

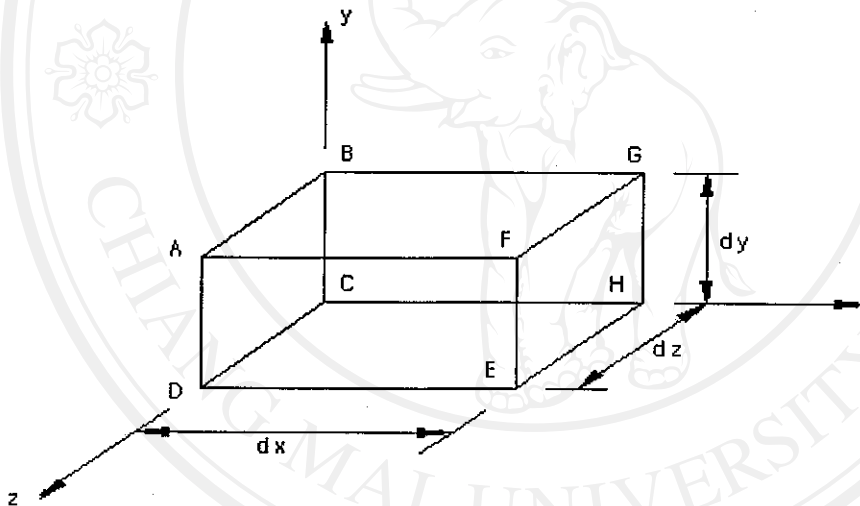
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิจัย

2.1 Saint-Venant Equation

โดยทั่วไป ความเร็วของการไหลจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการไหลในระนาบ x, y, z และ t แต่ถ้าพิจารณาการไหลแบบ Steady-flow ความเร็วของการไหลจะไม่ขึ้นอยู่กับเวลา (t) เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลในทางน้ำเปิดเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ดังนั้น ความเร็วของการไหลจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งและลักษณะของทางน้ำ

การไหลแบบ 3 ทิศทาง (three-dimensional flow) เป็นการไหลที่พิจารณาความเร็วของการไหลขึ้นอยู่กับความลึกของทางน้ำ, ความกว้างของทางน้ำ และทิศทางการไหล โดยแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 แสดงการไหลแบบ 3 ทิศทาง

จาก Control Volume ABCDEFGH ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และมีความกว้างในแต่ละระนาบเป็น dx, dy, dz มีความเร็วในแต่ละระนาบเป็น u, v, w โดยมีทิศทางการไหลในแนวแกน x ดังนั้น

$$\text{มวลที่ไหลออกจาก EFGH ในเวลาที่เรากำลังพิจารณา คือ } \left[\rho u + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) dx \right] dy dz$$

ดังนั้น

อัตราการไหลออกสุทธิต่อหนึ่งหน่วยเวลา ในทิศทาง x คือ $\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) dx dy dz$

อัตราการไหลออกสุทธิต่อหนึ่งหน่วยเวลา ในทิศทาง y คือ $\frac{\partial}{\partial y}(\rho v) dx dy dz$

อัตราการไหลออกสุทธิต่อหนึ่งหน่วยเวลา ในทิศทาง z คือ $\frac{\partial}{\partial z}(\rho w) dx dy dz$

ผลรวมของทั้ง 3 แนวแกน จะได้

$$\text{อัตราการไหลออกรวมสุทธิต่อหนึ่งหน่วยเวลา} = \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) \right] dx dy dz$$

ให้

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นต่อหนึ่งหน่วยเวลา} = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

เนื่องจาก

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลของปริมาตรควบคุม ต่อหนึ่งหน่วยเวลา} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz$$

และ

$$\text{อัตราการไหลออกรวมสุทธิต่อหนึ่งหน่วยเวลา} = \text{อัตราการเปลี่ยนแปลงมวล} \\ \text{ของปริมาตรควบคุมต่อหนึ่งหน่วยเวลา}$$

จะได้

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1)$$

แต่สำหรับการไหลในทางน้ำเปิดนั้น ความหนาแน่นจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลาจะได้สมการสำหรับการไหลใน 3 ทิศทาง ดังนี้

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

ดังนั้น สำหรับการไหลใน 2 ทิศทาง (two-dimensional flow) ของทางน้ำธรรมชาติที่ความกว้างของทางน้ำมาก(แรงเสียดทานเนื่องจากฝั่งของทางน้ำจะไม่มีผลต่อความเร็วของการไหล)

ความเร็วของการไหลในทุกๆ ระยะความลึกของหน้าตัดทางน้ำถือว่าคงที่ (ยกเว้นบริเวณใกล้ๆ กับขอบของทางน้ำจะมีผลเนื่องจากแรงเสียดทานเข้ามาเกี่ยวข้อง) ซึ่งจะได้สมการของการไหลดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

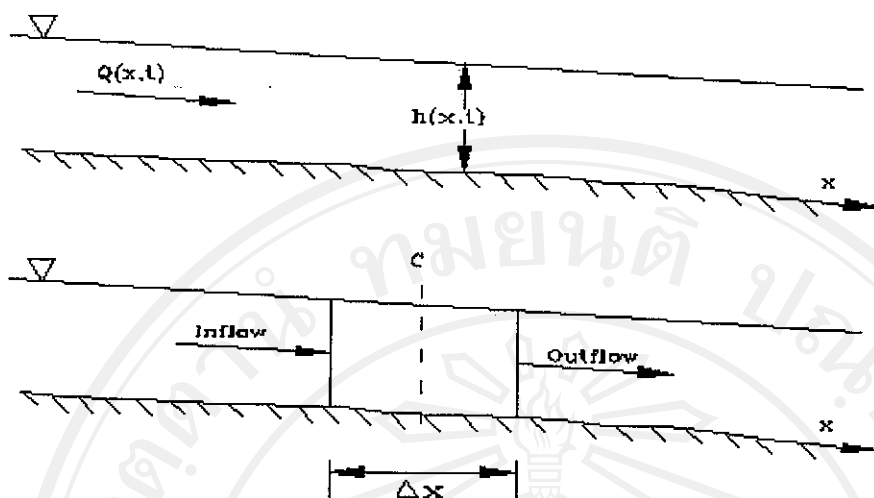
และในทำนองเดียวกัน สำหรับการไหลใน 1 ทิศทาง (one-dimensional flow) เป็นการไหลที่พิจารณาความเร็วของการไหลเฉลี่ยที่หน้าตัดของทางน้ำโดยไม่สนใจการเปลี่ยนแปลงความลึกที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของหน้าตัด เพื่อให้การวิเคราะห์ความเร็วของการไหลมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ความเร็วเฉลี่ยของแต่ละหน้าตัดตลอดทั้งลำน้ำ แสดงได้ดังสมการที่ (4)

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

กฎการไหลที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในทางน้ำเปิดคือ กฎทรงมวล (the principle of conservation of mass) และกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (the principle of conservation of momentum) ซึ่งได้อธิบายในทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบของสมการอนุพันธ์ที่รู้จักในนามสมการความต่อเนื่อง (continuity equations) และสมการ โมเมนตัม (momentum equations)

2.1.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

พิจารณาส่วนของปริมาตรควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2.2 ตามรูป x คือความยาวตามท้องน้ำ และที่จุดศูนย์กลางของปริมาตรควบคุมมี อัตราการไหล $Q_{(x,t)}$ และ พื้นที่การไหลรวม A , (พื้นที่ทางน้ำ+พื้นที่เก็บกักในทางน้ำ)



รูปที่ 2.2 แสดงปริมาตรควบคุมในทางน้ำใดๆ

จากกฎทรงมวล อัตราการไหลเข้าสู่หตุติ = อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเก็บกักใน ปริมาตรควบคุม

อัตราการไหลเข้าปริมาตรควบคุม คือ $Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2}$ (5)

อัตราการไหลออกจากปริมาตรควบคุม คือ $Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2}$ (6)

อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเก็บกัก คือ $\frac{\partial A_r}{\partial t} \Delta x$ (7)

สมมติว่า Δx มีค่าน้อยมาก ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงมวลในปริมาตรควบคุมแสดงดังนี้

$$\rho \frac{\partial A_r}{\partial t} \Delta x = \rho \left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) + Q_t \right] \quad (8)$$

$Q_t =$ อัตราการไหลเข้าด้านข้างของปริมาตรควบคุม (m^3/s)

ทำการจัดรูปแบบสมการและหารตลอดด้วย $\rho\Delta x$ จะได้รูปแบบของสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ดังนี้

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_e = 0 \quad (9)$$

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, (kg/m^3)

q_e = อัตราการไหลเข้าด้านข้างต่อหน่วยความยาว, (m^2/s)

2.1.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

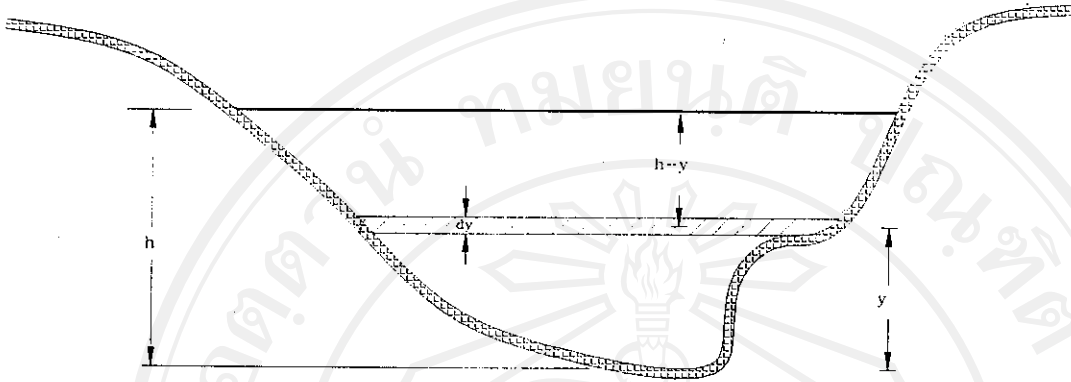
กฎการอนุรักษ์โมเมนตัมอธิบายได้โดยกฎข้อสองของนิวตัน (Newton's second Law)

