บทที่ 3
ทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาการจำลองสภาพการแพร่ของน้ำเค็มในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล จำเป็นต้องนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทฤษฎีการไหลของน้ำใต้ดิน ทฤษฎีการรุกล้ำของน้ำเค็ม ทฤษฎีสมดุลของเกลือ และกลไกการแพร่ของมวลสาร มาใช้หาค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับการแพร่ของมวลสาร และนำทฤษฎีต่างๆ มาประยุกต์เข้ากับวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงตัวเลข แบบ finite difference ดังนี้

3.1 นิยามของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้

3.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ (Hydraulic conductivity, K)

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของตัวกลางพรุนหรือชั้นให้น้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวกลางพรุน เช่น ขนาดของเม็ดดิน และจำนวนช่องว่างระหว่างเม็ดดินของตัวกลางพรุน (ความพรุน) นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหลด้วย เช่น ความหนาแน่นและความหนืดสัมบูรณ์ของของของไหล สำหรับการศึกษาครั้งนี้หาค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ดังนี้

การประมาณค่าจากความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านกับค่าความหนาของชั้นน้ำ (ตามหัวข้อที่ 3.1.3) ดังสมการ

$$K = \frac{T}{b} \qquad (3\text{-}1)$$

โดยที่

T เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (transmissibility: T, L^2T^{-1})

b เป็น ความหนาของชั้นน้ำแบบปิด (L)

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน คือความสามารถของชั้นน้ำแบบปิด ในการยอมให้น้ำไหลผ่านตัวเองได้

การประมาณค่าจากการทดสอบ consolidation ของดินเหนียว ดังสมการ

$$K = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w /(10^5) \qquad (3\text{-}2)$$

โดยที่

K เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ของชั้นดินเหนียว (L/T)

c_v เป็นค่า coefficient of consolidation (L^2/T)

m_v เป็นค่า volume compressibility (L^2/ML)

γ_w เป็นน้ำหนักจำเพาะของน้ำ (M/L^3)

ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ในแนวดิ่ง หรือความรั่วซึม (leakance) เป็นค่าความนำทางชลศาสตร์ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นตัวชี้ถึงความสามารถของชั้นน้ำที่ยอมให้น้ำรั่วระหว่างชั้นน้ำได้ หาได้จากสมการ

$$\frac{1}{L} = \frac{d_1/2}{k_{fv,1}} + \frac{d_2/2}{k_{fv,2}} \qquad (3\text{-}3)$$

โดยที่

L เป็นค่าความรั่วซึมในแนวดิ่ง (1/T)

$k_{fv,1}$ และ $k_{fv,2}$ เป็นค่าความรั่วซึมในแนวดิ่งของชั้นน้ำที่อยู่ด้านบน และด้านล่างของชั้นน้ำ (L/T)

d_1 และ d_2 เป็นความหนาของชั้นน้ำที่อยู่ด้านบน และด้านล่างของชั้นน้ำ (L)

ซึ่งจะนำค่า L ในสมการ 3-3 ไปหาค่า K_{zz} ในสมการ 3-19 ซึ่งทำการแก้สมการในแบบจำลอง MODFLOW ต่อไป

เนื่องจากค่าความรั่วซึมในแนวดิ่งเฉลี่ยของชั้นน้ำที่มีทั้งชั้นทรายและชั้นดินเหนียว ได้จากสมการ

$$\log(k'_{av}) = [b_s \cdot \log(k'_s) + b_c \cdot \log(k'_c)]/b \qquad (3\text{-}4)$$

โดยที่

k'_{av} เป็นค่าความรั่วซึมในแนวดิ่งเฉลี่ยของชั้นน้ำ (L/T)

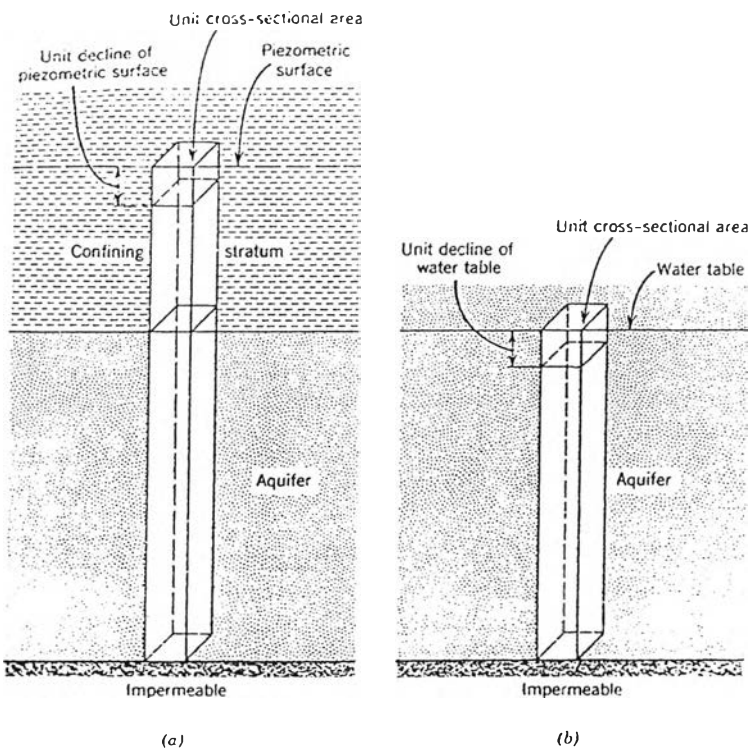
k'_s และ k'_c เป็นค่าความรั่วซึมในแนวดิ่งเฉลี่ยของชั้นทรายและชั้นดินเหนียว ตามลำดับ (L/T)

b_s และ b_c เป็นความหนาของชั้นทรายและชั้นดินเหนียว (L)

b เป็นความหนาของชั้นน้ำทั้งหมด (L)

