนิด [ม.]

W = ความกว้างของแหล่งกำเนิด [ม.]

H = ความลึกของแหล่งกำเนิด [ม.]

t = เวลา [วัน]

แหล่งกำเนิดมลพิษควบคุมรูปร่าง ขนาด และความเข้มข้นของพุ่ม นิยมวางแหล่งกำเนิดไว้ที่ขอบเขตด้านต้นน้ำทางซ้ายที่ส่วนบนสุดของชั้นน้ำ และพุ่มแพร่กระจายออกไปด้านท้ายน้ำทางขวา ในอดีตมีการจำลองแบบแหล่งกำเนิดหลายรูปทรง ได้แก่ (1) จุด (Codell et al., 1982) (2) เส้นแนวตั้ง (Wilson & Miller, 1978) (3) ระนาบแนวตั้ง (Domenico & Robbins, 1985; Huyakorn et al., 1987) (4) ระนาบแนวราบ (Galya, 1987; Walker & White, 2001) (5) เส้นสามมิติ (Park & Zhan, 2001) และ (6) กล้องสี่เหลี่ยม (Promma, 2010) การวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดรูปทรงระนาบแนวตั้ง

คำตอบโดเมนนิโกนำไปใช้สร้างเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์แล้วใช้ในงานภาคสนามหลายครั้ง (Fryar & Domenico, 1989; Ala & Domenico, 1992; Tong & Rong, 2002) ต่อมา Domenico (1987) ขยายผลเพื่อจำลองการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีและการย่อยสลายทางชีวภาพ

การวิจัยล่าสุดเกี่ยวกับแบบจำลองอนาลิติคัลที่เกี่ยวข้องกับคำตอบโดเมนนิโกมีดังนี้ มีการอภิปรายเกี่ยวกับคำตอบโดเมนนิโกอย่างกว้างขวาง (Batu, 2008; Aziz et al., 2009; Prakash, 2009) แม้ว่า West et al. (2007) วิเคราะห์ข้อบกพร่องของคำตอบโดเมนนิโกไว้มาก แต่ Srinivasan et al. (2007) ได้วิเคราะห์ขั้นสูงหักล้างและยืนยันว่าคำตอบโดเมนนิโกยังใช้งานได้ดี เช่น เมื่อพิจารณาในแนวแกนพุ่ม โดยมีเงื่อนไขคือ (1)

แอตเวกชันและดิสเพอร์ชันเชิงกลเด่น (2) ค่าดิสเพอร์ชันต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับระยะทางที่มลพิษเคลื่อนที่ไป (3) น้ำบาดาลไหลอย่างรวดเร็ว และ (4) จำลองในช่วงระยะเวลายาวนาน (Guyonnet and Neville, 2004; Aziz et al., 2009) Zhang and Heathcote (2003) จัดการประมาณค่าที่สูงเกินจริงของอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพออกไป Gutierrez-Neri et al. (2009) นำคำตอบโดเมนนิโกไปศึกษาการย่อยสลายบริเวณใจกลางการปนเปื้อนและชายขอบ โดยที่ Hunkeler et al. (2010) ได้แก้ไขข้อบกพร่องดังกล่าวอีกเล็กน้อยเพื่อแยกแยะระหว่างปฏิกิริยาโคเนดิกส์ชั้นที่หนึ่งกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างทันใดให้ชัดเจนยิ่งขึ้น Devlin et al. (2012) นำคำตอบโดเมนนิโกไปใช้สอนในชั้นเรียน เป้าหมายหลักของบทความนี้คือการนำไปใช้ในภาคสนามแทนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ต้องจัดหาใช้ในการเรียนการสอนในระดับอุดมศึกษาได้ และองค์การบริหารส่วนตำบลสามารถใช้ผลงานนี้ได้

2. วัตถุประสงค์

เพื่อนำคำตอบโดเมนนิโกไปสร้างเป็นโปรแกรมในเอ็กซ์เซลสเปรดชีตที่สามารถจำลองการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลออกจากแหล่งมลพิษชนิดระนาบแนวตั้งและปนเปื้อนอย่างต่อเนื่อง