ดังนี้

$$\sum F_x = \frac{dM}{dt} \quad (10)$$

จากกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมสำหรับปริมาตรควบคุมจะได้ว่า อัตราการไหลเข้าสู่สุทธิของโมเมนตัมต่อปริมาตรควบคุม (momentum flux) บวกกับผลรวมของแรงภายนอกที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมเท่ากับอัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัม เนื่องจากการไหลเข้าสู่สุทธิของโมเมนตัม (momentum flux) คือ มวลของของไหลที่มีทิศทางของความเร็วการไหลตามทิศทางการไหล โดยมีแรงภายนอกที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมอีกสามแรงที่นำมาพิจารณา คือ แรงดัน, แรงโน้มถ่วง และแรงเสียดทาน

(1.) แรงดัน (Pressure force)



รูปที่ 2.3 แสดงรูปตัดลำน้

จากรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงหน้าตัดทั่วไปของทางน้ำเปิดใดๆ การกระจายความดันได้ถูกสมมุติว่าเป็นแบบความดันสถิต (hydrostatic) และแรงดันรวม คือ แรงดันทั้งหมดที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดนั้นๆ ดังนั้น แรงดัน ณ จุดใดๆ ของหน้าตัดแสดงดังนี้

$$F_p = \int_0^h \rho g (h - y) T(y) dy \quad (11)$$

เมื่อ h = ความลึกการไหล, (m)

y = ระยะเหนือท้องน้ำ, (m)

$T(y)$ = ความกว้างของผิวน้ำที่สัมพันธ์กับระยะเหนือท้องน้ำ, (m)

ให้ F_p เป็นแรงดันในทิศทางการไหล (x-direction) ที่จุดศูนย์กลางของปริมาตรควบคุม ดังนั้น แรงดันทางด้านเหนือน้ำของปริมาตรควบคุม แสดงดังนี้

$$F_p = \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (12)$$

แรงดันทางด้านท้ายน้ำของปริมาตรควบคุม แสดงดังนี้

$$F_p + \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (13)$$

ดังนั้น ผลรวมของแรงดันของปริมาตรควบคุม แสดงดังนี้

$$F_{pn} = \left| F_p - \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right| - \left| F_p + \frac{\partial F_p}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right| + F_B \quad (14)$$

เมื่อ

F_{pn} = แรงดันสุทธิของปริมาตรควบคุม

F_B = แรงที่ฝั่งของทางน้ำกระทำต่อของไหลในทิศทางการไหล

สมการที่ (14) จัดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$F_{pn} = -\frac{\partial F_p}{\partial x} \Delta x + F_B \quad (15)$$

ทำการ differential สมการที่ (11) โดยการใช้กฎของ Leibniz แล้วแทนค่าลงในสมการ (15) ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$F_{pn} = -\rho g \Delta x \left[\frac{\partial h}{\partial x} \int_0^h T(y) dy + \int_0^h (n-y) \frac{\partial T(y)}{\partial x} dy \right] + F_B \quad (16)$$

ค่า integral ค่าแรกของสมการที่ (16) คือ พื้นที่หน้าตัด (cross section area, A)

ค่า integral ค่าที่สอง (เมื่อคูณ โดย $-\rho g \Delta x$) คือ แรงดันที่ของไหลกระทำกับฝั่งของทางน้ำ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ F_B แต่มีทิศตรงกันข้าม ดังนั้น แรงดันสุทธิสามารถเขียนได้เป็น

$$F_{pn} = -\rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \quad (17)$$

(2.) แรงโน้มถ่วง (Gravitational force)

แรงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงกระทำต่อของไหลในปริมาตรควบคุมตามทิศทางการไหล คือ

$$F_g = \rho g A \sin \theta \Delta x \quad (18)$$

เมื่อ θ = มุมที่ท้องน้ำกระทำต่อแนวราบ สำหรับทางน้ำธรรมชาติ

$$\sin \theta \approx \tan \theta = -\frac{\partial z_o}{\partial x}$$

z_o = ค่าระดับท้องน้ำ, (m)

ดังนั้น แรงโน้มถ่วง แสดงได้ดังนี้

$$F_g = -\rho g A \frac{\partial z_o}{\partial x} \Delta x \quad (19)$$

(3.) แรงเสียดทาน (Friction force)

แรงเสียดทานที่ท้องน้ำกระทำกับของไหล แสดงดังนี้

$$F_f = -\tau_o P \Delta x \quad (20)$$

เมื่อ τ_o = ค่าแรงเฉือนเฉลี่ยที่กระทำต่อของไหล, (N/m^2)

P = ความยาวของเส้นขอบเปียก, (m)

เครื่องหมาย \ominus แสดงว่าแรงกระทำในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการไหล จากการวิเคราะห์ทางมิติ ค่า τ_o สามารถแสดงได้ในรูปของสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (drag coefficient, C_D) ดังนี้

$$\tau_o = \rho C_D V^2 \quad (21)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของ Chezy, C ดังนี้

$$C_D = \frac{g}{C^2} \quad (22)$$

สมการของ Chezy แสดงได้ดังนี้

$$V = C\sqrt{RS_f} \quad (23)$$

แทนค่าสมการ (21), (22) และ (23) ในสมการที่ (20) และทำให้อยู่ในรูปอย่างง่ายของสมการของแรงเสียดทาน ได้ดังนี้

$$F_f = -\rho g A S_f \Delta x \quad (24)$$

เมื่อ S_f คือ ความลาดชันของท้องน้ำ ซึ่งมีค่าเป็นบวกตามทิศทางการไหล โดยทั่วไปจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลตามสมการของ Manning ดังนี้

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{2.208 R^{4/3} A^2} \quad (25)$$

เมื่อ R = รัศมีชลศาสตร์, (m)

n = ค่าสัมประสิทธิ์ของ Manning

(4.) การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมสุทธิ (Momentum flux)

การไหลเข้าของโมเมนตัมต่อปริมาตรควบคุม แสดงได้ดังนี้

$$\rho \left[QV - \frac{\partial QV}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \quad (26)$$

การไหลออกของโมเมนตัมจากปริมาตรควบคุม แสดงได้ดังนี้

$$\rho \left[QV + \frac{\partial QV}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \quad (27)$$

ดังนั้น อัตราการไหลเปลี่ยนแปลงสุทธิของโมเมนตัม ต่อปริมาตรควบคุม คือ

$$-\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \Delta x \quad (28)$$

เนื่องจากโมเมนตัมของของไหลในปริมาตรควบคุม คือ $\rho Q \Delta x$ ดังนั้น อัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Q \Delta x) = \rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (29)$$

จากกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม อัตราการเปลี่ยนแปลงสุทธิของโมเมนตัม (momentum flux) ต่อปริมาตรควบคุม บวกกับ ผลรวมของแสดงภายนอกที่กระทำต่อปริมาตรควบคุม เท่ากับ อัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัม

$$\rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} = -\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial z_o}{\partial x} \Delta x - \rho g A S_f \Delta x \quad (30)$$

เนื่องจาก ค่าระดับของผิวน้ำ, z เท่ากับ $z_o + h$ ดังนั้น

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_o}{\partial x} \quad (31)$$

เมื่อ $\frac{\partial z}{\partial x}$ คือ ความลาดชันของผิวน้ำ แทนค่าสมการ (31) ในสมการที่ (30) แล้วหารตลอดด้วย $\rho \Delta x$ แล้วย้ายทุกพจน์ของสมการมาอยู่ทางด้านซ้ายจะได้สมการโมเมนตัม (momentum equation) ดังนี้

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (32)$$

2.2 Flood Routing

Infowork's RS เป็นโปรแกรมที่ได้มีการพัฒนาโดย Wallingford Software Ltd. สามารถแก้ปัญหาการเคลื่อนที่ทางน้ำเปิดได้ทุกกรณี และมีการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่าง Arcview GIS เพื่อนำผลการคำนวณที่ได้ไปทำเป็นแผนที่แสดงบริเวณที่น้ำท่วมถึง ตัวโปรแกรมจะมี Module หลักเรียกว่า ISIS Flow ซึ่งใช้ในการคำนวณภาคอุทกพลศาสตร์ของโปรแกรม และใช้สมการ St-Venant เป็นสมการพื้นฐาน โดยใช้สมการความต่อเนื่อง "Continuity equation" อธิบายถึงความสมดุลระหว่าง อัตราการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำ กับ wedge storage และ prism storage และใช้สมการโมเมนตัม "momentum equation" อธิบายความสมดุลระหว่างแรงที่กระทำต่อของไหล ได้แก่ แรงดัน แรงโน้มถ่วง แรงเสียดทาน และการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัม

ISIS Flow ทำการแก้ปัญหาการเคลื่อนที่ของน้ำหลากโดยอธิบายถึงวิธีการหาค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของ flow hydrograph ที่เคลื่อนที่ไปตามท้องน้ำ รวมถึงคำนวณค่าระดับน้ำที่เวลาต่างๆ ณ ตำแหน่งใดๆ ในทางน้ำ โดยใช้วิธีการของ Muskingum และ Muskingum-Cunge ในการคำนวณ และใช้ Implicit Finite Difference ตามเทคนิคของ Preissman 4-point box ในการทำให้สมการของ St-Venant เป็นสมการเส้นตรง เพื่อให้ง่ายต่อการแก้ปัญหา

2.2.1. Muskingum Method

หลักการพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของน้ำหลาก (flood routing) สามารถแสดงโดยการพิจารณาช่วงระหว่างจุดสองจุดทางด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำเป็นหนึ่งหน่วยเก็บกัก เมื่อทราบค่า Inflow hydrograph ที่ไหลเข้าหน่วยเก็บกัก (storage unit) ก็จะสามารถหาค่าอัตราการไหลออก (outflow) ได้