3.1.2 สัมประสิทธิ์การกักเก็บ (Storage coefficient, S)

สัมประสิทธิ์การกักเก็บ หมายถึง ปริมาตรของน้ำที่ปล่อยออกมาจากชั้นน้ำ หรือรับเข้าไปสู่ชั้นน้ำต่อหน่วยพื้นที่ผิวของชั้นน้ำบาดาลต่อหน่วยการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำ (head) ตั้งฉากกับผิวชั้นน้ำบาดาลนั้น สำหรับชั้นให้น้ำแบบปิด ดังรูปที่ 3-1 (a) แท่งสี่เหลี่ยมที่มีพื้นที่ผิว 1 หน่วย หยั่งลงตลอดชั้นน้ำบาดาล ค่าสัมประสิทธิการกักเก็บ (S) จะเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ปล่อยจากชั้นน้ำ เมื่อระดับน้ำ (piezometric head) ลดลงหนึ่งหน่วยความยาว ในชั้นน้ำแบบปิดทั่วๆไป ค่าสัมประสิทธิ์การกักเก็บจะอยู่ระหว่าง 0.00005 – 0.005 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงความดันมากและในพื้นที่บริเวณกว้างจึงจะได้น้ำใต้ดินที่มีจำนวนมากพอที่จะสูบไปใช้ได้



ที่มา : Todd, 1980

รูปที่ 3-1 รูปแสดงคำจำกัดความของสัมประสิทธิ์การกักเก็บ ในกรณี (a) ชั้นน้ำแบบปิด และ (b) ชั้นน้ำแบบเปิด

สำหรับ specific storage (S_s) หมายถึง ปริมาตรของน้ำที่ได้จากชั้นให้น้ำหนึ่งหน่วยปริมาตร เมื่อระดับน้ำ (piezometric head) ลดลง 1 หน่วย

ทั้งนี้สัมประสิทธิ์การกักเก็บ (storage coefficient) มีความสัมพันธ์กับค่า specific storage ดังสมการ

$$S = S_S b \tag{3-5}$$

โดยที่

S_s เป็นค่า specific storage (L^{-1})

b เป็นความหนาของชั้นน้ำ (L)

สำหรับ specific storage ของชั้นดินเหนียวจะสามารถหาได้จากค่า volume compressibility จากการทดสอบ consolidation ดังสมการ

$$S_s = \frac{m_v \times \gamma_w}{10} \tag{3-6}$$

โดยที่

S_s เป็นค่า specific storage (1/L)

m_v เป็นค่า volume compressibility (L^2/ML)

γ_w เป็นน้ำหนักจำเพาะของน้ำ (M/L^3)

3.1.3 สมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและสัมประสิทธิ์การกักเก็บ

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านและสัมประสิทธิ์การกักเก็บได้มาจากข้อมูลการสูบทดสอบของระเบียนบ่อบาดาล และนำมาคำนวณหาค่าได้จากสมการต่างๆ ดังนี้

จากสมการการไหลของน้ำใต้ดินที่ไม่คงที่ (unsteady-state) โดยไม่คิดผลกระทบของ well loss ในชั้นน้ำมีแรงดัน ของ Cooper และ Jacob (1946) ดังสมการ

$$S_c = \frac{Q}{s} = \frac{4\pi T}{2.30 \log\left(2.25Tt / r^2 S\right)} \tag{3-7}$$

โดยที่

S_c เป็นค่าความสามารถในการให้น้ำ (specific capacity) (L^2/T)

Q เป็นอัตราการสูบน้ำ (L^3/T)

T เป็นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (L^2/T)

t เป็นระยะเวลาในการสูบ (T)

r เป็นรัศมีของบ่อบาดาล (L)

S เป็นสัมประสิทธิ์ความเก็บกัก (ไม่มีหน่วย)

s เป็นระดับน้ำลด (L)

ซึ่งความสามารถในการให้น้ำ (S_C)คือ อัตราการไหลของน้ำต่อระยะน้ำลดของบ่อบาดาล และเป็นผลผลิตของบ่อบาดาลที่ได้

จากสมการไหลแบบคงที่ (steady-state) สำหรับชั้นน้ำมีแรงดันจากสมการของ Thiem (1906) ดังนี้

$$T = \frac{Q \ln(r_2 / r_1)}{2\pi(s_1 - s_2)} \qquad (3\text{-}8)$$

โดยที่

s_1 และ s_2 เป็นระยะน้ำลดที่ระยะ r_2 และ r_1 ตามลำดับ (m)

r_1 และ r_2 เป็นระยะทางที่ห่างจากปากบ่อบาดาล (m)