3. วิธีการ

เอ็กซ์เซลสเปรดชีตมาพร้อมกับชุดโปรแกรมไมโครซอฟท์ออฟฟิศ วิธีทำเริ่มต้นด้วยการสร้างสมการต่าง ๆ ให้เป็นพจน์ของคำตอบโดเมนนิโก จากนั้นเลือกใช้คำสั่งทางวิศวกรรมให้คำนวณเอเรอร์ฟังก์ชันคอมพลิเมนต์ารีเอเรอร์ฟังก์ชัน และคำนวณค่าอื่น ๆ จัดสรรเซลล์ต่าง ๆ ให้ผู้ใช้งานได้กรอกค่าตามต้องการ จากนั้นวาดกราฟโค้งมลสารโดยอัตโนมัติ เมื่อคงค่าระยะทาง x และ y และเปลี่ยนแปลงค่า z อย่างเป็น

ระบบ จะได้ภาพตัดขวางพุ่ม หรือองค์ระยะทาง x และ z และเปลี่ยนแปลงค่า y อย่างเป็นระบบ จะได้แผน ที่พุ่ม เมื่อรวมภาพตัดขวางพุ่มและแผนที่พุ่มเข้า ด้วยกันจะได้ภาพของพุ่มใน 3 มิติ

ตัวอย่างการวาดกราฟโค้งมลสารได้ใช้ค่าตัวแปรดังนี้ x มีค่า 1,200 ม. ช่วงละ 20 ม. y มีค่า 125 ม. ช่วงละ 5 ม. z มีค่า 0 ม. t มีค่า 1,030 วัน W มีค่า 227 ม. H มีค่า 1 ม. C_0 มีค่า 245 มก./ล. v มีค่า 0.5 ม./วัน, α_x และ α_z มีค่า 10, 0.1 และ 0.01 วัน ตามลำดับ

4. ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

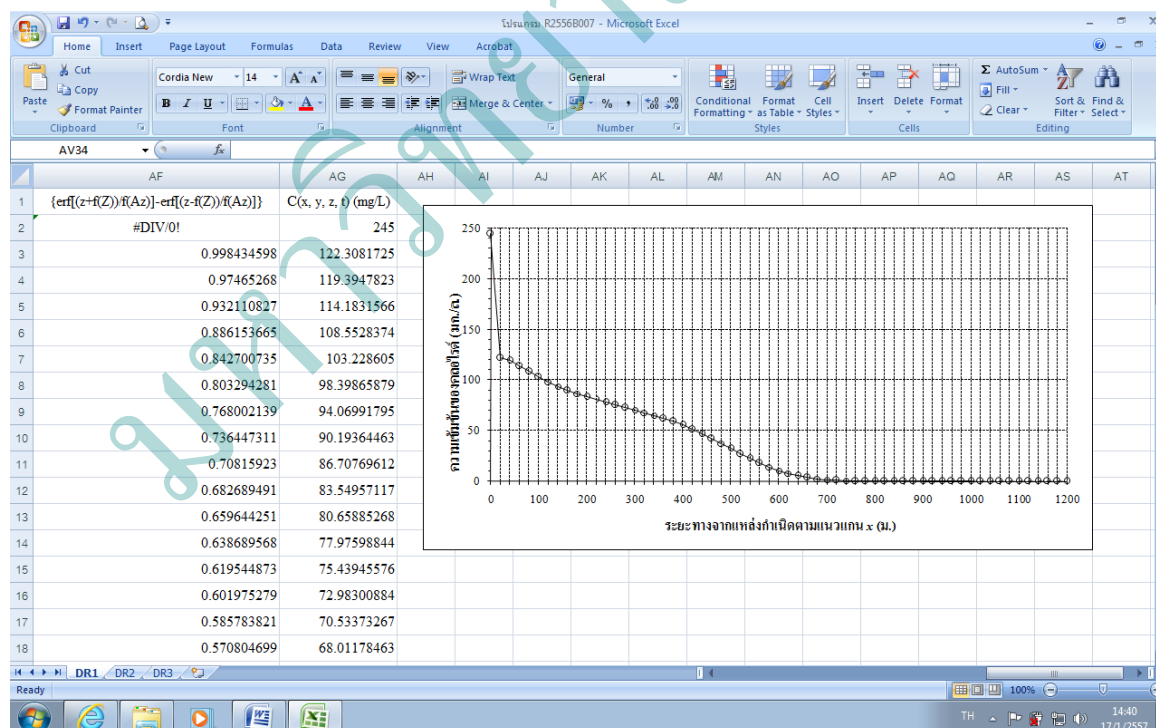
เอ็กซ์เซลสเปรดชีตที่พัฒนาขึ้นนี้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูง เพราะผลลัพธ์ของความเข้มข้นของ