หลักการความต่อเนื่องของของไหล (continuity) ถูกใช้เป็นสมการพื้นฐานในการแก้ปัญหา แสดงได้ดังนี้

(ปริมาณการไหลเข้าในช่วงเวลาหนึ่งๆ) – (ปริมาณการไหลออกในช่วงเวลานั้น) = (การเปลี่ยนแปลงปริมาตรเก็บกัก)

All rights reserved

ใน differential form แสดงได้ดังนี้

$$I - O = \frac{ds}{dt} \quad (33)$$

$\frac{ds}{dt}$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณเก็บกักในช่วงลำน้ำเก็บกัก (reach storage)

ณ เวลาหนึ่ง

I = ปริมาณการไหลเข้าในช่วงลำน้ำ

O = ปริมาณการไหลออกจากช่วงลำน้ำ

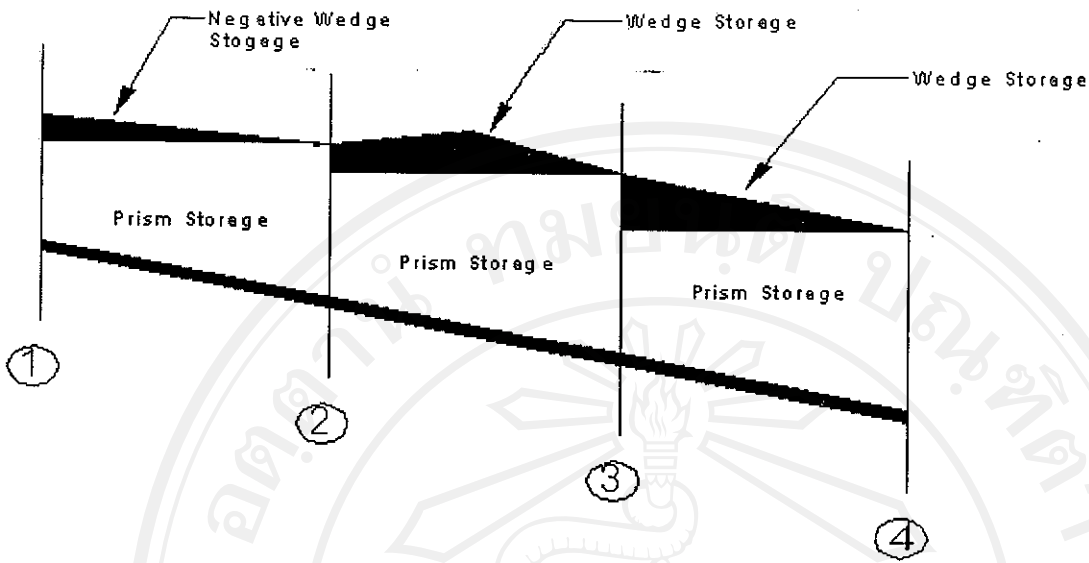
เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจะปรับสมการที่ (33) ในรูปความสัมพันธ์ของการไหลเฉลี่ยได้ดังนี้

$$\frac{(I_1 + I_2)}{2} \Delta t - \frac{(O_1 + O_2)}{2} \Delta t = S_2 - S_1 \quad (34)$$

โดยตัวห้อยจะอ้างถึงปริมาณน้ำ ณ เวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของช่วงเวลา Δt และสมมุติว่า hydrograph เป็นเส้นตรงในช่วงเวลา Δt (time step)

การเคลื่อนที่ของน้ำหลากในทางน้ำธรรมชาติ มีความแตกต่างและยุ่งยากซับซ้อนกว่ากรณี การเคลื่อนที่ของน้ำหลากผ่านอ่างเก็บน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากในกรณีนี้ปริมาณ (Storage) ไม่ได้ขึ้นกับอัตราการไหลออกจากช่วงของลำน้ำเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ขึ้นอยู่กับทั้งอัตราการไหลเข้าและไหลออกประกอบกัน ดังต่อไปนี้

ถ้าพิจารณาจากรูปตัดของผิวน้ำในลำน้ำขณะ Flood Wave เคลื่อนที่ผ่านดังรูปที่ 4 ปริมาณ Storage ในลำน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ (1) Prism Storage ซึ่งอยู่ใต้เส้นที่ขนานกับท้องของลำน้ำ และ (2) Wedge Storage ซึ่งอยู่เหนือเส้นขนานน้ำขึ้น ไปจนถึงผิวน้ำ ขณะที่ Flood Wave เคลื่อนที่เข้ามาจะทำให้ระดับน้ำเพิ่มขึ้นและก่อให้เกิด Wedge Storage เพิ่มขึ้นรวดเร็วกว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลออกจากตำแหน่งนั้น ในทำนองตรงกันข้าม เมื่อ คลื่นน้ำหลาก (Flood Wave) เคลื่อนที่ออกไปจะทำให้ระดับน้ำลดลง ปรากฏว่าอัตราการไหลเข้าของน้ำลดลงรวดเร็วกว่าอัตราการไหลออกมาก ยังผลให้ Wedge Storage กลายเป็นลบ (Negative Wedge Storage) ดังนั้น Flood Routing ในลำน้ำโดยทั่วไปจึงจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ระหว่าง Wedge Storage นี้กับตัวแปรอื่น ซึ่งก็คือ อัตราการไหลเข้าของน้ำ, I



รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่ของ flood wave

จากรูปที่ 2.4 พบว่า อัตราการไหลออกและปริมาตร Storage มีความสัมพันธ์เริ่มต้นดังนี้

$$\alpha \cdot S^n - \sum_{m=1}^{\alpha} \left(x^m \frac{d^m S}{dt^m} \right) = 0 \quad (35)$$

เมื่อ α, x และ n เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าที่จุดออก
จัดรูปแบบสมการที่ (35) ให้อยู่ในรูปอย่างง่าย จะได้

$$\alpha \cdot S^n - x \frac{dS}{dt} = 0 \quad (36)$$

จากสมการนี้ $\frac{dS}{dt}$ สามารถหาได้โดยการแทนค่าด้วยสมการความต่อเนื่องจะได้สมการของ ปริมาตรเก็บกักดังนี้

$$S = \left(\frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{n}} [xI + O(1-x)]^{\frac{1}{n}} \quad (37)$$

แทนค่า $\left(\frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{n}}$ ด้วย k และให้ค่า n เป็นหนึ่งหน่วยเราจะได้ Storage Equation สำหรับ Muskingum Method ดังนี้

$$S = k[xI + (1-x)O] \quad (38)$$

เมื่อ $k =$ storage constant

$x =$ ค่าสัดส่วนของ I (มีค่าระหว่าง 0-0.50) ที่มีผลต่อปริมาตร storage รวม

ถ้าเขียนสมการที่ (38) ในรูปแบบใหม่ได้

$$S_2 - S_1 = k[x(I_2 - I_1) + (1-x)(O_2 - O_1)] \quad (39)$$

และแทนค่าในสมการที่ (34) จะได้สมการของอัตราการไหลออก ที่จุดสิ้นสุดของช่วงเวลาจากการเกิดน้ำหลาก (time step) เมื่อทราบค่าตัวแปรทุกตัวด้านขวามือของสมการ

$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1 \quad (40)$$

เมื่อ

$$C_0 = \frac{kx - 0.5\Delta t}{k(1-x) + 0.5\Delta t} \quad (41)$$

$$C_1 = \frac{kx + 0.5\Delta t}{k(1-x) + 0.5\Delta t} \quad (42)$$

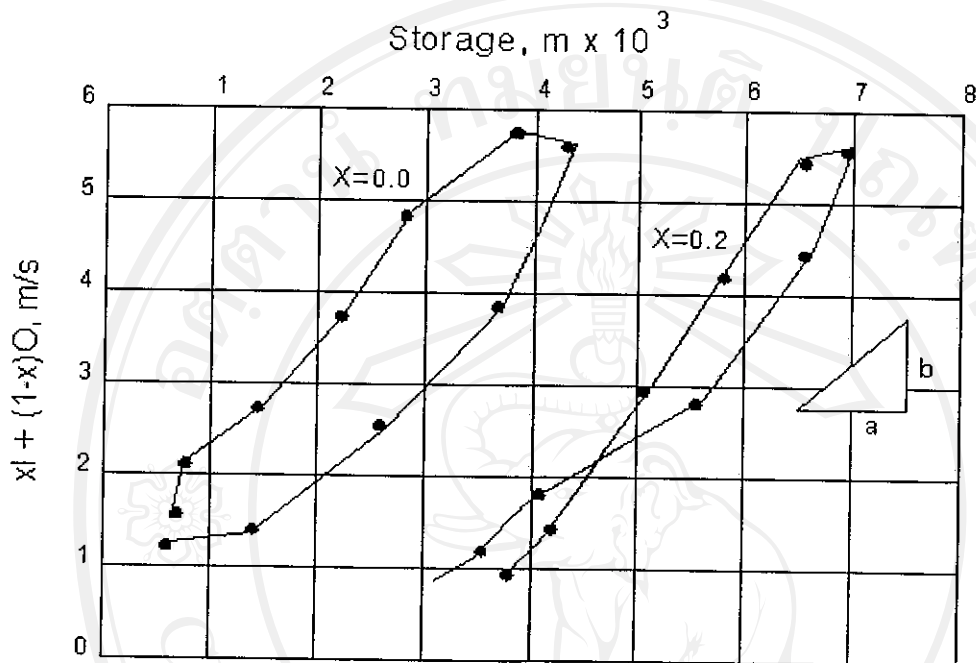
$$C_2 = \frac{k(1-x) - 0.5\Delta t}{k(1-x) + 0.5\Delta t} \quad (43)$$