ซึ่งระยะ r_2 สามารถหาได้จากสมการ radius of influence จากสมการ

$$r_2 = 2S_r\sqrt{T} \qquad (3\text{-}9)$$

โดยที่

S_r เป็นระยะน้ำลดของบ่อบาดาล (m)

แทนสมการที่ 3-9 ในสมการที่ 3-8 และเปลี่ยน ln เป็น log จะได้ว่า

$$S_c = \frac{Q}{s} = \frac{5.46T}{\log(4Ts^2 / r^2)} \qquad (3\text{-}10)$$

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านกับค่าความสามรถในการให้น้ำ (Specific capacity) ของ Logan (1964)

$$T = 1.22S_c \qquad (3\text{-}11)$$

3.1.4 ความพรุนใช้การ (Effective porosity, n_e)

ความพรุนใช้การ เป็นเปอร์เซ็นต์ที่เชื่อมต่อกันของช่องว่าง หรืออัตราส่วนระหว่างช่องว่างของตัวกลางรูพรุนต่อปริมาตรรวม ความพรุนใช้การเป็นตัวชี้ถึงความเชื่อมต่อกันของตัวกลางที่เป็นของแข็ง และมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับความสามารถในการซึมได้ (permeability) กว่าค่าความพรุนรวม ซึ่งเป็นความพรุนที่ยอมให้ของเหลวผ่านได้ของตัวกลางรูพรุน โดยปกติมีค่าน้อยกว่าค่าความพรุนรวมเสมอ

จากความสัมพันธ์ค่าความพรุนรวมกับความลึก สำหรับหินชั้น (shales) และหินทราย (sandstone) ดังรูปที่ 3-2 (a) แสดงเส้นความสัมพันธ์จากการศึกษาหินชั้นยุค Paleozoic ของ Athy (1930) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$n = n_0 e^{-az} \qquad (3\text{-}12)$$

โดยที่

n เป็นค่าความพรุนรวม

n_0 เป็นค่าความพรุนเฉลี่ยที่ใกล้กับผิวดินเหนียว

z เป็นความลึกต่ำจากผิวดิน (L)

a เป็นค่าคงที่

สำหรับค่าคงที่ของหินชั้นเท่ากับ 1.42 X 10^{-3} m^{-1} สำหรับความพรุนรวมของผิวชั้นดินเหนียวด้านบนอยู่ในช่วง 0.4 ถึง 0.5 สำหรับหินทรายมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ดังรูป B

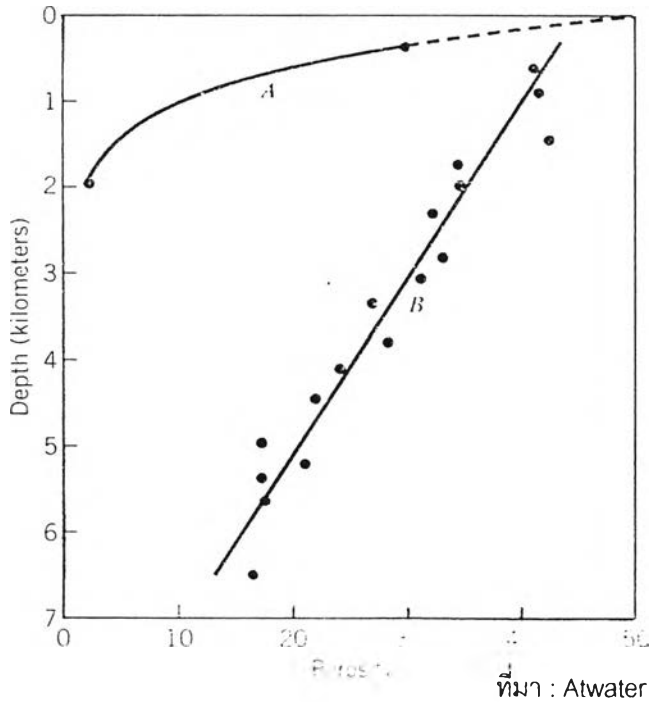
ในการศึกษาครั้งนี้ ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนรวมกับความลึกต่างๆ จากการทดสอบความพรุนของดินที่ระดับความลึกต่างๆ ของบ่อสังเกตการณ์จากการศึกษาของ JICA (1995) ซึ่งมีความสัมพันธ์กัน รูปที่ 3-3 คือ