มลสาร ณ สถานที่และเวลาใด ๆ แสดงในทันทีที่การป้อนข้อมูลสิ้นสุดลง

โปรแกรมแบ่งย่อยออกเป็น 5 ส่วน (รูปที่ 1)

1. ส่วนการกำหนดค่าพิกัดและตัวแปรทั่วไป
เอ็กซ์เซลสเปรดชีต ใช้อักษรตัวเข้มเพื่อเตือนให้ ผู้ใช้งานทราบว่าค่าเหล่านี้เป็นสิ่งที่ต้องกำหนดขึ้น ได้แก่ $x, y, z, t, W, H, C_0, v, \alpha_x, \alpha_z$ และ α_y

2. ส่วนการคำนวณในแนวแกน x
เอ็กซ์เซลสเปรดชีตใช้อักษรตัวปกติเพื่อแสดงให้ ผู้ใช้งานทราบว่าค่าในสดมภ์ต่าง ๆ เป็นสิ่งที่ได้จากการคำนวณโดยคอมพิวเตอร์ตามสูตรที่ได้กำหนดไว้ ได้แก่ $x-vt, f(\alpha_x)$, ผลหารระหว่าง $x-vt$ และ $f(\alpha_x)$ และค่าคอมพลิเมนต์ารีเอเรอร์ฟังก์ชันของผลหารดังกล่าว



รูปที่ 1 เอ็กซ์เซลสเปรดชีตจำลองการเคลื่อนที่มลพิษน้ำบาดาล ได้มาจากการแปลงพจน์ต่าง ๆ ในคำตอบโดเมนนิโกลงไปในสดมภ์เอ็กซ์เซลสเปรดชีต ผลการคำนวณจะให้ความเข้มข้นของมลสารตามแนวแกน x ซึ่งวาดเป็นกราฟโค้งมลสารโดยอัตโนมัติ

3. ส่วนการคำนวณในแนวแกน y เอ็กซ์เซล-สเปรดชีทใช้อักษรตัวปกติได้แก่ D_x , D_y , $f(Y)$, $f(\alpha_y)$, $[(y+f(Y))/f(\alpha_y)]$, $[(y-f(Y))/f(\alpha_y)]$, ค่าเอเรอร์ฟังก์ชัน และ ผลต่าง

4. ส่วนการคำนวณในแนวแกน z ได้แก่ $f(Z)$, $f(\alpha_z)$, $[(z+f(Z))/f(\alpha_z)]$, $[(z-f(Z))/f(\alpha_z)]$, ค่าเอเรอร์ฟังก์ชันและผลต่าง

5. ส่วนการคำนวณผลลัพธ์และการวาดแผนภูมิ ผลลัพธ์มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างส่วนต่าง ๆ ในข้อ 2.-4. และความเข้มข้นเริ่มต้น C_0 หาดด้วย 8 ผลลัพธ์ที่ได้ถูกนำไปวาดกราฟเชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นที่ได้ในแกนตั้งและระยะทางจากแหล่งกำเนิดตามแนวแกน x ในแกนนอน เรียกว่า โฉมมัลสาร ซึ่งแสดงแทรกไว้ท้ายแผ่นงานกราฟ 1 รูปแสดงภาพ 1 มิติตามแนวแกน x