และ

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \quad (44)$$

ถ้าในในแต่ละช่วงจะมีค่าของ x และ k คงที่เสมอ トラบเท่าที่สมบัติทางกายภาพของลำน้ำไม่เปลี่ยนแปลง ในการหาค่าคงที่ทั้งสอง จำเป็นต้องมีข้อมูลเกี่ยวกับ Inflow Hydrograph ที่ตำแหน่ง 1 (จุดเริ่มต้นของช่วงของลำน้ำที่ต้องการ) และ Outflow Hydrograph ที่ตำแหน่ง 4 (จุดสิ้นสุดของช่วงลำน้ำ) จากนั้นคำนวณหาปริมาตรรวม, S โดยสมการที่ (39) ที่ระยะเวลา t ต่างๆ กัน แล้วนำมา Plot กราฟกับค่าของ $x \cdot I + (1-x)O$ โดยสมมุติค่า x ต่างๆ กัน ค่าของ x ที่ให้

เส้นกราฟช่วงที่ระดับน้ำเพิ่มขึ้น (Rising Stage) และลดลง (Falling Stage) มีค่าใกล้เคียงกัน จนเส้นกราฟใกล้เคียงกันมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.5 คือค่าที่ถูกต้องของลำน้ำช่วงนั้นและค่า k หาได้จาก a/b (Slope ของกราฟ)



รูปที่ 2.5 แสดงการปรับค่า k ของสมการ Muskingum

2.2.2. Muskingum-Cunge Method

จากหลักการวิเคราะห์ flood routing โดยวิธีการของ Muskingum, ISIS ได้ใช้วิธีการ Muskingum-Cunge ในการแก้ปัญหาคาร์เคลื่อนที่ของน้ำหลากเพราะวิธีนี้ได้รวมการไหลเข้าทางด้านข้างมาพิจารณาด้วย ซึ่ง Muskingum-Cunge ได้สร้างตัวแปรขึ้นมาสองตัว เพื่อให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นในการแก้ปัญหาน้ำหลาก เรียกว่า Variable Parameter Muskingum-Cunge (VPMC) Method คือตัวแปร wavespeed, c และ attenuation, μ ซึ่งการใช้สมการมี 2 วิธี คือ

(1) MUSK-VPMC

ใช้ตารางความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร wavespeed, c และ attenuation, μ กับ อัตราการไหล, Q ซึ่งหาได้จากคู่มือใน UK Flood Studies Report Volume III

(2.) MUSK-XSEC

โดย ISIS จะหาค่า wavespeed, c และ attenuation, μ จากหน้าตัดที่ผู้ใช้
ป้อนเข้าไป

ซึ่งในแต่ละช่วงของลำน้ำจะมีค่า wavespeed, c และ attenuation, μ คงที่
เหมือนกับค่า k และ x ของวิธีการ Muskingum

สมการที่ใช้ใน MUSK-VPMC นี้คือรูปแบบสมการ Convective diffusion
equation โดยพิสูจน์มาจากสมการ St-Venant equation ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho \frac{dQ}{c} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu}{c^2} \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + q = 0 \quad (45)$$

เมื่อ	Q	= อัตราการไหล, (m^3/s)
	c	= $c(Q)$ wavespeed, (m/s)
	μ	= Attenuation, (m^2/s)
	x	= ระยะช่วงลำน้ำ, (m)
	t	= เวลา, (s)
	q	= ปริมาณการไหลเข้าด้านข้างต่อหน่วยความยาว, (m^2/s)

โดยค่าของตัวแปรต่างๆ ของสมการ Muskingum-Cunge หาได้ดังต่อไปนี้

- Wavespeed, c

$$c = \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial h} \quad (46)$$

- Attenuation, μ

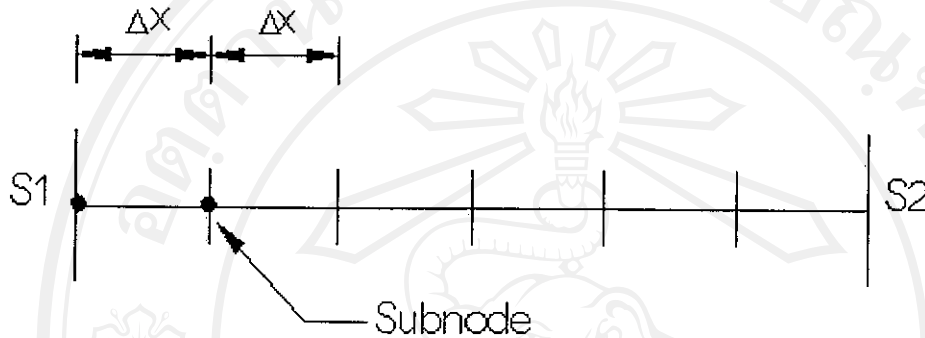
$$\alpha = \frac{1}{2BS_0}$$

$$\mu = \alpha Q \quad (47)$$

- Space increment, Δx

ค่า space increment, Δx คือค่าระยะห่างระหว่าง หน้าตัดรอง(subnode)ที่ใช้ในการคำนวณอัตราการไหล ณ ตำแหน่งใดๆ จาก time step, Δt ที่เรากำหนด

$$\Delta x = c \Delta t \quad (48)$$



รูปที่ 2.6 แสดงหน้าตัดหลักและหน้าตัดรอง (Subnode)

- ช่วงเวลา, Δt

โดยทั่วไป time step, Δt จะถูกกำหนดโดยผู้ใช้ โดยให้มีค่าน้อยๆ หรือหาจาก

$$\Delta t \geq \frac{2\Delta x}{c} \left[\frac{1}{2} - \frac{Q}{2BS_0 c \Delta x} \right]$$

- การคำนวณความเร็วของน้ำที่หน้าตัดรองใดๆ

เมื่อ ISIS คำนวณค่า Q ที่หน้าตัดรองใดๆ ซึ่งมีระยะห่างเท่ากับ Δx แล้ว ISIS จะทำการหาค่าความเร็วจากค่า Q นั้นๆ เพื่อใช้ในการคำนวณพื้นที่การไหล (flow area) เพื่อเก็บเป็นข้อมูลของค่าพื้นที่การไหล ที่ Δt ใดๆ โดยใช้สูตรในการประมาณความเร็วดังต่อไปนี้

a) Power Law Function

$$V = V_o + a(Q - Q_o)^b \quad Q \geq Q_o \quad (49)$$

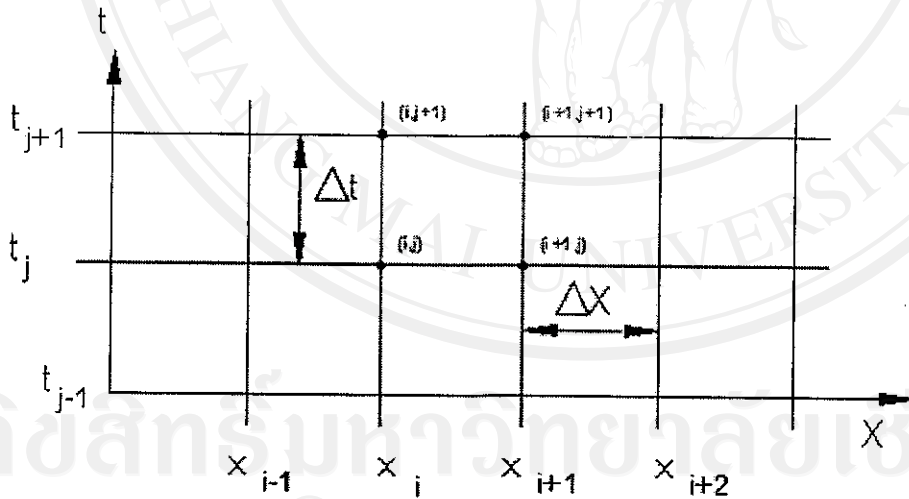
$$V = V_o \quad Q \leq Q_o \quad (50)$$

b) ในกรณีของ MUSK-XSEC จะใช้สมการของ Manning คำนวณหาความเร็วจากข้อมูลหน้าตัดที่มีอยู่

2.3 หลักการของ Implicit finite difference

ISIS ใช้วิธีการ Implicit finite difference ของ Preissmann (1960) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในนาม 4-point Box scheme ดังต่อไปนี้

ให้ f เป็นค่าของ ความลึกหรืออัตราการไหล หรือความสัมพันธ์ของความลึกหรือความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่จุด $(i + 1/2, j + 1/2)$ แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงวิธีการ 4-point box scheme

ค่าของ f หรือความต่อเนื่องของอนุพันธ์สัมพันธ์กับเวลาหรือระยะทางสามารถแสดงได้ดังนี้

$$f(x, t) = \frac{1}{2} [\theta(f_{i+1}^{j+1} + f_i^{j+1}) + (1-\theta)(f_{i+1}^j + f_i^j)] \quad (51)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta x} [\theta(f_{i+1}^{j+1} - f_i^{j+1}) + (1-\theta)(f_{i+1}^j - f_i^j)] \quad (52)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{2\Delta t} [(f_{i+1}^{j+1} - f_{i+1}^j) + (f_i^{j+1} - f_i^j)] \quad (53)$$

เมื่อ θ คือ weighting factor มีค่าระหว่าง 0.5 - 1

f_i^j คือ ค่าของ f ที่หาค่าได้จากที่ตำแหน่ง (x_i, t_i)