$$n = 89.33H^{-0.2037} \qquad (3\text{-}13)$$

โดยที่

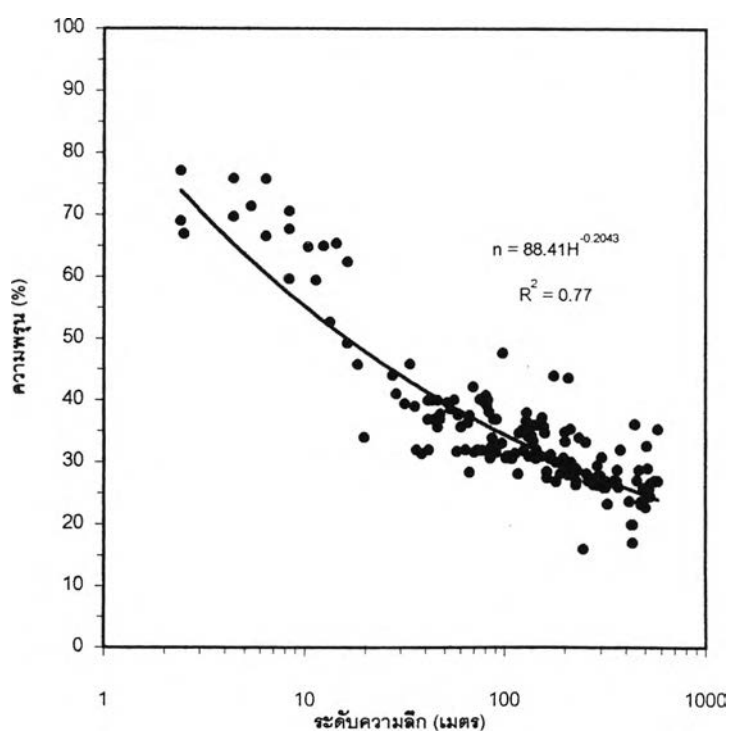
n = ค่าความพรุนที่ระดับความลึกใดๆ

H = ระดับความลึกของชั้นดิน (เมตร)



ที่มา : Atwater และ Miller , 1985

รูปที่ 3-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนกับระดับความลึก (A) หินชั้น (B) หินทราย

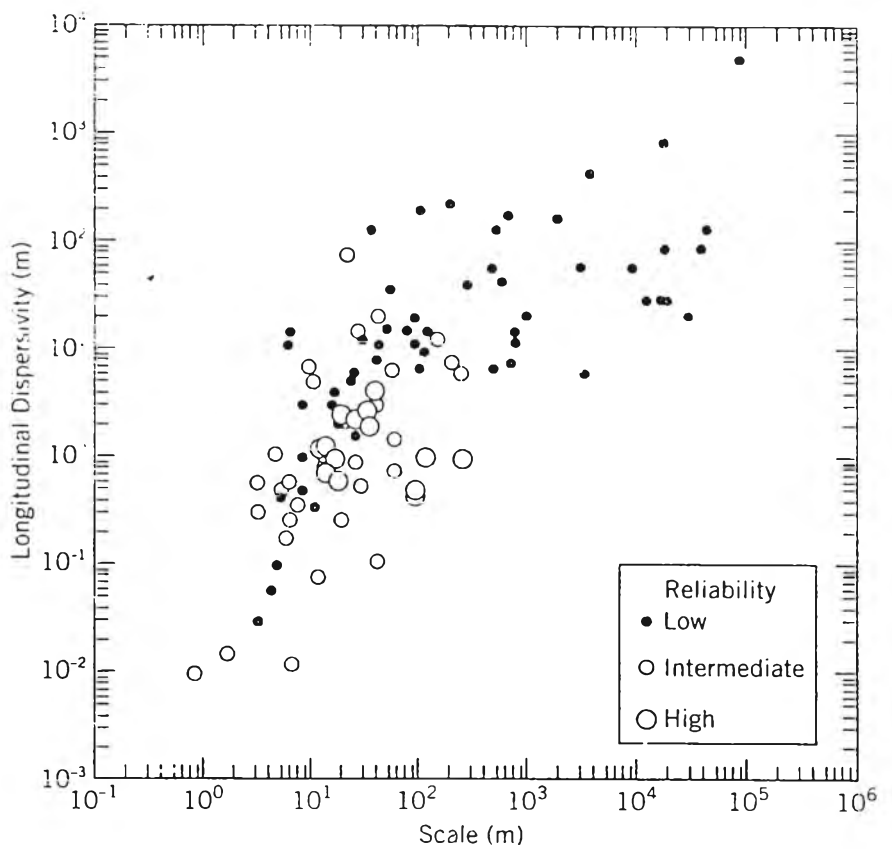


ที่มา : JICA, 1993

รูปที่ 3-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนรวมกับความลึกของพื้นที่ศึกษา

3.1.5 ความสามารถในการแพร่ (Dispersivity, α_L)

ความสามารถในการแพร่ เป็นความสามารถในการแพร่ของของเหลวในตัวกลางรูพรุนซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความนำทางชลศาสตร์ในชั้นน้ำ และเป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายต่อความเร็วตามช่องว่างเฉลี่ย และสัมพันธ์กับระยะทางในการเดินทางของมวลสาร (scale length) แบ่งออกเป็น 3 แนว ด้วยกันคือ longitudinal dispersivity, horizontal transverse dispersivity และ vertical transverse dispersivity จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการแพร่กับระยะทางในการเดินทางของสาร ในการทดลองภาคสนามของ Gelhar และการเก็บรวบรวมข้อมูลการศึกษาที่ผ่านมา แบ่งตามค่าความน่าเชื่อถือ (reliabililty) ดังรูปที่ 3-4 และตารางที่ จ-1 และจากผลการทดลองในสนามพบว่า ค่า horizontal transverse dispersivity จะมีขนาดน้อยกว่า longitudinal dispersivity 1 order (Gelhar ,1992)



ที่มา : Gelhar, 1992

รูปที่ 3-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการแพร่ กับระยะทางในการเดินทางของสาร