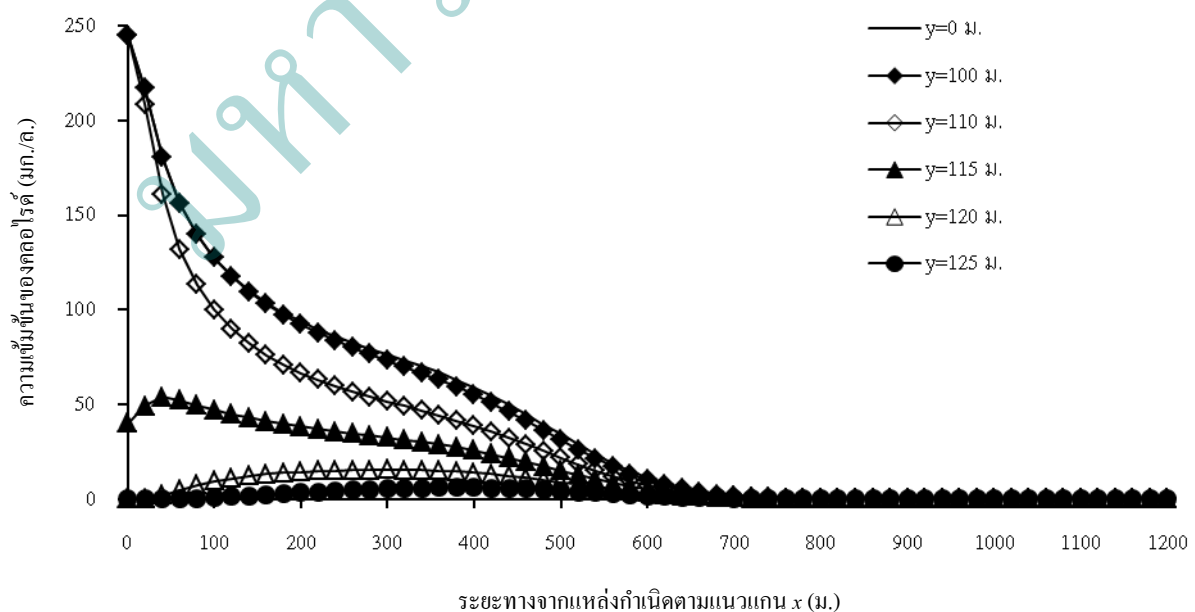
รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างกราฟโคมมัลสารจากการจำลองแบบการกระจายตัวของคลอไรด์ออกจากแหล่งกำเนิดชนิดระนาบแนวดิ่งไปในน้ำบาดาลที่ส่วนบนสุดของชั้นน้ำ $z = 0$ ม. โดยคงค่า x และ z แล้ว

แปรเปลี่ยนค่า y ไปทีละขั้น ๆ ละ 5 เมตร กราฟแสดงว่าความเข้มข้นของคลอไรด์คงที่ในช่วง 100 ม. จากแกนพлум แต่เจือจางอย่างรวดเร็วในช่วง 100-125 ม. จากแกนพлум จึงไม่ได้วาดกราฟในช่วง 0-100 ม. ไว้

5. การอภิปรายผล

กราฟที่โปรแกรมสร้างขึ้นอาจสื่อสารให้บุคคลทั่วไปเข้าใจได้ยากเพราะเป็นกราฟระหว่างความเข้มข้นของมลสารที่สนใจและเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางตามแนวแกน x ออกไปจากแหล่งกำเนิด สิ่งที่ได้อธิบายความยาวแกนพлум ทำให้เข้าใจว่าพлумมลพิษไปได้ไกลมากที่สุดเท่าใดแล้ว ณ เวลาที่สนใจ มลพิษในบริเวณอื่น ๆ นอกแกนพлумจะมีระยะทางในการเคลื่อนที่น้อยกว่าเสมอ