จากหลักการที่กล่าวมา สมการของ Saint-Venant ทั้งสองสามารถทำให้เป็นเส้นตรงได้โดยมีรูปแบบดังต่อไปนี้

$$aQ_i^{j+1} + bH_i^{j+1} + cQ_{i+1}^{j+1} + dH_{i+1}^{j+1} = e \quad (54)$$

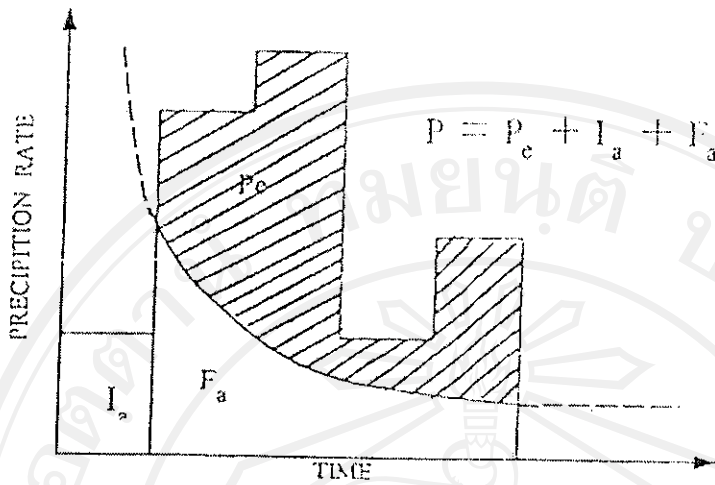
ค่าของ a, b, c, d และ e จะหาได้จากแต่ละรอบของการทำซ้ำของแต่ละหน้าตัดในทางน้ำเปิด และขึ้นกับผลการคำนวณที่เปลี่ยนแปลงไปที่รอบการทำซ้ำหรือช่วงเวลา (time step) ก่อนหน้านั้น

2.4 หลักการของ US SCS Method

การศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีของ US SCS ซึ่ง Soil Conservation Service (1972) ได้พัฒนาการคำนวณหาปริมาณน้ำท่าหรือการไหลออกจากพื้นที่โดยใช้ข้อมูลฝนและข้อมูลลักษณะดิน (Soil Type) และการใช้ดิน (Land Use) รวมถึงการปกคลุมของพืชด้วย

ฝนที่ตกลงมา (P) แบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วย การสูญเสียจากการดักเริ่มแรก (Initial Abstraction, I_a) ปริมาณการซึมลงดินต่อเนื่องหรือปริมาณการดักต่อเนื่อง (Continuity Infiltration or Abstraction, F_a) และฝนส่วนเกินหรือปริมาณน้ำท่าโดยตรง (Direct Runoff, P_c) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$P = P_c + I_a + F_a \quad (55)$$



รูปที่ 2.8 ตัวแปรในวิธี SCS ของการสูญเสียของน้ำฝน
ที่มา : Chow, 1988.

ปริมาณการซึมลงดินต่อเนื่องหรือปริมาณการคักต่อเนื่อง (F_a) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับปริมาณการเก็บกักสูงสุดหรือศักย์การเก็บกักสูงสุด (Potential Maximum Retention, S) เมื่อปริมาณฝนบางส่วนถูกคักเอาไว้ตอนเริ่มแรกซึ่งช่วงนั้นไม่มีน้ำท่าเกิดขึ้น ปริมาณฝนส่วนที่เหลือคือค่า $P - I_a$ ดังนั้นอัตราส่วนของ F_a ต่อ S ต้องเท่ากับอัตราส่วนของ P_c ต่อ $P - I_a$ นั่นคือ

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_c}{P - I_a} \quad (56)$$

รวมสมการที่ 55 และ 56 เข้าด้วยกันจะได้

$$P_c = 0 \quad \text{เมื่อ } P < I_a \quad (57)$$

$$P_c = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{เมื่อ } P \geq I_a \quad (58)$$

สมการข้างต้นเป็นสมการพื้นฐานในการคำนวณค่าฝนส่วนเกินหรือน้ำท่าโดยตรง (Direct Runoff) จากพายุฝนโดยวิธี US SCS

จากการศึกษาลุ่มน้ำขนาดเล็กหลาย ๆ ลุ่มน้ำ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า I_p และ S ดังนี้

$$I_p = 0.2 S \quad (59)$$

แทนค่าสมการที่ 59 ในสมการที่ 58 จะได้

$$P_c = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (60)$$

ค่าการเก็บกักสูงสุด (S) คำนวณจาก Curve Number (CN) โดยใช้สมการที่ได้จากการทดลองและทฤษฎีบนพื้นฐานของการวิเคราะห์น้ำฝน - น้ำท่า ดังนี้

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (61)$$

เมื่อ S = ค่าการเก็บกักสูงสุด (มม.)

ค่า CN จะพิจารณาจากประเภทของหน่วยดิน ลักษณะการใช้ที่ดินและเงื่อนไขความชื้นก่อนหน้านี้อัน (Antecedent Moisture Condition, AMC) ที่ช่วงเวลาเริ่มต้นของการเกิดพายุฝนค่า CN จะเท่ากับศูนย์คือไม่เกิดน้ำท่าและในกรณีที่ CN เท่ากับ 100 ปริมาณฝนส่วนเกินจะเท่ากับปริมาณฝนที่ตกทั้งหมด

สำหรับเงื่อนไขความชื้น (AMC) สามารถแบ่งออกเป็น 3 เงื่อนไขด้วยกันคือ

AMC (I) คือ เงื่อนไขความชื้นต่ำ

AMC (II) คือ เงื่อนไขความชื้นปานกลาง

AMC (III) คือ เงื่อนไขความชื้นสูง

ค่า CN ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ประยุกต์ใช้สำหรับเงื่อนไขความชื้นสภาพทั่วไป AMC (II) แต่สำหรับเงื่อนไขความชื้นต่ำ AMC (I) และเงื่อนไขความชื้นสูง AMC (III) ค่า CN สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 62 และ 63 ดังนี้

$$CN (I) = \frac{4.2CN(II)}{P - 0.058CN(II)} \quad (62)$$

$$CN (III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (63)$$

ช่วงเงื่อนไขความชื้นประเภทต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับปริมาณฝนสะสมทั้งหมดที่ตกก่อนหน้าช่วงที่พิจารณา 5 วัน และนอกจากนั้นยังพิจารณาช่วงฤดูกาลเพาะปลูกชนิดพืชดังแสดงในตารางที่ 2.1

ค่า CN ที่พัฒนาขึ้นโดยหน่วยงาน Soil Conservation Service ได้แบ่งประเภทของหน่วยดินออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

- กลุ่ม A เป็นกลุ่มดินที่ยอมให้น้ำซึมผ่านสูง เช่น กรวด ทรายเม็ดป่น
- กลุ่ม B เป็นกลุ่มดินที่ยอมให้น้ำซึมผ่านปานกลาง เช่น ดินร่วนปนทราย
- กลุ่ม C เป็นกลุ่มดินที่ยอมให้น้ำซึมผ่านค่อนข้างต่ำ เช่น ดินร่วนปนดินเหนียว
- กลุ่ม D เป็นกลุ่มดินที่ยอมให้น้ำซึมผ่านต่ำ เช่น ดินเหนียว

การแบ่งประเภทของดินสามารถหาได้จากค่าความจุอัตราการซึมต่ำสุด ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ค่า CN ที่เปลี่ยนไปตามประเภทของหน่วยดิน ดังแสดงในตารางที่ 2.3 สามารถนำไปใช้หาค่า CN ของลุ่มน้ำที่ทำการศึกษา เพื่อใช้คำนวณปริมาณน้ำท่า

ค่าเฉลี่ย CN คำนวณจากสมการที่ 64

$$CN = \frac{A_1CN_1 + A_2CN_2 + \dots + A_nCN_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (64)$$

เมื่อ A_s = พื้นที่ย่อยของสภาพการใช้ที่ดินบนแต่ละกลุ่มชนิดดิน

CN_s = ค่า CN ของสภาพการใช้ที่ดินบนแต่ละชนิดกลุ่มดิน (ตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.1 การจำแนกเงื่อนไขความชื้นก่อนหน้า (AMC)

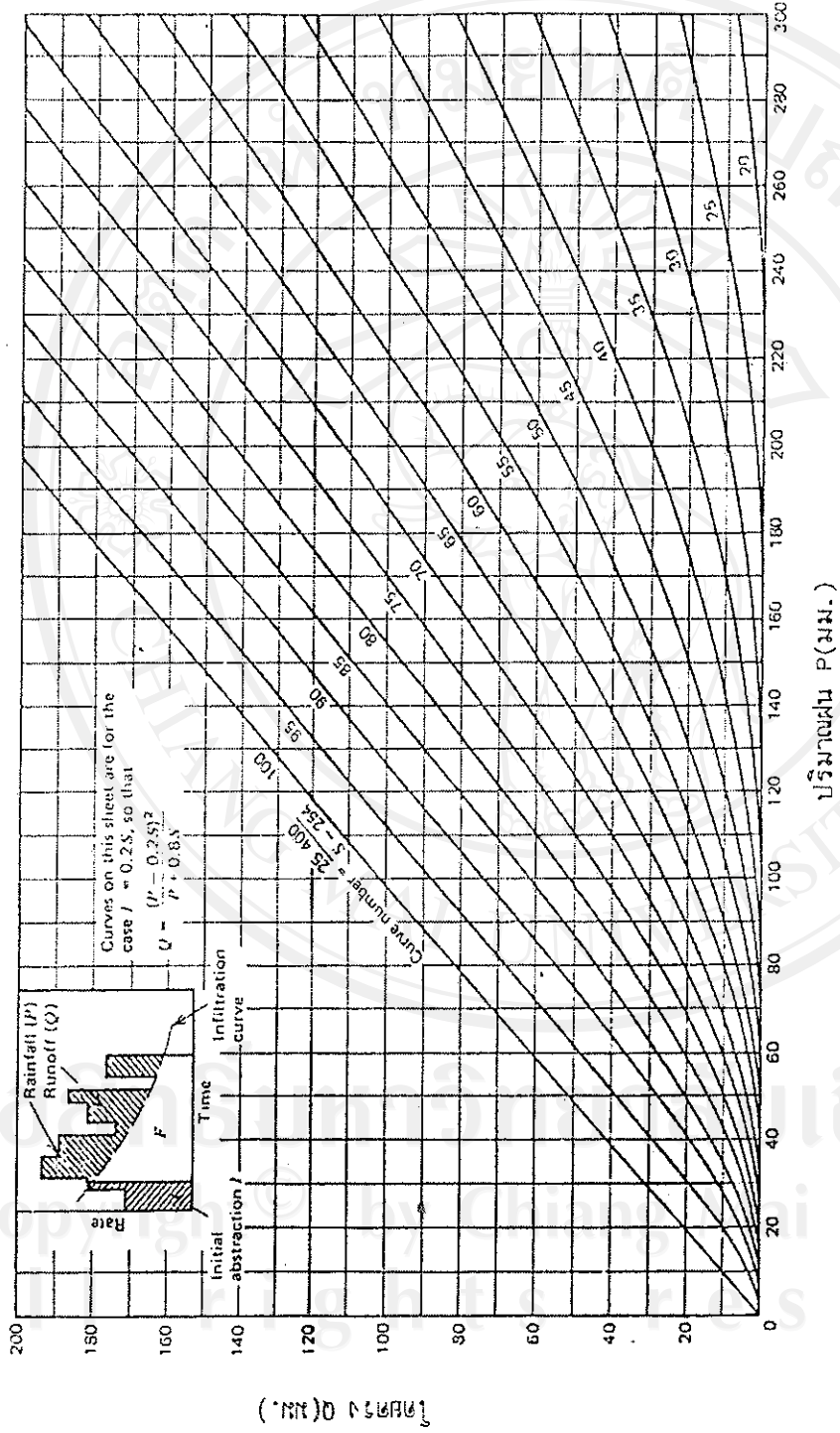
ชนิดของความชื้นเริ่มต้น (AMC)	ปริมาณฝนสะสมก่อนหน้า 5 วัน (มม.)	
	ฤดูแล้ง (ไม่มีการเพาะปลูก)	ฤดูฝน (มีการเพาะปลูก)
I	ต่ำกว่า 12.7	ต่ำกว่า 35.6
II	12.7 ถึง 27.9	35.6 ถึง 53.3
III	มากกว่า 27.9	มากกว่า 53.3