ในการศึกษาได้ใช้สมการของ Warren and Skiba (1964) ในการหาค่าความสามารถในการแพร่ในตัวกลางรูพรุนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogenous porous medium) ซึ่งสมมุติให้การแพร่ของของเหลวมาจากมีการเปลี่ยนแปลง ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมได้ (hydraulic conductivity) ของตัวกลางรูพรุน สัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร (macroscopic dispersion coefficient , D) สำหรับตัวกลางรูพรุนในชั้นต่างๆ ประมาณค่าจากสมการ

$$D = \frac{VL}{2}\left\{\frac{1}{4}\left[(8S^2+1)^{1/2}-1\right]\right\} \qquad (3\text{-}14)$$

โดยที่

S^2 เป็นความแปรปรวนของ residence-time distribution

V เป็นความเร็วของการไหลผ่านช่องว่างของรูพรุน (เมตร/วัน)

L เป็นระยะทางเดินทางเฉลี่ยของสารปนเปื้อน (เมตร)

$$S^2 = \left(\overline{K} - K_H\right)/K_H \qquad (3\text{-}15)$$

โดยที่

$\overline{K}$ เป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตของ hydraulic conductivity (L/T)

K_H เป็นค่าเฉลี่ยฮาโมนิคของ hydraulic conductivity (L/T)

$$K_H = \frac{N}{\sum\left(\frac{1}{K}\right)} \qquad (3\text{-}16)$$

K เป็น hydraulic conductivity (L/T)

N เป็นจำนวนกริดเซลล์ (ไม่มีหน่วย)

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับความเร็ว จะได้ค่าความสามารถในการแพร่ตามแนว longitudinal

$$\alpha_L = \frac{1}{8}\left[(8S^2+1)^{1/2}-1\right]\ L \qquad (3\text{-}17)$$

โดยที่

α_L เป็นค่าความสามารถในการแพร่ตามแนว longitudinal (L)

3.2 สมการการไหลของน้ำใต้ดิน (Groundwater Flow Equation)

จากการทดลองของดาร์ซี พบว่า ความเร็วของการไหลของน้ำผ่านตัวกลางรูพรุน จะแปรผันตามความแตกต่างของ head และจะแปรผกผันกับระยะที่น้ำเคลื่อนที่ เขียนเป็นสมการการไหลของน้ำใต้ดินผ่านตัวกลางรูพรุน หรือสมการของดาร์ซี ได้ดังนี้

$$V = -K\frac{\Delta h}{\Delta l} \qquad (3\text{-}18)$$

โดยที่

V เป็นความเร็วของการไหลของน้ำใต้ดิน (LT^{-1})

K เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่าน (hydraulic conductivity) (LT^{-1})

Δh เป็นความแตกต่างของระดับน้ำ หรือ piezometric head (L)

Δl เป็นระยะทางวัดตามทิศทางความเร็วเฉลี่ยของการไหล (L)

จากสมการของดาร์ซี จะได้ว่า การไหลของน้ำใต้ดินที่มีความหนาแน่นคงที่ ผ่านตัวกลางรูพรุนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous porous media) ภายใต้สภาวะการไหลแบบไม่คงตัว (unsteady flow) และเป็นการไหลที่ขึ้นกับทิศทาง (anisotropic) สามารถอธิบายด้วยสมการ partial-difference ได้

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-W=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (3\text{-}19)$$

โดยที่

K_{xx}, K_{yy} และ K_{zz} เป็นค่าของ hydraulic conductivity ตามแนวแกน x, y และ z ซึ่งถูกสมมุติให้ขนานกับแกนหลักของ hydraulic conductivity (LT^{-1})

h เป็นระดับน้ำ (potentiometric head) (LT^{-1})

W เป็น volumetric flux ต่อหน่วยปริมาตร และ เป็นตัวแทนของ sources และ/หรือ sinks ของน้ำ (T^{-1})

S_s เป็น specific storage ของวัสดุรูพรุน (L^{-1}) และ

t เป็น เวลา (T)

3.3 ทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของสาร (Mass Transport of Solute)

ในการศึกษาการแพร่ของน้ำเค็มในชั้นน้ำ ซึ่งเป็นการแพร่ของสารละลายในน้ำใต้ดินผ่านตัวกลางรูพรุน จำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีการเคลื่อนที่ของสารละลาย ได้แก่ การพัดพา (advection/convection) และการแพร่ของสารละลาย (hydrodynamic dispersion) มาอธิบายพฤติกรรมการแพร่ของน้ำเค็ม

3.3.1 การพัดพา (Advection/Convection)

การพัดพา เป็นกระบวนการที่การไหลของน้ำใต้ดินพัดพาเอาสารผ่านตัวกลางรูพรุน และทำให้เกิดการกระจายตัวของสารละลาย (dissolve) ซึ่งทิศทางและความเร็วของการไหลจะเป็นไปตามทิศทางการไหลของน้ำบาดาล เนื่องจากการไหลของน้ำขึ้นอยู่กับระดับน้ำบาดาลและลักษณะชั้นของหินอุ้มน้ำ จากสมการการไหลของดาร์ซี อธิบายการพัดพาได้ดังนี้

$$V_x = \frac{K}{n_e}\frac{dh}{dx} \qquad (3\text{-}20)$$

โดยที่

V_x เป็นความเร็วเฉลี่ยเชิงเส้น (average linear velocity) (LT^{-1})