จุดอ่อนที่สำคัญในการออกแบบให้มีการคำนวณขนานกับแกน x เพียงอย่างเดียวก็คือ ทำให้ต้องคำนวณซ้ำ ๆ โดยเปลี่ยนระยะ y และ z ไปทีละน้อย โปรแกรมคำนวณได้ครั้งละ 1 ตำแหน่ง ดังนั้น เมื่อ



รูปที่ 2 ตัวอย่างกราฟโคมมัลสารจากการจำลองแบบการกระจายตัวของคลอไรด์ในน้ำบาดาลที่ส่วนบนสุดของชั้นน้ำ

ต้องการวาดภาพ 3 มิติ จึงต้องคำนวณสะสมข้อมูลไว้ เพื่อนำไปวาดภาพ 3 มิติ ขึ้นตอนเช่นนี้ทำให้เกิดความยุ่งยากและสับสนต่อผู้ที่ไม่ชำนาญในการใช้งานได้อีก ทั้งการวาดภาพ 3 มิติต้องวาดเส้นชั้นแสดงความเข้มข้นของมวลสารที่มีค่าเท่ากัน หรือวาดเขตความเข้มข้นด้วยเฉดสีต่าง ๆ จากเฉดสีเข้มไปหาเฉดสีจางเพื่อแสดงการเจือจางออกไปจากแหล่งกำเนิดมลพิษ ผู้วาดจึงต้องชำนาญหรือเคยมีประสบการณ์ในการวาดเส้นชั้นมาก่อน ไม่สามารถใช้เอ็กซ์เซลสเปรดชีทวาดได้ หรือถ้าต้องการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์วาดให้ ก็ต้องซื้อโปรแกรมเฉพาะทางที่มีราคาแพง

การจำลองแบบสามารถกระทำได้ง่ายโดยใช้ข้างใดข้างหนึ่งของแกนพิกัด ($x, 0, z$) เพราะแกนพิกัดมีสมมาตรในการศึกษานี้คำนวณเพียงข้างขวาแล้วให้ด้านซ้ายคือภาพสะท้อน การทำเช่นนี้ทำให้การคำนวณง่ายขึ้น การกำหนดค่า z ควรคำนึงถึงขนาดของแหล่งกำเนิดมลพิษเสมอ ไม่ตื้นเกินไปหรือลึกเกินไป เพื่อสามารถเห็นท้องของพุ่มที่ห้อยต่ำ แต่ควรพิจารณาข้อจำกัดเสมอว่า ในชั้นน้ำจริงมักมีความหนาของชั้นน้ำแน่นอน แต่คำตอบโดเมนนิโกสมมุติให้ชั้นน้ำมีความหนานั้นดี

ปัญหาส่วนมากของผู้สร้างโปรแกรมที่แปลงสูตรคณิตศาสตร์ลงในเอ็กซ์เซลสเปรดชีทก็คือ การไม่สามารถเขียนคำสั่งคำนวณฟังก์ชันทางวิศวกรรม ในการนี้ควรศึกษาคู่มือใช้งานที่แนบมาพร้อมกับชุดโปรแกรมออฟฟิศ เพื่อที่โปรแกรมที่สร้างขึ้นจะสามารถคำนวณค่าเอเรอร์ฟังก์ชันและคอมพลิเมนต์ารีเอเรอร์ฟังก์ชันได้ถูกต้อง หลังจากเขียนคำสั่งฟังก์ชันเหล่านั้นแล้ว ต้องเปรียบเทียบกับค่าจริงจากตารางในตำราเสมอว่าโปรแกรมคำนวณถูกต้องหรือไม่

การปรับโปรแกรมเอ็กซ์เซลให้เป็นปัจจุบันกระทำได้ง่าย เพียงสั่งให้โปรแกรมเดิมเปิดขึ้นในโปรแกรมเอ็กซ์เซลรุ่นใหม่มากกว่า แล้วสั่งให้บันทึกเป็นรุ่นปัจจุบัน เท่านั้นโปรแกรมเอ็กซ์เซลรุ่นเก่าที่มีคำตอบ