ที่มา : Soil Conservation Service, 1972.

ตารางที่ 2.2 การจำแนกชนิดของดินตามค่าความจุ้ตราบการซึมต่ำสุด

กลุ่ม	ความจุ้ตราบการซึมต่ำสุด (มม./ชม)
A	7.5 – 11.5
B	3.8 – 7.5
C	1.3 – 3.8
D	0 – 1.3

ที่มา : Soil Conservation Service, 1972.



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำฝนกับปริมาณน้ำไหลตามวิธีของ US SCS
 ที่มา : Soil Conservation Service, 1972.

ตารางที่ 2.3 ค่าโค้งหมายเลขน้ำท่า (CN) สำหรับพื้นที่ต่างๆ

สำหรับพื้นที่เมือง ¹					
ชนิดสิ่งคลุมดินและสภาพอุทกวิทยา	ร้อยละพื้นที่ที่ไม่ ซึมน้ำ ²	หมายเลขโค้งน้ำท่า (CN) สำหรับชุดดินทาง อุทกศาสตร์ (HSG'S)			
		A	B	C	D
พื้นที่เมืองที่ได้รับการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ (Vegetation established)					
ที่โล่ง (สนามหญ้า สวนสาธารณะ สนามกอล์ฟ ที่ฝังศพ เป็นต้น) ³ :					
สภาพไม่ดี (หญ้าปกคลุม < 50%)		68	79	86	89
สภาพพอใช้ (หญ้าปกคลุม 50% - 75%)		49	69	79	84
สภาพดี (หญ้าปกคลุม > 75%)		39	61	74	80
พื้นที่ไม่ซึมน้ำ :					
ที่จอดรถแบบมีฉาบหน้า หลังคา ทางรถ เป็นต้น (ไม่รวม Right-of-way)		98	98	98	98
ถนน :					
มีฉาบหน้า, ขอบและรางระบายน้ำฝน (ไม่รวม Right - of - way)		98	98	98	98
มีฉาบหน้า, กูเปิด (รวม Right - of - way)		83	89	92	93
กรวด (รวม Right - of - way)		76	85	89	91
โรยดิน (รวม Right - of - way)		72	82	87	89
¹ สภาพ Runoff เล็ก และ Ia = 0.2S ² ร้อยละเฉลี่ยของพื้นที่ที่ไม่ซึมน้ำใช้เพื่อปรับปรุงส่วนประกอบของ CN ข้อสมมุติอื่นคือ พื้นที่ที่ไม่ซึมน้ำอยู่ติดกับระบบระบายน้ำโดยตรง พื้นที่ระบายน้ำมี CN เป็น 98 และพื้นที่ที่น้ำซึมได้จะถือว่าเท่ากับที่โล่งซึ่งมีสภาพ Hydrologic ที่ดี ³ CN นี้เท่ากับทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ CN ประกอบอาจคำนวณสำหรับการรวมกันแบบอื่นของที่โล่งซึ่งมีสิ่งปกคลุม					

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ค่าโค้งหมายเลขน้ำท่า (CN) สำหรับพื้นที่ต่างๆ

สำหรับพื้นที่เมือง					
ชนิดสิ่งคลุมดินและสภาพอุทกวิทยา	ร้อยละเฉลี่ยพื้นที่ไม่ซึมน้ำ	หมายเลขโค้งน้ำท่า (CN) สำหรับชุดดินทางอุทกศาสตร์ (HSG'S)			
		A	B	C	D
พื้นที่เมืองซึ่งเป็นทะเลทรายทางตะวันตก :					
ภูมิประเทศแบบทะเลทรายธรรมชาติ (พื้นที่ซึมน้ำเท่านั้น) ¹		63	77	85	88
ภูมิประเทศแบบทะเลทรายที่สร้างขึ้น (วัชพืชที่เป็นตัวขวางที่ไม่ซึมน้ำ ไม้พุ่มทะเลทรายในทราย 1-2 นิ้ว หรือในกรวดและล้อมรอบอ่าง)		96	96	96	96
เขตเมือง :	85	89	92	94	95
ธุรกิจและพาณิชย์	72	81	88	91	93
อุตสาหกรรม					
เขตที่อยู่อาศัยตามขนาดโดยเฉลี่ย	65	77	85	90	92
1/8 เอเคอร์ (0.051 ตร.ม.) หรือน้อยกว่า (บ้านในเมือง)	38	61	75	83	87
1/4 เอเคอร์ (0.101 ตร.ม.)	30	57	72	81	86
1/3 เอเคอร์ (0.135 ตร.ม.)	25	54	70	80	85
1/2 เอเคอร์ (0.202 ตร.ม.)	20	51	68	79	84
1 เอเคอร์ (0.405 ตร.ม.)	12	46	65	77	82
2 เอเคอร์ (0.809 ตร.ม.)					
พื้นที่กำลังพัฒนาสู่ความเป็นเมือง		77	86	91	94
พื้นที่ซึ่งเพิ่งเคลือบให้เรียบ (พื้นที่ซึมน้ำได้เท่านั้น ไม่มีพืช) ²					
พื้นที่ว่างเปล่า (ใช้ CN ในการพิจารณาประเภทสิ่งปกคลุมซึ่งคล้ายกับพื้นที่เกษตรกรรม)					
¹ CN ประกอบสำหรับภูมิประเทศแบบทะเลทรายตามธรรมชาติ					
² CN ประกอบในการออกแบบวัดชั่วคราวระหว่างการเคลือบที่ให้เรียบและการก่อสร้าง					

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ค่าโค้งหมายเลขน้ำท่า (CN) สำหรับพื้นที่ต่างๆ

สำหรับพื้นที่เกษตรกรรมเพาะปลูก							
รายละเอียดสิ่งปกคลุม			หมายเลขโค้งน้ำท่า (CN) สำหรับ ชุดดินอุทกศาสตร์ (HSG'S)				
ประเภทสิ่งปกคลุม ¹	วิธีการเพาะปลูก ²	สภาพ อุทกวิทยา ³	A	B	C	D	
ที่ซึ่งไถคราดทิ้งไว้ การปลูกพืชไร่เป็นแนว (Row Crops)	ดินโล่ง	-	77	86	91	94	
	ปกคลุมด้วยซากพืช (Crop Residue Cover)	ไม่ดี	76	86	90	93	
		ดี	74	83	88	90	
	แถวตรง (Straight-row)	ไม่ดี	72	81	88	91	
		ดี	67	78	85	89	
		แนวตรงและปกคลุมด้วย ซากพืช	ไม่ดี	71	80	87	90
			ดี	64	75	82	85
		แถวตามระดับพื้นที่ (Contoured)	ไม่ดี	70	79	84	88
		แถวตามระดับพื้นที่และปกคลุม ด้วยซากพืช	ดี	65	75	82	86
		ตามแนวระดับพื้นที่และขั้นบันได (Terrace)	ไม่ดี	69	78	83	87
			ดี	64	74	81	85
		ตามแนวระดับพื้นที่ขั้นบันไดและ ปกคลุมด้วยซากพืช	ไม่ดี	66	74	80	82
			ดี	62	71	78	81
			ไม่ดี	65	73	79	81
ดี			61	70	77	80	

¹ สภาพ Runoff โดยเฉลี่ย และ $I_a = 0.2S$

² ซากพืชปกคลุม ใช้ได้เมื่อมีซากน้อยกว่า 5% ของผิวหน้า ตลอดปี

³ สภาพ Hydrologic ยึดถือตามการรวมปัจจัยที่มีผลต่อการไหลซึมลงดินและ Runoff รวมถึง (a) ความหนาแน่นและการครอบคลุมของพื้นที่ที่เป็นพืชพันธุ์ (b) ปริมาณการปกคลุมในตลอดปี (c) ปริมาณการหมุนเวียนของหญ้าหรือ closed-seeded legumes (d) ร้อยละของซากปกคลุมบริเวณผิวหน้า (ดี $\geq 20\%$) และ (e) ระดับความหยาบของผิวหน้า

ไม่ดี : ปัจจัยที่ทำให้การไหลซึมไม่ดี และช่วยเพิ่ม Runoff

ดี : ปัจจัยที่สนับสนุนการไหลซึมเฉลี่ยและดีกว่าการไหลซึมเฉลี่ย และลด Runoff

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ค่าโค้งหมายเลขน้ำท่า (CN) สำหรับพื้นที่ต่างๆ

สำหรับพื้นที่เกษตรกรรมเพาะปลูก							
รายละเอียดสิ่งปกคลุม			หมายเลขโค้งน้ำท่า (CN) สำหรับ ชุดดินอุทกศาสตร์ (HSG'S)				
ประเภทสิ่งปกคลุม	วิธีการเพาะปลูก	สภาพ อุทกวิทยา	A	B	C	D	
พืชเมล็ดเล็ก, ข้าว (Small Grain)	แถวตรง	ไม่ดี	65	76	84	88	
		ดี	63	75	83	87	
	แถวตรงและปกคลุมด้วยซากพืช	ไม่ดี	64	75	83	86	
		ดี	60	72	80	84	
	แถวตามระดับพื้นที่	ไม่ดี	63	74	82	85	
		ดี	61	73	81	84	
	แถวตามระดับพื้นที่และปกคลุมด้วยซากพืช	ไม่ดี	62	73	81	84	
		ดี	60	72	80	83	
	แถวตามระดับพื้นที่และชั้นบันได	ไม่ดี	61	72	79	82	
		ดี	59	70	78	81	
	แถวตามระดับพื้นที่ชั้นบันไดและปกคลุมด้วยซากพืช	ไม่ดี	60	71	78	81	
		ดี	58	69	77	80	
	Closed-seed หรือการหว่านพืช	แถวตรง	ไม่ดี	66	77	85	89
		ดี	58	72	81	85	
ตระกูลถั่วหรือทุ่งหญ้าหมุนเวียน	แถวตามระดับพื้นที่	ไม่ดี	64	75	83	85	
	ดี	55	69	78	83		
	แถวตามระดับพื้นที่และชั้นบันได	ไม่ดี	63	73	80	83	
	ดี	51	67	76	80		

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ค่าโค้งหมายเลขน้ำท่า (CN) สำหรับพื้นที่ต่างๆ

สำหรับพื้นที่เกษตรกรรมอื่นๆ ¹					
รายละเอียดสิ่งปกคลุม		หมายเลขโค้งน้ำท่า (CN)			
ประเภทสิ่งปกคลุม	สภาพ อุทกวิทยา	สำหรับ ชุดดินอุทกศาสตร์ (HSG'S)			
		A	B	C	D
ทุ่งหญ้า Pasture, ทุ่งหญ้า หรือทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ ²	ไม่ดี	68	79	86	89
	พอใช้	49	69	79	84
	ดี	39	61	74	80
ทุ่งหญ้า Meadow – ทุ่งหญ้าต่อเนื่อง ป้องกันจากการเป็น อาหารสัตว์และตัดไปทำฟาง ไม้เตี้ยๆ – หญ้า – ไม้เตี้ยผสมกับ ไม้เตี้ยเป็นหลัก ³	-	30	58	71	78
	ไม่ดี	48	67	77	83
	พอใช้	35	56	70	77
ป่า-การรวมกันของหญ้า (สวนผลไม้หรือสวนต้นไม้) ⁵	ดี	30 ⁴	48	65	73
	ไม่ดี	57	73	82	86
	พอใช้	43	65	76	82
ป่า ⁶	ดี	32	58	72	79
	ไม่ดี	45	66	77	83
	พอใช้	36	60	73	79
โรงนา-อาคาร, ทางเดิน, ทางรถ และสิ่งรอบข้าง	-	30 ⁴	55	70	77
โรงนา-อาคาร, ทางเดิน, ทางรถ และสิ่งรอบข้าง	-	59	74	82	86

¹สภาพ Runoff เดลิบ และ $Ia = 0.2S$

²ไม่ดี : มีสิ่งคลุมดิน <50% หรือมีหญ้าหนาแน่นโดยไม่มีใบไม้คลุม พอใช้ : มีสิ่งคลุม 50-75% และมีหญ้าไม่หนาแน่น
ดี : มีสิ่งคลุมดิน > 75% หรือมีหญ้าเบาบาง

³ไม่ดี : มีสิ่งคลุมดิน <50% พอใช้ : มีสิ่งคลุม 50-75% ดี : มีสิ่งคลุมดิน > 75%

⁴Curve Number ที่แท้จริงน้อยกว่า 30 ใช้ CN = 30 ในการคำนวณ Runoff

⁵CN ที่แสดงไว้คำนวณจากพื้นที่ซึ่งมีป่า 50% และหญ้า (Pasture) ปกคลุม 50%

สภาพการรวมกันแบบอื่นๆ อาจคำนวณจาก CN สำหรับป่าและ Pasture

⁶ไม่ดี : หญ้าขึ้นระเกะระกะ ต้นไม้เล็กๆ และไม้เตี้ยซึ่งถูกทำลายเนื่องจากการเลี้ยงสัตว์ หรือการเผาไหม้
พอใช้ : ป่าซึ่งใช้เลี้ยงสัตว์ แต่ไม่ถูกเผาไหม้ มีหญ้าขึ้นระเกะระกะปกคลุมอยู่บ้าง
ดี : ป่าที่ได้รับการป้องกันจากการถูกนำไปเลี้ยงสัตว์ และหญ้าและไม้เตี้ยคลุมดินพอสมควร

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) ค่าโค้งหมายเลขน้ำท่า (CN) สำหรับพื้นที่ต่างๆ

สำหรับพื้นที่แห้งแล้งและกึ่งแห้งแล้ง ¹					
รายละเอียดสิ่งปกคลุม		หมายเลขโค้งน้ำท่า (CN)			
ประเภทสิ่งปกคลุม	สภาพ อุทกวิทยา ²	สำหรับ ชุดดินอุทกศาสตร์ (HSG'S)			
		A ³	B	C	D
ไม้ลำต้นอ่อน – เป็นการผสมของหญ้า วัชพืช และไม้เตี้ยโตช้ากับการ Brush ส่วนรอง	ไม่ดี		80	87	93
	พอใช้		71	81	89
	ดี		62	74	85
ต้นโอ๊ก-ต้นแอสเพน-ไม้เตี้ยแถบภูเขาพร้อมกับไม้โอ๊กเตี้ย ต้นแอสเพน ต้นมะฮอกกานีภูเขา ไม้เตี้ยเมืองหนาว ต้น เมเปิ้ล และไม้เตี้ยอื่นๆ	ไม่ดี		66	74	79
	พอใช้		48	57	63
	ดี		30	41	48
ต้นสน – Pinyon – Pinyon ต้นสน หรือทั้งคู่ หญ้า Understory	ไม่ดี		75	85	89
	พอใช้		58	73	80
	ดี		41	61	71
ไม้จำพวกผกากรอกกับหญ้า Understory	ไม่ดี		67	80	85
	พอใช้		51	63	70
	ดี		35	47	55
ไม้เตี้ยเขตแห้งแล้ง – ไม้หลักรวมทั้ง Saltbrush, Greasewood, Creosotebush, Blackbrush, Bursage, Palo verde, Mesquite และไม้จำพวกตะบองเพชร	ไม่ดี	63	77	85	88
	พอใช้	55	72	81	86
	ดี	49	68	79	84

¹ สภาพ Runoff เฉลี่ย และ Ia = 0.2S

² ไม่ดี : มีสิ่งคลุมดิน <30% (ฟาง หญ้า และ ไม้เตี้ย)
พอใช้ : มีสิ่งคลุมดิน 30-70%
ดี : มีสิ่งคลุมดิน > 70%

³ Curve Number สำหรับชุด A ได้มีการปรับปรุงขึ้นสำหรับ ไม้เตี้ยที่ถูกกลบทั้ง

ที่มา : Soil Conservation Service, 1972

2.4.1 แบบจำลองการเคลื่อนตัวของกราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่า

(Unit Hydrograph Routing Model)

แบบจำลองการเคลื่อนตัวของกราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่าเป็นแบบจำลองเชิงเส้น (Simple Linear Model) สามารถคำนวณกราฟน้ำท่าจากข้อมูลทางกายภาพของกลุ่มน้ำและปริมาณฝนส่วนเกินในช่วงเวลาที่พิจารณาโดยสมมุติให้ความเข้มของฝนที่ตก การแพร่กระจายของฝนคงที่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่ลุ่มน้ำและช่วงเวลาที่พิจารณา โดยช่วงเวลาของกราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่าจะเท่ากับช่วงเวลาของฝนที่พิจารณา

การสร้างกราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่าโดยวิธีของ US SCS สามารถคำนวณหาได้จากกราฟน้ำท่าไร้มิติ (Dimensionless Hydrograph) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยมีวิธีการดังนี้

(1) คำนวณหาค่า Lag Time, L ซึ่งเป็นระยะเวลาจากศูนย์กลางของฝนส่วนเกิน (Excess Rainfall) ถึงเวลาที่จุดสูงสุด (Peak) ของกราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่า มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$L = \frac{l^{0.8}(S + 25.4)^{0.7}}{28.14Y^{0.5}} \quad (65)$$

เมื่อ	L	=	Lag Time (ชั่วโมง)
	l	=	ความยาวของทางน้ำของพื้นที่รับน้ำฝน (กม.)
	S	=	ศักย์สูญเสียสูงสุด (มม.)
		=	$\frac{25400}{CN} - 254$
	CN	=	runoff curve number
	Y	=	ความลาดเทของพื้นที่รับน้ำ (%)

(2) คำนวณหาค่าเวลาน้ำท่าเข้มข้น (Time of Concentration, t_c)

$$t_c = \frac{L}{0.6} \quad (66)$$

เมื่อ t_c = เวลาน้ำท่าเข้มข้น (ชั่วโมง)

(3) คำนวณหาค่าช่วงเวลาของฝนส่วนเกินหนึ่งหน่วย (Duration, D)

$$D = 0.133 t_c \quad (67)$$

เมื่อ D = ช่วงเวลาของฝนส่วนเกินหนึ่งหน่วย (ชั่วโมง)

(4) คำนวณหาเวลาการเกิดปริมาณการไหลสูงสุด (Time to Peak, t_p)

$$t_p = \frac{D}{2} + L \quad (68)$$

เมื่อ t_p = เวลาการเกิดปริมาณการไหลสูงสุด (ชั่วโมง)

(5) คำนวณหาค่าปริมาณการไหลสูงสุด (Peak Discharge, q_p)

$$q_p = \frac{0.208 AQ}{t_p} \quad (69)$$

เมื่อ q_p = ปริมาณการไหลสูงสุด (ลบ.ม./วินาที)

A = พื้นที่รับน้ำฝน (ตร.กม.)

Q = ความลึกของน้ำท่าผิวดินเท่ากับ 1 มม. สำหรับกราฟ
น้ำท่าหนึ่งหน่วย

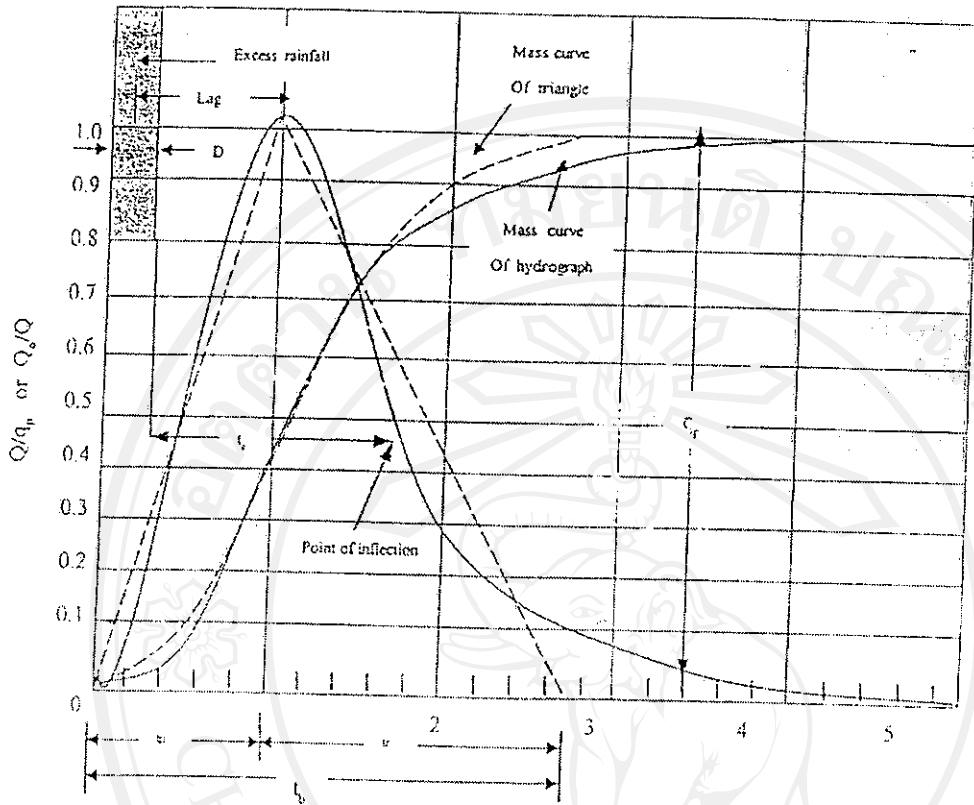
(6) นำค่า t_p และ q_p ที่คำนวณได้ไปคูณกับอัตราส่วนของกราฟน้ำท่าหนึ่งหน่วยไร้มิติ (Dimensionless Unit Hydrograph) ก็จะได้กราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่า (Unit Hydrograph)

(7) คำนวณกราฟน้ำท่าจากฝนส่วนเกิน (Excess Rainfall) ด้วยกราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่า

(8) การหาแฟกเตอร์ลดความลึกของฝนตามขนาดพื้นที่ (ARF) ในกรณีพื้นที่รับน้ำย่อยมีขนาดพื้นที่มากกว่า 25 ตารางกิโลเมตร (10 ตารางไมล์) ใช้แฟกเตอร์ลดความลึกของน้ำฝนเพื่อลดความลึกของน้ำฝนให้ลดลง ตามขนาดของพื้นที่รับน้ำย่อย โดยคำนวณจากสมการที่ 70

$$ARF = 1 - \exp(-1.1t_r^{0.25}) + \exp(-1.1t_r^{0.15} - 0.01A) \quad (70)$$

เมื่อ t_r = ช่วงเวลาของฝนตกต่อเนื่อง (ชั่วโมง)
 A = พื้นที่รับน้ำย่อย (ตารางไมล์)



รูปที่ 2.10 กราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่า (Unit Hydrograph)

2.5 หลักการทำงานของโปรแกรม

ISIS Flow ได้แบ่งการคำนวณส่วนของภาคอุทกพลศาสตร์ของโปรแกรมเป็นสองส่วน คือ ส่วนของ Steady Flow ซึ่งจะใช้ข้อมูลเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) และข้อมูลทางกายภาพของลำน้ำทำการคำนวณค่า Q และ H ตลอดทั้งลำน้ำ เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของส่วนภาคคำนวณ Unsteady flow

ส่วนของภาคคำนวณ Unsteady flow โปรแกรมจะใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากภาคคำนวณ Steady flow เป็นเงื่อนไขเริ่มต้น ใช้ข้อมูลทางกายภาพของลำน้ำ ข้อมูลแบบจำลองสภาพพื้นดิน ข้อมูลเงื่อนไข (ข้อมูลเงื่อนไขทางด้านเหนือน้ำ เงื่อนไขภายใน เงื่อนไขทางด้านท้ายน้ำ) และข้อมูล flow hydrograph จาก U.S. SCS method ใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณ

เมื่อ ISIS คำนวณค่า อัตราการไหลที่ time step ใดๆ ค่าอัตราการไหลที่คำนวณได้จะนำไปหาค่าพื้นที่การไหล โดยการคำนวณหาความเร็วการไหลจากสมการความเร็วที่กำหนดไว้ และนำผลลัพธ์ที่ได้ไปหาพื้นที่การไหลของ Subnode ที่แต่ละ time step และเก็บข้อมูลไว้ในระบบฐานข้อมูลต่อไป

2.6 เกณฑ์การตัดสินใจเลือกผลการเปรียบเทียบแบบจำลอง

ในการเปรียบเทียบแบบจำลอง การเปรียบเทียบผลระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณและข้อมูลระดับน้ำที่ได้จากการบันทึก จะพิจารณาค่าทางสถิติของข้อมูลทั้งสองชุดเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจได้แก่

ค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลน้ำท่าที่ได้จากการคำนวณและข้อมูลที่มีการบันทึกไว้

$$\bar{H}_o = \sum_{i=1}^N \frac{H_{oi}}{N} \quad (71)$$

$$\bar{H}_c = \sum_{i=1}^N \frac{H_{ci}}{N} \quad (72)$$

โดยที่

\bar{H}_o = ระดับน้ำเฉลี่ยที่มีการบันทึกไว้

\bar{H}_c = ระดับน้ำเฉลี่ยที่คำนวณได้

H_{oi} = ระดับน้ำเฉลี่ยรายวันที่มีการบันทึกไว้

H_{ci} = ระดับน้ำเฉลี่ยรายวันที่คำนวณได้

N = จำนวนวันในเหตุการณ์ที่พิจารณา

โดยพิจารณาเปอร์เซ็นต์แตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยระดับน้ำที่ได้จากการวัดและการคำนวณ ซึ่งควรจะมีค่าไม่มาก

$$\% \text{ ต่างต่าง} = \left(\frac{\bar{H}_o - \bar{H}_c}{\bar{H}_o} \right) * 100 \quad (73)$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับน้ำของน้ำท่าที่ได้จากการคำนวณ และข้อมูลที่มีการจดบันทึกไว้

$$STD H_o = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{oi} - \bar{H}_o)^2 \right)^{0.5} \quad (74)$$

$$STD H_c = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{ci} - \bar{H}_c)^2 \right)^{0.5} \quad (75)$$

โดยที่

$STD H_o$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับน้ำที่มีการบันทึกไว้

$STD H_c$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณ

โดยพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับน้ำที่มีการบันทึกไว้จากการคำนวณซึ่งควรจะมีค่าไม่มาก

$$\% \text{ แตกต่าง} = \frac{(STDH_o - STDH_c)}{STDH_c} * 100 \quad (76)$$

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient, r) ระหว่างระดับน้ำที่ได้จากการคำนวณ และระดับน้ำที่มีการจดบันทึกไว้

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N H_{oi} H_{ci} - \left(\sum_{i=1}^N H_{oi} \right) \left(\sum_{i=1}^N H_{ci} \right)}{\sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N H_{oi}^2 - \left(\sum_{i=1}^N H_{oi} \right)^2 \right] \left[N \sum_{i=1}^N H_{ci}^2 - \left(\sum_{i=1}^N H_{ci} \right)^2 \right]}} \quad (77)$$

โดย r มีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 ในกรณีที่ค่า r มีค่าเป็นบวกแสดงว่ากลุ่มข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบปฏิภาคโดยตรง ในกรณีที่ค่า r มีค่าเป็นลบแสดงว่ากลุ่มข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบปฏิภาคผกผัน ในกรณีที่ค่า r มีค่าเข้าใกล้ 1 และ -1 แสดงว่ากลุ่มข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์อย่างดี และในกรณีที่ค่า r มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ากลุ่มข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์น้อยหรือแทบจะไม่มีค่าสำคัญเลย