K เป็นค่าสัมประสิทธิความซึมผ่านได้ (LT^{-1})

n_e เป็นความพรุนใช้การ

$\frac{dh}{dx}$ เป็นความลาดชันทางชลศาสตร์

3.3.2 การแพร่ของสารเชิงอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic Dispersion)

การแพร่ของสารเชิงอุทกพลศาสตร์ผ่านตัวกลางรูพรุนประกอบด้วย 2 ส่วนด้วยกันคือ

1. การแพร่กระจายเชิงกล (Mechanical dispersion)
2. การแพร่ของโมเลกุล (Molecular diffusion)

3.3.2.1 การแพร่กระจายเชิงกล (Mechanical dispersion)

การแพร่กระจายเชิงกล เป็นกระบวนการที่การไหลน้ำใต้ดินผสมกับสารมลพิษ (contaminant) ขณะที่ไหลผ่านตัวกลางรูพรุน การผสมนี้จะเกิดขึ้นตามแนวเส้นทางการไหลของน้ำ เรียกว่า การแพร่กระจายตามแนว longitudinal ซึ่งสัมพันธ์กันกับความสามารถในการแพร่และการพัดพา ดังสมการ

$$D = \alpha_L V_x \tag{3-21}$$

โดยที่

D เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายเชิงกล

α_L เป็นความสามารถในการแพร่กระจายตามแนว longitudinal (L)

V_x เป็นความเร็วเฉลี่ยเชิงเส้น (LT^{-1})

3.3.2.2 การแพร่ของโมเลกุล (Molecular diffusion)

การแพร่ของโมเลกุล เป็นขบวนการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของสารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่าไปสู่สารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า โดยขบวนการนี้ไม่ต้องอาศัยการพัดพาของสาร

จากสมการที่ 3-20 และสมการที่ 3-21 สามารถนำมาอธิบายการแพร่ของสารละลายในตัวกลางรูพรุนในรูปของสัมประสิทธิการแพร่ตามแนว longitudinal ดังนี้

$$D_L = \alpha_L V_x + D^* \tag{3-22}$$

โดยที่

D^* เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ของโมเลกุล

สมการการแพร่ของสารเชิงอุทกพลศาสตร์ (hydrodynamic dispersion equation) ในน้ำใต้ดิน สามมิติ ภายใต้ขอบเขตสภาพการไหลที่อิ่มตัวคงที่ แสดงได้ดังนี้ (Javandel,1984)

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(D_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) - \left(\frac{\partial}{\partial x}(V_x C) + \frac{\partial}{\partial y}(V_y C) + \frac{\partial}{\partial z}(V_z C)\right) + \frac{q_s}{n_e} C_s = \frac{\partial C}{\partial t} \tag{3-23}$$

โดยที่

C เป็นความเข้มข้นของสารปนเปื้อนที่ละลายในน้ำใต้ดิน (ML^{-3})

t เป็นเวลา (T)

x, y และ z เป็นระยะทางตามแนวแกนของพิกัดฉาก (L)

D_x , D_y และ D_z เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงอุทกพลศาสตร์ (hydrodynamic dispersion coeffient ตามแนวแกนของพิกัดฉาก (L^2T^{-1}) ซึ่ง D_x , D_y และ D_z เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ D_L ในสมการที่ 3-22

V_x , V_y และ V_z เป็นความเร็วของการไหลเฉลี่ยตามแนวแกนของพิกัดฉาก หรือ linear pore water velocity (LT^{-1})

q_s เป็นการไหลของปริมาตรของน้ำต่อหน่วยปริมาตรของชั้นน้ำ แทนด้วย sources (positive) และ sinks (negative) (T^{-1})

C_s เป็นความเข้มข้นของ sources หรือ sinks (ML^{-3})

n_e เป็นความพรุนใช้การของตัวกลางรูพรุน ไม่มีหน่วย

3.4 หลักการประมาณอัตราการสูบน้ำ

หลักการคิดอัตราการสูบน้ำ จะแยกพิจารณาเป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ (1) กลุ่มบ่อบาดาลของหน่วยงานราชการ (2) หน่วยงานรัฐวิสาหกิจ และ (3) หน่วยงานเอกชน จากการรวบรวมข้อมูลระเบียนบ่อบาดาลจากหน่วยงานราชการ/รัฐวิสาหกิจ และหน่วยงานเอกชน จำนวน 20,663 บ่อ หน่วยงานราชการได้แก่ กรมทรัพยากรธรณี กรมโยธาธิการ กรมอนามัย และสำนักงานเร่งรัดพัฒนาชนบท หน่วยงานรัฐวิสาหกิจ ได้แก่ การนิคมอุตสาหกรรม การประปานครหลวง และการประปาภูมิภาค สำหรับหน่วยงานเอกชนแบ่งตามประเภทผู้ใช้ 4 ประเภท ได้แก่ ครัวเรือน สถาบันธุรกิจ และอุตสาหกรรม ครอบคลุมพื้นที่ศึกษา 7 จังหวัด คือ กรุงเทพมหานคร ปทุมธานี นนทบุรี สมุทรปราการ สมุทรสาคร บางส่วนของพระนครศรีอยุธยา และนครปฐม

3.4.1 **การประมาณอัตราการสูบน้ำของหน่วยงานราชการ** ตามชั้นน้ำต่างๆ สามารถทำได้โดย

1. การแบ่งชั้นน้ำของบ่อบาดาลจะแบ่งตามความลึกของท่อกรอง (screen depth) หรือตามความลึกของบ่อบาดาล โดยที่แบ่งตามความลึกของชั้นน้ำเฉลี่ยดังนี้

- ชั้นน้ำกรุงเทพอยู่ในช่วงความลึกประมาณ 0-50 เมตร
- ชั้นน้ำพระประแดงอยู่ในช่วงความลึกประมาณ 60-100 เมตร
- ชั้นน้ำนครหลวงอยู่ในช่วงความลึกประมาณ 110-160 เมตร
- ชั้นน้ำนนทบุรีอยู่ในช่วงความลึกประมาณ 180-200 เมตร
- ชั้นน้ำสามโคกอยู่ในช่วงความลึกประมาณ 240-250 เมตร
- ชั้นน้ำพญาไทอยู่ในช่วงความลึกประมาณ 245-320 เมตร
- ชั้นน้ำธนบุรีอยู่ในช่วงความลึกประมาณ 350-435 เมตร
- ชั้นน้ำปากน้ำอยู่ในช่วงความลึกประมาณ 530 เมตรขึ้นไป

2. การหาอัตราการสูบน้ำของบ่อบาดาล เนื่องจากทะเบียนบ่อบาดาลของบางหน่วยงานไม่มีข้อมูลอัตราการสูบน้ำบาดาลจริงในแต่ละเดือน ประกอบด้วย กรมทรัพยากรธรณี กรมโยธาธิการ กรมอนามัย สำนักงานเร่งรัดพัฒนาชนบท ดังนั้นจึงประมาณอัตราการสูบน้ำของบ่อบาดาล จากปริมาณน้ำที่สูบได้ (yield) (ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง) คูณกับจำนวนชั่วโมงใช้งานเฉลี่ย (เวลาที่ใช้ในการสูบน้ำบาดาลในแต่ละวัน, ชั่วโมง) ในที่นี้ใช้จำนวนชั่วโมงใช้งานเฉลี่ย ตามที่ตาม JICA สำรวจมาและระบุไว้ในฐานข้อมูลระเบียนบ่อบาดาล โดยพิจารณาจำนวนชั่วโมงใช้งานเฉลี่ย ปีที่มีการขุดบ่อบาดาล และสถานะภาพของบ่อบาดาล (ที่การใช้งานและที่เลิกใช้ไปแล้ว) แบ่งจำนวนชั่วโมงที่สูบน้ำของแต่ละหน่วยงานต่างๆออกเป็น

- กรมทรัพยากรธรณี ใช้จำนวนชั่วโมงใช้งานเฉลี่ย 4.00 ชั่วโมง
- กรมโยธาธิการ ใช้จำนวนชั่วโมงใช้งานเฉลี่ย 10.00 ชั่วโมง
- กรมอนามัย ใช้จำนวนชั่วโมงใช้งานเฉลี่ย 3.50 ชั่วโมง
- สำนักงานเร่งรัดพัฒนาชนบท ใช้จำนวนชั่วโมงใช้งานเฉลี่ย 2.00 ชั่วโมง

3. สำหรับการประปานครหลวงและการนิคมอุตสาหกรรม ใช้ข้อมูลอัตราการสูบน้ำจริงเฉลี่ยในแต่ละเดือน (จากการเก็บรวบรวมข้อมูลบ่อบาดาลในปี 2536-2540)

4. สำหรับการประปาภูมิภาค ใช้ข้อมูลอัตราการสูบน้ำตามกำลังผลิต (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน) ของแต่ละสำนักงานประปาในแต่ละเขตใน ช่วงปี 2536-2540

5. เนื่องจากอัตราการใช้น้ำในแต่ละปี อาจมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและพื้นที่ การคำนวณหาอัตราการสูบน้ำจริงจึงได้กำหนดสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดขึ้นเพื่อปรับแก้ โดยใช้ข้อมูลสำรวจภาคสนาม ประกอบในการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์นี้

3.4.2 **การประมาณอัตราการสูบน้ำของหน่วยงานเอกชน** ตามชั้นน้ำต่างๆ สามารถทำได้โดย

1. ใช้ความลึกของของชั้นน้ำ ได้จัดแบ่งตามหัวข้อที่ 3.3.1
2. ประมาณอัตราการสูบน้ำบาดาลในแต่ละวันได้จากปริมาณน้ำที่ขออนุญาตสูบคูณกับสัมประสิทธิ์การสูบน้ำบาดาล (Groundwater pumpage coeffient ,GPC) คูณกับสัมประสิทธิ์ตัวคูณลด ซึ่งเป็นตัวปรับแก้การเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่ต่างจากปีสำรวจ ค่า GPC ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ค่า GPC เป็นอัตราการส่วนระหว่างอัตราการสูบน้ำจริงกับปริมาณน้ำที่อนุญาต โดยที่อัตราการสูบน้ำจริงได้มาจากการวัดมาตรวัดน้ำของบ่อบาดาลเอกชน จากการศึกษาของ JICA (1995) ดังตารางที่ 3-1 และพิจารณาว่าเจ้าของบ่อบาดาลมีการสูบน้ำต่อไปอีกหลังจากที่ใบอนุญาตหมดอายุไปแล้ว

3.4.3 **สรุปการประมาณอัตราการสูบน้ำ**

เนื่องจากสภาพการใช้น้ำอาจเปลี่ยนแปลงตามเวลา การศึกษาอัตราการสูบน้ำบาดาลได้กำหนดสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดในการประมาณการใช้น้ำ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ตัวคูณลดได้จากผลการสำรวจสอบถามในภาคสนาม (ดังภาคผนวก ก) อัตราการสูบน้ำของหน่วยงานราชการและหน่วยงานเอกชน ประมาณได้ดังนี้ คือ

หน่วยงานราชการ

อัตราการสูบน้ำ (ลบ.ม./วัน) = ปริมาณน้ำที่สูบได้ (ลบ.ม./ชม.) X จำนวนชั่วโมงใช้งานเฉลี่ยต่อวัน X สัมประสิทธิ์ตัวคูณลด

หน่วยงานรัฐวิสาหกิจ

อัตราการสูบน้ำ (ลบ.ม./วัน) = ตามสถิติที่มีการบันทึกไว้ตามจริง

หน่วยงานเอกชน

อัตราการสูบน้ำ (ลบ.ม./วัน) = ปริมาณน้ำที่ขออนุญาต (ลบ.ม./วัน) X GPC X สัมประสิทธิ์ตัวคูณลด

ตารางที่ 3-1 สัมประสิทธิ์อัตราการสูบน้ำเฉลี่ย

รหัส	ประเภท	ประเภทของผู้ใช้	สัมประสิทธิ์การสูบน้ำเฉลี่ย
11	อุปโภคบริโภค	ที่อยู่อาศัย , หอพักและคอนโดมิเนียม	0.621
21	สถาบัน	โรงเรียน , อาคารหน่วยงานราชการ โรงพยาบาล	0.443
31	ธุรกิจ	อาคารสำนักงาน , ห้างสรรพสินค้า โรงแรม	0.746
41	อุตสาหกรรม	โรงงานผลิตปัจจัยพื้นฐานสำหรับเครื่องดื่มและสุขภัณฑ์	0.741
42	อุตสาหกรรม	โรงงานผลิตเครื่องดื่ม	0.472
43	อุตสาหกรรม	กระบวนการผลิตอาหารและการทำไอศครีม	0.790
44	อุตสาหกรรม	อุตสาหกรรมสิ่งทอและไนลอน	0.648
45	อุตสาหกรรม	เครื่องนุ่งห่มและเสื้อผ้า	0.741
46	อุตสาหกรรม	โรงงานผลิตภัณฑ์เครื่องหนัง	0.755
47	อุตสาหกรรม	โรงงานผลิตภัณฑ์ไม้	0.780
48	อุตสาหกรรม	โรงงานกระดาษและผลิตภัณฑ์กระดาษ	0.495
49	อุตสาหกรรม	สิ่งพิมพ์	0.700
50	อุตสาหกรรม	อุตสาหกรรมเคมีและผลิตภัณฑ์เคมี	0.554
51	อุตสาหกรรม	อุตสาหกรรมยางและผลิตภัณฑ์ยาง	0.604
52	อุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์พลาสติก รองเท้า ฉนวน และพรม	0.466
53	อุตสาหกรรม	โรงงานผลิตภัณฑ์อโลหะและใยสังเคราะห์	0.552
54	อุตสาหกรรม	โรงงานผลิตภัณฑ์โลหะพื้นฐานและเหล็กเส้น	0.788
55	อุตสาหกรรม	โรงงานผลิตภัณฑ์โลหะ	0.416
56	อุตสาหกรรม	โรงงานเครื่องกล เครื่องใช้ไฟฟ้า และผลิตภัณฑ์คอมพิวเตอร์	0.673
57	อุตสาหกรรม	โรงงานประกอบและซ่อมรถยนต์	0.881
58	อุตสาหกรรม	โรงสีเมล็ดพันธุ์พืช	0.624
59	อุตสาหกรรม	ผลิตภัณฑ์จากการเกษตรและพืชไร่	0.840
60	อุตสาหกรรม	นิคมอุตสาหกรรม	0.666
61	อุตสาหกรรม	โรงงานยาสูบ	0.477
62	อุตสาหกรรม	โรงไฟฟ้า	1.094
63	อุตสาหกรรม	อื่นๆ	0.587

ที่มา : การศึกษาของ JICA (1995)

ตารางที่ 3-2 ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการสูบน้ำบาดาลเฉลี่ยในแต่ละไตรมาส

ประเภทผู้ใช้น้ำ	ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการสูบน้ำเฉลี่ย			
	ไตรมาสที่ 1 (ม.ค.-มี.ค.)	ไตรมาสที่ 2 (เม.ย.-มิ.ย.)	ไตรมาสที่ 3 (ก.ค.-ก.ย.)	ไตรมาสที่ 4 (ต.ค.-ธ.ค.)
บ่อบาดาลเอกชน				
อุปโภคบริโภค	1.053	0.965	1.049	0.933
สาธารณะ	1.088	0.972	0.964	0.976
การพาณิชย์	1.032	1.052	0.960	0.956
อุตสาหกรรม	0.989	1.027	0.993	0.991
บ่อบาดาลราชการ	0.999	1.024	0.993	0.984

ที่มา : จากการศึกษาของ JICA (1995)