โดเมนนิโกก็จักทันสมัย นี่คือข้อดีของโปรแกรมการจำลองการเคลื่อนที่มลพิษในน้ำบาดาลที่เหนือกว่าโปรแกรมเฉพาะทางที่ผู้สร้างต้องคอมไพล์ code แต่อย่างไรก็ตาม คำตอบบนไลดัลล์จำนวนมากยังคงมีพจน์อินดิเกรชันค้างอยู่ จึงไม่สามารถแปลงลงไปในเอ็กซ์เซลสเปรดชีทได้ ยังคงต้องใช้โปรแกรมเช่น MATLAB ในการช่วยคำนวณคำตอบที่แท้จริง ซึ่งทำได้ครั้งละเพียง 1 ค่า ทั้งที่คำตอบที่แท้จริงแตกต่างจากคำตอบประมาณเช่นคำตอบโดเมนนิโกเพียงเล็กน้อย จึงนับว่าคำตอบโดเมนนิโกมีประโยชน์ในข้อนี้เป็นอย่างมาก

6. บทสรุป

ในบรรดาสูตรคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองการเคลื่อนที่ของมลพิษในน้ำบาดาลออกจากแหล่งกำเนิดมลพิษชนิดจุดและป็นต่อเนื่องอย่างต่อเนื่อง คำตอบโดเมนนิโกเป็นที่นิยมแพร่หลายมากที่สุด เพราะใช้งานง่าย ไม่มีพจน์อินดิเกรชันค้างอยู่ และใส่ค่าตัวแปรที่วัดได้ในภาคสนาม ในขณะที่เอ็กซ์เซลสเปรดชีทเป็นโปรแกรมที่มาพร้อมกับชุดโปรแกรมไมโครซอฟท์ออฟฟิศ เมื่อประยุกต์ด้วยการนำคำตอบโดเมนนิโกที่อธิบายการแพร่กระจายของมลพิษในน้ำบาดาลไปจัดวางลงในสมการต่าง ๆ โดยให้ผลคูณของพจน์ต่าง ๆ กลายเป็นความเข้มข้นของตัวชี้วัดมลพิษในน้ำบาดาลเอ็กซ์เซลสเปรดชีทนั้นก็จะเป็นโปรแกรมที่ใช้งานง่าย ฟรี และให้ผลลัพธ์ของความยาวพุ่มที่ถูกต้องผลงานวิจัยที่ได้รับจึงมีประโยชน์ต่อการบริหารส่วนตำบลที่จัดการขยะมูลฝอยของตนเองเพราะจักได้นำไปใช้ฝึกหัดจำลองแบบพุ่มน้ำชะขยะที่อาจเกิดขึ้น มีประโยชน์ต่อนักวิชาการและนิสิตนักศึกษาในการทดลองทำแบบฝึกหัด หรือต่อยอดด้วยการแปลงคำตอบอื่น ๆ ในทำนองเดียวกัน เพราะโปรแกรมทำงานไม่ต้องซื้อโปรแกรมเฉพาะทางที่มีราคาแพงมาใช้

7. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยนเรศวร งบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. ๒๕๕๖ (สัญญาเลขที่ R2556B007)

8. เอกสารอ้างอิง

- Ala, N. K., and Domenico, P. A. (1992). Inverse analytical techniques applied to coincident contaminant distributions at Otis Air Force Base, Massachusetts. *Ground Water* 30: 212-218.
- Aziz, C. E., de Blanc, P. C., and Newell, C. J. (2009). Comment "On the use and error of approximation in the Domenico (1987) solution, by West, M.R., Keuper, B.H., and Unga, M.J. (2007). *Ground Water* 45 (2): 126-135." *Ground Water* 47 (1): 5-6.
- Batu, V. (2008). On the use and error of approximation in the Domenico (1987) solution and Domenico's solution-is it valid? *Ground water* 46 (5): 664-666.
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. New York: McGraw Hill.
- Codell, R. B., Key, K. T., and Whelan, G. (1982). A collection of mathematical models for dispersion in surface water and ground-water. Report NUREG-0868, US Nuclear Regulation Committee.
- Devlin, J. F., Brookfield, A., Huang, B., and Schillig, P. C. (2012). Using the Domenico solution to teach contaminant transport modeling. *J. Geosci. Ed.* 60 (2): 123-132.
- Domenico, P. A. (1987). An analytical model for multi-dimensional transport of a decaying contaminant species. *J. Hydrol.* 91 (1-2): 49-58.
- Domenico, P. A., and Robbins, G. A. (1985). A new method of contaminant plume analysis. *Ground Water* 23 (4): 476-485.
- Domenico, P. A., and Schwartz, F. W. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*, 2nd edition. New York: John Wiley and Sons.
- Fryar, A. E., and Domenico, P. A. (1989). Analytical inverse modeling of regional scale tritium waste migration. *J. Contam. Hydrol* 4: 113-125.
- Galya, D. P. (1987). A horizontal plane source model for groundwater transport. *Ground Water* 25 (6): 200-209.
- Gutierrez-Neri, M., Ham, P. A. S., Schotting, R. J., Lerner, D. N. (2009). Analytical modelling of fringe and core biodegradation in groundwater plumes. *J. Contam. Hydrol.* 107 (1-2): 1-9.
- Guyonnet, D., and Neville, C. (2004). Dimensionless analysis of two analytical solutions for 3-D solute transport in groundwater. *J. Contam. Hydrol.* 75 (1-2): 141-153.
- Hunkeler, D., Höhener, P., and Atteia, O. (2010). Comments on "Analytical modelling of fringe and core biodegradation in groundwater plumes." by Gutierrez-Neri et al. (2009) in *J. Contam. Hydrol.* 107 (1-2): 1-9. *J. Contam. Hydrol.* 117 (1-4): 1-6.

- Huyakorn, P., Unger, M. J., Mulkey, L. A., and Sudicky, E. A. (1987). A three-dimensional analytical method for predicting leachate migration. *Ground Water* 25 (5): 588-598.
- Park, E., and Zhan, H. (2001). Analytical solutions of contaminant transport from finite one-, two-, and three-dimensional sources in a finite-thickness aquifer. *J. Contam. Hydrol.* 53: 41-61.
- Prakash, A. (2009). On the use and error of approximation in the Domenico (1987) solution. *Ground Water* 47 (6), 758-759.
- Promma, K. (2010). Approximate solution to simulate dissolved contaminant transport in groundwater from prism source. *J. Hydrol.* 389: 381-389.
- Srinivasan, V., Clement, T. P., and Lee, K. K. (2007). Domenico solution—Is it valid? *Ground Water* 45 (2): 136-146.
- Tong, W. X., and Rong, Y. (2002). Estimation of methyl tert-butyl ether plume length using the Domenico analytical model. *Environ. Foren.* 3 (1): 81-87.
- Walker, D. D., and White, J. E. (2001). Analytical solutions for transport in porous media with Gaussian source terms. *Water Resour. Res.* 37 (3): 843-848.
- West, M. R., Kueper, B. H., and Unger, M. J. (2007). On the use and error of approximation in the Domenico (1987) solution. *Ground Water* 45 (2), 126-135.
- Wilson, J. L., and Miller, P. J. (1978). Two-dimensional plume in uniform groundwater flow. *J. Hydraul. Div. ASCE* 104 (HY4): 503-514.
- Zhang, Y. -K., and Heathcote, R.C. (2003). An improved method for estimation of biodegradation rate with field data. *Ground Water Monit. Remed.* 23 (3): 112-116.
- Zheng, C., and Bennett, G. D. (2002). *Applied Contaminant Transport Modeling: Theory and Practice*. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons.