

**ภาคผนวก ก**  
**หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย**

การศึกษาเกี่ยวกับการกัดเซาะและการตกตะกอนในลำน้ำและอ่างเก็บน้ำ เป็นการศึกษาถึงสภาวะสมดุลระหว่าง อัตราการเคลื่อนตัวของตะกอนในลำน้ำ วัสดุตะกอนท้องน้ำ และชลศาสตร์การไหลในลำน้ำ ทฤษฎีเกี่ยวกับการไหล การเคลื่อนตัวของตะกอนที่เข้ามาเกี่ยวข้องขึ้นอยู่กับสมมุติฐานและเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษา การศึกษาครั้งนี้เลือกใช้โปรแกรม HEC-6 ซึ่งเป็นโปรแกรมแบบจำลองคณิตศาสตร์ แบบมิติเดียวของการไหลแบบคงที่ (One dimensional steady state) เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการกัดเซาะและการตกตะกอน ตามแนวรูปตัดตามยาวของลำน้ำและอ่างเก็บน้ำ โดยการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมของน้ำกับตะกอนแขวนลอย ตะกอนท้องน้ำ และชลศาสตร์การไหลให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

**1. ทฤษฎีทางด้านชลศาสตร์**

1.1 สมการพลังงาน ในการศึกษานี้ใช้สมการพลังงาน 1 มิติ ในการคำนวณ รูปตัดตามยาวของระดับน้ำ (Water Surface Profile) โดยใช้วิธีขั้นตอนมาตรฐาน (Standard Step Method) ในการวิเคราะห์สมการพลังงาน การคำนวณความสูญเสียพลังงาน (Head Loss) เนื่องจากความเสียดทานในการใช้สมการของ Manning ส่วนความสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของรูปตัดขวางลำน้ำ ใช้สัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของความสูญเสียพลังงานซึ่งเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละรูปตัด และในแต่ละรูปตัดก็เปลี่ยนไปตามอัตราการไหลหรือระดับของการไหลรูปแบบของสมการพลังงาน 1 มิติเป็นดังนี้ (ดูภาพประกอบ ก-1 )

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + he \quad (ก-1)$$

โดยที่  $g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

$he$  = การสูญเสียพลังงาน (Energy loss)

$V_1, V_2$  = ความเร็วเฉลี่ยในการไหล (Average velocity)

$WS_1, WS_2$  = ความสูงของระดับน้ำที่ขอบของ Section ที่พิจารณา

$\alpha_1, \alpha_2$  = สัมประสิทธิ์การกระจายความเร็ว

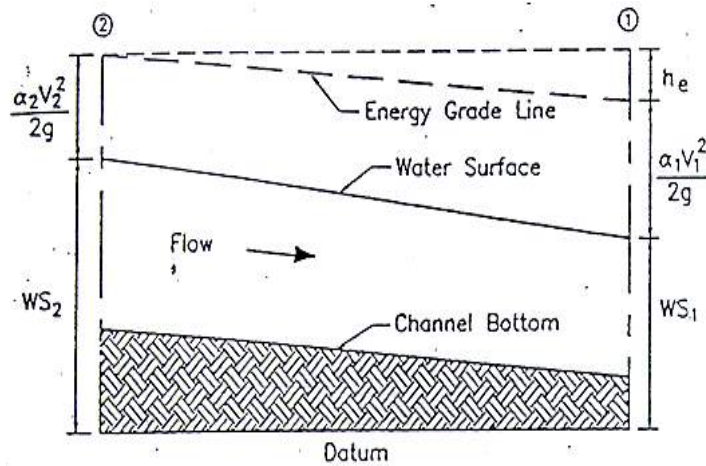
**1.2 สมการคำนวณค่าความสูญเสียทางด้านชลศาสตร์ (Hydraulic Losses)**

จากสมการพลังงานเทอมความสูญเสียพลังงาน ;  $he$  เป็นการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากความเสียดทาน (Friction Loss) และความสูญเสียพลังงานเนื่องจากรูปร่างของท้องน้ำ (Form Loss)

$$he = h_f + h_o \quad (ก-2)$$

โดยที่  $h_f$  = ความสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน

$h_o$  = ความสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง



ภาพประกอบ ก-1 แสดงรายละเอียดของเทอมต่าง ๆ ในสมการพลังงาน

ในการประมาณการการกระจายการไหลทางด้านรูปตัดขวางของลำน้ำ จะแบ่งหน้าตัดของลำน้ำออกเป็นส่วนย่อย (Sub Section) โดยในแต่ละส่วนให้มีคุณสมบัติทางด้านชลศาสตร์ใกล้เคียงกัน ดังนั้นสมการความสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานจึงอยู่ในรูปดังนี้

$$h_f = \left( \frac{Q}{k_i} \right)^2 \quad (ก-3)$$

$$k_i = \sum_{j=1}^{NSS} \left\{ \frac{1.49}{n_j} \right\} \frac{\frac{(A_2 + A_1) \left[ \frac{R_2 + R_1}{2} \right]^{2/3}}{2}}{\sqrt{L_j}} \quad (ก-4)$$

โดยที่  $A_1, A_2$  = พื้นที่ของ Cross section ของทำนน้ำและต้นน้ำทางด้านทำนน้ำและ เหนือน้ำตามลำดับ

$NSS$  = Section ย่อยทั้งหมดใน section ใด ๆ ที่พิจารณา

$k_i$  = ค่า Conveyance ของช่วงต่าง ๆ

$L_j$  = ความยาวของช่วงระหว่าง Subsection

$n$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning

$Q$  = ปริมาณการไหล

$R_1, R_2$  = รัศมีชลศาสตร์ของทำนน้ำและทางด้านเหนือน้ำตามลำดับ

ความสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เป็นการคำนวณความสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการแคบเข้า และการผายออกของหน้าตัดลำน้ำ โดยใช้สมการดังนี้

$$h_o = C_L \left( \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) \quad (ก-5)$$

โดยที่  $C_L$  = สัมประสิทธิ์ความสูญเสียพลังงาน เนื่องจากการแคบเข้าหรือการผายออกของหน้าตัดลำน้ำ

ถ้าค่าภายในเครื่องหมายวงเล็บเป็นลบ แสดงถึงการไหลที่แคบเข้า ค่า  $C_L$  ที่ใช้ก็ต้องเป็นสัมประสิทธิ์ความสูญเสียพลังงานเนื่องจากการแคบเข้า ถ้าค่าภายในเครื่องหมายสัมบูรณ์เป็นบวกแสดงว่าการไหลผ่านหน้าตัดที่ผายออก ค่า  $C_L$  ที่ใช้ก็ต้องเป็นสัมประสิทธิ์ความสูญเสียพลังงานเนื่องจากการผายออก

เป็นที่น่าสังเกตว่า ค่าความสูญเสียพลังงาน อยู่รูปตัวแปรเพียง 2 ตัวคือ  $h_f$  และ  $h_o$  ดังนั้นค่า  $h_f$  จึงเป็นค่าความสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานที่รวมเอาผลเนื่องจากสาเหตุต่างๆ คือ

- ความขรุขระของรูปร่างท้องน้ำ (Form Roughness of the Movable Bed)
- ความไม่สม่ำเสมอของตลิ่ง (Bang Irregularities)
- พืชผักที่ขึ้นในลำน้ำ (Vegetation)
- ความโค้งและการไหลรวมกันของลำน้ำ (Bend Losses and Junction Loss)

โดยจะรวมผลความสูญเสียพลังงานเนื่องจากสาเหตุเหล่านี้ไว้ในสัมประสิทธิ์ ความสูญเสียพลังงานของ Manning ( $n$ )

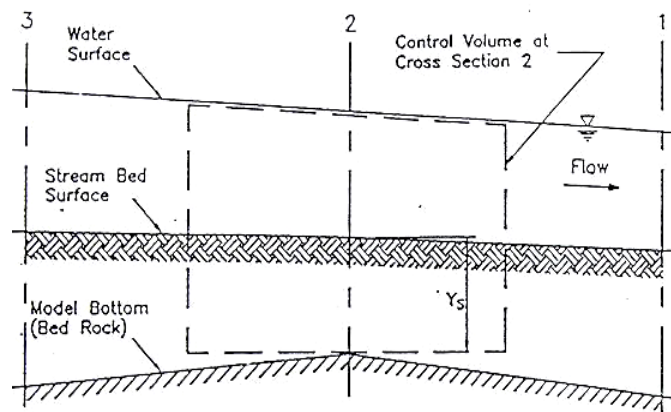
## 2. ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการคำนวณเกี่ยวกับตะกอน

ความสามารถที่จะพัดพาตะกอนของรูปตัดขวางจะถูกคำนวณในแต่ละช่วงเวลาของการคำนวณ (Time Interval) ศักยภาพในการพัดพาตะกอน (Transport Potential) จะถูกคำนวณสำหรับแต่ละชั้นขนาดของเม็ดวัสดุท้องน้ำ โดยถือเสมือนว่าท้องน้ำประกอบด้วยวัสดุที่มีชั้นขนาดนั้น 100 เปอร์เซ็นต์ คุณด้วยศักยภาพในการพัดพาตะกอนด้วยอัตราส่วนของแต่ละชั้น ขนาดที่เป็นส่วนประกอบของวัสดุท้องน้ำ ซึ่งจะได้ความสามารถที่จะพัดพาตะกอนของแต่ละชั้นขนาด ซึ่งอัตราส่วนของแต่ละชั้นขนาดนี้จะเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างช่วงเวลาการคำนวณดังนั้นเทคนิคในการทำซ้ำๆ จึงถูกใช้เพื่อที่จะนำเอาผลของการเปลี่ยนแปลงนี้ไปปรับความสามารถในการพัดพาตะกอนปัจจัยเบื้องต้นที่ควบคุมอัตราการกัดเซาะคือความหนาของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว (Active Layer) และปริมาณผิวท้องน้ำที่ต้านทานต่อการกัดเซาะได้ (Armored) ชั้นที่มีการเคลื่อนไหวหมายถึงชั้นของวัสดุระหว่างผิวของท้องน้ำกับชั้นสมมุติ ซึ่งลึกจากผิวท้องน้ำจนถึงระดับที่ไม่มีมีการเคลื่อนตัวของตะกอน ในเงื่อนไขของการกระจายขนาดเม็ดวัสดุท้องน้ำและเงื่อนไขการไหลที่กำหนด ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป ความหนาของชั้นที่มีการเคลื่อนไหวจะถูกคำนวณตอนเริ่มต้นของช่วงเวลาการคำนวณปริมาณของผิวท้องน้ำ

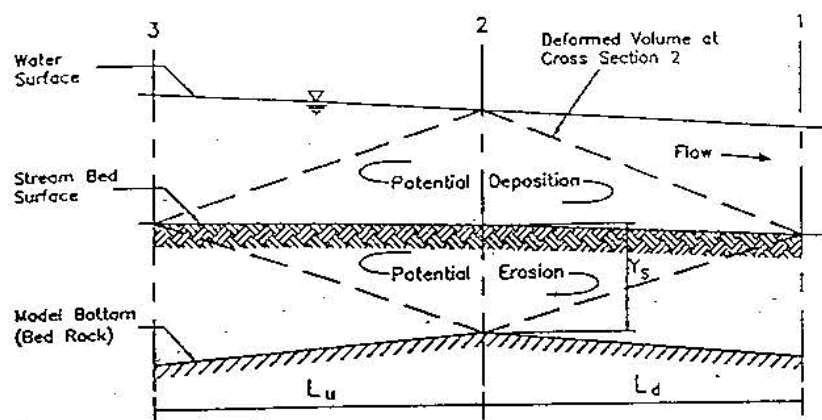
ที่ด้านทานการกัดเซาะได้ จะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว ที่จะถูกย้ายโดยการกัดเซาะ หลักการที่ใช้ในการปรับระดับของท้องน้ำตามการกัดเซาะหรือการตกตะกอนที่เกิดขึ้นคือ สมการของเอกซ์เนอร์ (Exner Equation) เสถียรภาพของชั้นด้านการกัดเซาะยึดตามหลักการของ Gessler

## 2.1 สมการความต่อเนื่องของวัสดุตะกอน

2.1.1 ปริมาตรควบคุม (Control Volume) ในแต่ละรูปตัดขวางจะมีการกำหนดปริมาตรควบคุมโดยที่ความกว้างของปริมาตรควบคุมให้เท่ากับความกว้างของท้องน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลง และความลึกของปริมาตรควบคุมวัดจากผิวน้ำถึงชั้นหินแข็งหรือชั้นควบคุมทางธรณีวิทยาอื่นๆ ภายใต้ท้องน้ำที่ด้านการกัดเซาะ ในกรณีพื้นที่ๆ ไม่มีชั้นหินแข็ง จะมีการกำหนดชั้นฐานของแบบจำลอง (Model Bottom) และจะไม่มีการกัดเซาะลึกกว่าชั้นนี้ รูปภาพประกอบ ก-2 ปริมาตรควบคุมในรูปตัดขวางที่ 2 คือส่วนที่แสดงด้วยเส้นประส่วนปริมาตรควบคุมสำหรับรูปตัดขวางที่ 1 และ 3 จะต่อกับปริมาตรควบคุมของรูปตัดที่ 2



ภาพประกอบ ก-2 แสดงกำหนดปริมาตรควบคุม



ภาพประกอบ ก-3 แสดงปริมาตรควบคุมที่มีการตัดแปลง

สมการความต่อเนื่องของตะกอนจะเขียนครอบคลุม ปริมาตรควบคุมนี้ แต่สมการพลังงานจะเขียนขึ้นระหว่างรูปตัดขวาง โดยใช้ค่าเฉลี่ยพื้นที่หน้าตัดที่ตำแหน่งรูปตัดขวาง แต่เนื่องจากทั้งความต่อเนื่องของมวลสาร และพลังงาน ควรจะครอบคลุมในส่วนตัวเดียวกัน ดังนั้นรูปร่างของปริมาตรควบคุมจึงมีการดัดแปลงดังแสดงในภาพประกอบ ก-3 ปริมาตรของตะกอนในท้องน้ำ โดยใช้ค่าเฉลี่ยพื้นที่ที่ปลายช่วงประมาณได้ตามสูตรดังนี้

$$V_{sed} = B_o \cdot Y_s \cdot \frac{L_u + L_d}{2} \quad (ก-6)$$

โดยที่  $B_o$  = ความกว้างของท้องน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลง  
 $L_u, L_d$  = ความยาวช่วงระหว่างรูปตัดขวางลำน้ำทางด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำของรูปตัดขวางที่พิจารณา ตามลำดับ

$V_{sed}$  = ปริมาตรของตะกอนในปริมาตรควบคุม  
 $Y_s$  = ความลึกของตะกอนในปริมาตรควบคุม

สำหรับความลึกของน้ำเท่ากับ  $D$  ปริมาตรของน้ำในแท่งน้ำ (Water Column) ประมาณได้ตามสูตรดังนี้

$$V_f = B_o \cdot D \cdot \frac{L_u + L_d}{2} \quad (ก-7)$$

$B_o$  และ  $D$  เป็นตัวแปรทางชลศาสตร์แทนความกว้างและความลึก ซึ่งคำนวณโดยใช้ค่าเฉลี่ย ในช่วงเดียวกับที่ใช้ในการแก้สมการพลังงาน ตามที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 1.1

2.1.2 สมการเอกซ์เนอร์ (Exner Equation) รูปร่างทางกายภาพที่ได้บรรยายถึงข้างต้นนี้ ถูกแปลงให้อยู่ในรูปกระบวนการคำนวณทางคณิตศาสตร์ หลักการที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของท้องน้ำคือสมการความต่อเนื่องของวัสดุตะกอน เรียกว่าสมการเอกซ์เนอร์ ซึ่งมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$\frac{\partial G}{\partial X} + B_o \cdot \frac{\partial Y_s}{\partial t} = 0 \quad (ก-8)$$

เมื่อ  $B_o$  = ความกว้างของท้องน้ำที่มีการเคลื่อนที่ (Movable bed)  
 $t$  = ระยะเวลาในแต่ละช่วงของการคำนวณ  
 $G$  = อัตราการไหลเฉลี่ยของตะกอนในช่วงเวลา  $\Delta t$   
 $X$  = ระยะทางตามแนวทงน้ำ  
 $Y_s$  = ความลึกของตะกอนในปริมาตรควบคุม

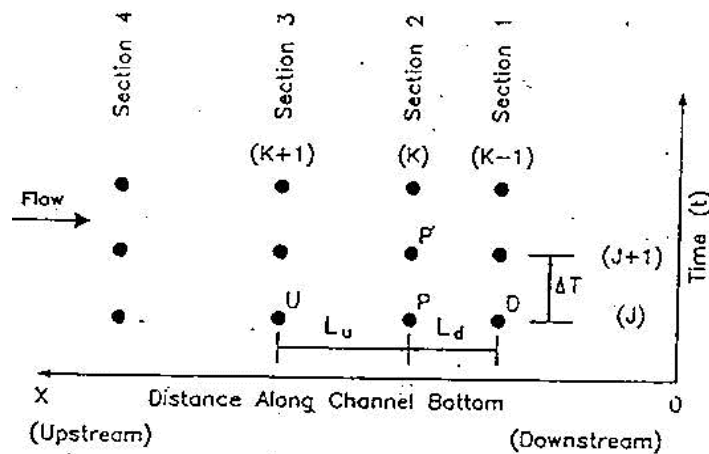
จากสมการสามารถแสดงในรูปของไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference) สำหรับจุด P ดังแสดงในภาพประกอบ ก-4

$$\frac{G_d - G_u}{0.5(L_d + L_u)} + \frac{B_{sp}(Y'_{sp} - Y_{sp})}{\Delta t} = 0 \quad (ก-9)$$

$$Y'_{sp} = Y_{sp} - \frac{\Delta t}{(0.5)B_{sp}} * \frac{G_d - G_u}{L_d + L_u} \quad (ก-10)$$

- โดยที่  $B_{sp}$  = ความกว้างของท้องน้ำที่เคลื่อนที่ที่จุด P  
 $G_u, G_d$  = ปริมาณตะกอนที่หน้าตัดด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ ตามลำดับ  
 $L_u, L_d$  = ระยะระหว่างหน้าตัดด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำวัดจากจุด P ตามลำดับ  
 0.5 = เป็นแฟคเตอร์ถ่วงน้ำหนักระยะระหว่างหน้าตัดด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ

ความหนาเริ่มต้นของวัสดุท้องน้ำที่จุด P แทนด้วยค่าเริ่มต้น  $Y_{sp}$  อัตราการไหลของตะกอน;  $G_u$  คือปริมาณตะกอนโดยอัตราส่วนคละทีไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุมทางด้านเหนือน้ำ สำหรับช่วงเหนือสุดของการศึกษาปริมาณการไหลนี้จะเป็นเงื่อนไขการไหลที่ขอบเขตด้านเหนือน้ำ ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่จะต้องป้อนเข้าปริมาณความเข้มข้นของตะกอนที่ไหลออกจากปริมาตรควบคุม;  $G_d$  จะเป็นค่า  $G_u$  ของปริมาตรควบคุมถัดไปทางท้ายน้ำ



ภาพประกอบ ก-4 แสดงรูปแบบของการคำนวณ

ค่าอัตราการไหลของตะกอนทางด้านท้ายน้ำ;  $G_d$  จะถูกคำนวณโดยพิจารณาความสามารถในการพัดพาตะกอนที่จุด P, ปริมาณการไหลเข้าของตะกอน, วัสดุท้องน้ำที่มีอยู่เดิมและส่วนที่ต้านการกัดเซาะ ค่าความแตกต่างระหว่าง  $G_d$  และ  $G_u$  คือปริมาณของตะกอนที่ตกตะกอนหรือถูกกัดเซาะในช่วงระหว่างจุด D และจุด U ในเวลาที่คำนวณแต่ละครั้ง (Time Step) และค่านี้จะถูกแปลงไปเป็นความเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ (สมการ ก-10)

ตามที่แสดงในภาพประกอบ 28 ความสามารถในการพัดพาตะกอนจะถูกคำนวณที่ค่าระดับท้องน้ำตอนเริ่มต้นของช่วงเวลาการคำนวณ และจะไม่มีการคำนวณซ้ำในระหว่างช่วงเวลาการคำนวณ ดังนั้นจึงมีความสำคัญในการกำหนดช่วงเวลาของการคำนวณให้สั้นพอที่จะไม่ทำให้การเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ ซึ่งมีผลมากนักต่อความสามารถในการพัดพาตะกอนในตอนปลายของช่วงของการคำนวณซึ่งในกรณีนี้อัตราการไหลมาก ๆ ระยะเวลาที่เหมาะสมในแต่ละช่วงของการคำนวณอาจจะเป็นเศษส่วนของวันในขณะที่ระยะเวลาที่เหมาะสมในกรณีอัตราการไหลต่ำ ๆ อาจจะเป็นหลายวันหรือเป็นเดือน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำในแต่ละช่วงเวลาของการคำนวณควรอยู่ในช่วงประมาณไม่เกิน 1 ฟุต หรือประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของความลึกของน้ำโดยใช้ค่าที่น้อยกว่า แต่สำหรับอัตราส่วนคละของวัสดุตะกอนท้องน้ำจะมีการคำนวณใหม่ในระหว่างช่วงเวลาของการคำนวณ ทั้งนี้เพราะค่าความสามารถในการพัดพาตะกอน จะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนคละของวัสดุท้องน้ำ (ดูหัวข้อ 2.4.1)

## 2.2 การกำหนดชั้นที่มีการเคลื่อนไหวและชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหว ( Determination of the Active and Inactive Layer )

โปรแกรม HEC-6 ได้กำหนดหลักการของชั้นที่มีการเคลื่อนไหวและชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหว โดยสมมุติให้ชั้นที่มีการเคลื่อนไหวหมายถึง ชั้นที่มีการผสมกันอย่างต่อเนื่องกับการไหลแต่อาจจะมีชั้นของผิวที่มีการเคลื่อนตัวของเม็ดวัสดุเป็นเกราะป้องกันวัสดุที่มีความละเอียดกว่าจากการผสมกับน้ำ มีการสมมุติให้มี 2 กระบวนการที่แตกต่างกันขึ้น คือ

1) การผสมกันจะเกิดขึ้นระหว่างวัสดุตะกอนท้องน้ำกับส่วนผสมของน้ำและตะกอน เนื่องจากพลังงานในการเคลื่อนตัวของน้ำ

2) การผสมกันจะเกิดขึ้นระหว่างชั้นที่มีการเคลื่อนไหวและชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหว เนื่องมาจากการผิวดูแบบไปของผิวท้องน้ำ

กลไกในการผสมกันเกิดขึ้นเนื่องมาจากการไหลแบบบอลลวนและความเสียดทานท้องน้ำ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนตัวของน้ำ ความลึกของชั้นที่มีการผสมกันสามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชัน ของความเข้มของการไหล (อัตราการไหลหนึ่งหน่วย), ความลาดของเส้นพลังงาน และขนาดของเม็ดวัสดุ ซึ่งจะได้อธิบายถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.2.1 ความลึกสมดุล (Equilibrium Depth) เงื่อนไขทางชลศาสตร์อย่างต่ำที่จะทำให้เม็ดวัสดุขนาดที่กำหนดไม่เกิดการเคลื่อนที่ไปบนผิวของท้องน้ำ สามารถคำนวณได้โดยการรวมสูตรของ Manning, Stricklers, และ Einstein เข้าด้วยกัน ดังนั้นคือ

$$V = \frac{1.49}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (ก-11)$$

$$n = \frac{d^{1/6}}{29.3} \quad (ก-12)$$

$$\psi = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \cdot \frac{d}{D \cdot S_f} \quad (\text{ก-13})$$

- เมื่อ  $d$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Grain diameter)  
 $D$  = ความลึกน้ำ (Water Depth)  
 $V$  = ความเร็วของน้ำ (Water Velocity)  
 $\rho_s$  = ความหนาแน่นของเม็ดทราย (Density of grain sand)  
 $\rho$  = ความหนาแน่นของน้ำ (Density of water)  
 $\psi$  = ความเข้มข้นการเคลื่อนตัวของตะกอน จากฟังก์ชันตะกอนท้องน้ำของ Einstein  
 $S_f$  = ความชันของความเสียดทาน (Friction slopes)

ในกรณีไม่มีการเคลื่อนตัวของตะกอนค่า  $\psi$  มีค่าเท่ากับ 30 หรือมากกว่า โดยการแก้สมการ 16 ในเทอมของ  $S_f$  สำหรับความถ่วงจำเพาะของทราย 2.65 และกำหนดค่า  $\psi$  เท่ากับ 30 จะได้

$$S_f = \frac{d}{18.18D} \quad (\text{ก-14})$$

รวมสมการที่ได้กับสมการของ Manning และ Strickler โดยแทนค่า  $R$  ด้วย  $D$  และคูณความเร็ว ด้วยความลึกจะได้อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง

$$q = 10.21 D^{7/6} d^{1/3} \quad (\text{ก-15})$$

โดยที่  $q$  = อัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของการไหล  
 ดังนั้นจะได้ความลึกสมมูลสำหรับขนาดเม็ดวัสดุและอัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วย ความกว้างที่กำหนดให้ ดังสมการต่อไปนี้

$$D_e = D = \left( \frac{q}{10.21 d^{1/3}} \right)^{6/7} \quad (\text{ก-16})$$

โดยที่  $D_e$  = ความลึกต่ำสุดของน้ำที่ไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของตะกอน (ความลึกสมมูล) สำหรับขนาดเม็ดตะกอนเท่ากับ  $d$

### 2.2.2 ความลึกของการกัดเซาะและการต้านการกัดเซาะ (Scour Depth and Armoring)

โดยที่วัสดุท้องน้ำเป็นส่วนผสมของเม็ดวัสดุขนาดต่าง ๆ ความลึกของการกัดเซาะหาได้โดยการรวม ปริมาณของเม็ดวัสดุหยาบจนมีปริมาณมากพอที่จะต้านการกัดเซาะท้องน้ำ ซึ่งคำนวณได้โดยการคูณจำนวน

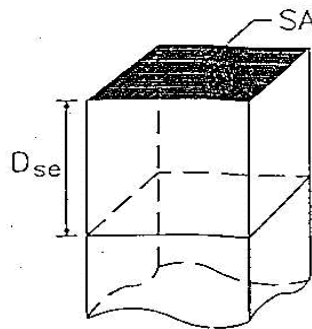


ของเม็ดวัสดุด้วยพื้นที่ผิวที่ได้รับการป้องกันการกัดเซาะจากวัสดุแต่ละเม็ด จะเท่ากับพื้นที่ผิวทั้งหมด (SA) ของแท่งแนวตั้งของวัสดุท้องน้ำที่พิจารณา ดังรายละเอียดในภาพประกอบ ก-5 และสมการ ก-17 และ ก-18

$$SA = N \left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \quad (\text{ก-17})$$

$$N = \frac{SA}{\left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right)} \quad (\text{ก-18})$$

โดยที่  $N$  = จำนวนของเม็ดวัสดุบนผิวท้องน้ำ  
 $SA$  = พื้นที่ผิวท้องน้ำ

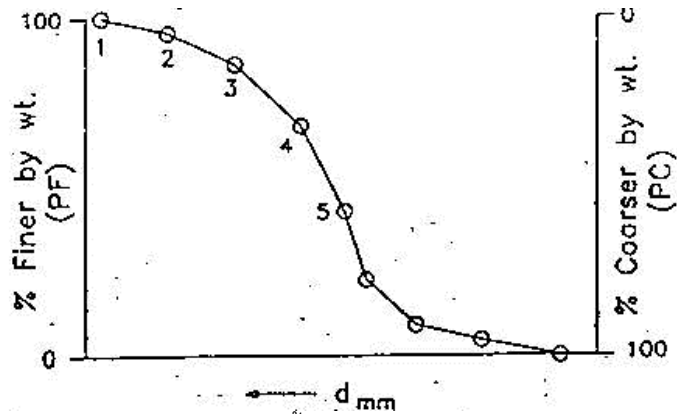


ภาพประกอบ ก-5 รูปตัดแท่งในแนวตั้งของวัสดุท้องน้ำซึ่งมีพื้นที่ผิว SA

พื้นที่ผิวบางส่วนของแต่ละแท่ง อาจมีเกราะป้องกันการกัดเซาะเนื่องมาจากหินที่ฝังพื้นท้องน้ำหรือชั้นต้านทานการกัดเซาะ ทำให้พื้นที่ผิวที่มีศักยภาพที่จะถูกการกัดเซาะน้อยกว่าพื้นที่ผิวทั้งหมดของแต่ละแท่ง ซึ่งจะลดจำนวนของเม็ดวัสดุที่เปิดเผยต่อการกัดเซาะดังสมการ

$$N = \frac{A \cdot SAE}{\left( \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right)} \quad (\text{ก-19})$$

เมื่อ  $SAE$  = อัตราส่วนของพื้นที่ผิวที่มีศักยภาพในการกัดเซาะต่อพื้นที่ผิวทั้งหมด



ภาพประกอบ ก-6 โค้งอัตราส่วนคละของวัสดุท้องน้ำ สำหรับคำนวณความลึกสมดุ

สมมุติว่าวัสดุท้องน้ำเป็นส่วนผสมของเม็ดวัสดุขนาดต่างกัน ความลึกของการกัดเซาะจะต้องทำให้เกิดปริมาตรของเม็ดวัสดุที่สามารถต้านการกัดเซาะเพียงพอที่จะปกคลุมผิวของท้องน้ำได้เต็มทั้งหมด โดยมีความหนาเท่ากับ 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดวัสดุ ตามแสดงในสมการ (ก-20) และ (ก-21)

$$V_{se} = SA \cdot D_{se} \quad (\text{ก-20})$$

$$V_{se} = PC \cdot SA \cdot D_{se} = N \frac{\pi \cdot d_a^3}{6} \quad (\text{ก-21})$$

เมื่อ  $d_a$  = ขนาดเล็กที่สุดของ เม็ดวัสดุในชั้นต้านการกัดเซาะ

$D_{se}$  = ความลึกของวัสดุท้องน้ำที่จะถูกพัดพาไปเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุ ในแต่ละช่วงเวลาการคำนวณ

$PC$  = เปอร์เซ็นต์ของเม็ดวัสดุที่ใหญ่กว่า  $d_a$

$V_{se}$  = ปริมาตรของวัสดุท้องน้ำซึ่งถูกพัดพาไปก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะสมดุในแต่ละช่วงเวลาของการคำนวณ

รวมสมการสำหรับพื้นที่ผิวและปริมาตรเข้าด้วยกัน จะได้ความลึกของการกัดเซาะที่ทำให้เกิดขึ้นต้านการกัดเซาะเต็มพื้นที่ผิวท้องน้ำ ดังนี้

$$D_{se} = \left[ \frac{SA \cdot SAE}{(\pi \cdot d^2 / 4)} \right] \left[ \frac{(\pi \cdot d^3 / 6)}{PC \cdot SA} \right] = \left( \frac{2}{3} \right) \left[ \frac{SAE \cdot d}{PC} \right] \quad (\text{ก-22})$$

สมการที่ได้นี้ใช้ร่วมกับสมการ (ก-16) เพื่อใช้คำนวณความลึกสมดุสำหรับส่วนผสมของเม็ดวัสดุขนาดต่าง ๆ การกำหนดค่า  $PC$  ที่จะใช้ในสมการ (ก-22) นั้น ทำโดยการแบ่งโค้งอัตราส่วนคละของวัสดุท้องน้ำ ออกเป็นส่วนย่อยของเส้นตรงที่เหมาะสม โดยการประมาณความสัมพันธ์ระหว่าง  $d$  และ  $PC$  (โค้งอัตราส่วนคละ) ซึ่งจะเป็นอนุกรมของเส้นตรงดังแสดงในภาพประกอบ ก-3 ขั้นตอนหนึ่งในการกำหนดตำแหน่งส่วนของ

เส้นตรงที่เหมาะสมบนโค้งอัตราส่วนคละคือ จำนวนความลึกสมดุลย์  $D1_{eq}$  และ  $D2_{eq}$  สำหรับขนาดเม็ดวัสดุที่จุด 1 และจุดที่ 2 ตามลำดับ โดยการใช้สมการ (ก-16) ถ้าหากว่าค่าความลึกที่แท้จริง  $D_{AL}$  น้อยกว่า  $D2_{eq}$  เส้นตรงที่เชื่อมระหว่างจุด 1 และ 2 ตามภาพประกอบ ก-6 จะเป็นตัวกำหนดฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่ต้องการและความลึกสมดุล จะถูกคำนวณในที่สุด ถ้า  $D_{AL}$  มากกว่าความลึกสมดุล สำหรับขนาดเม็ดวัสดุที่จุด 2 การคำนวณจะเลื่อนตามความโค้งอัตราส่วนความคละลงมาที่ส่วนของเส้นตรงระหว่างจุด 2 และจุด 3 ระหว่างจุด 3 และจุด 4 เรื่อย ๆ ไปจนกระทั่งทุกส่วนย่อยของเส้นตรงผ่านการพิจารณาหรือเม็ดวัสดุที่เล็กที่สุดเพียงพอที่จะต้านการกัดเซาะท้องน้ำ ซึ่งกรณีนี้การกัดเซาะจะไม่เกิดขึ้น

การสร้างความสัมพันธ์ของการกัดเซาะและความลึกสมดุลย์ ต้องพิจารณาเงื่อนไขสองอย่างดังรายละเอียดในภาพประกอบ ก-7 เงื่อนไขที่ 1 เมื่อ  $D_{AL}$  คือความลึกจริงของการไหลอยู่ระหว่าง  $D1_{eq}$  และ  $D2_{eq}$  (ซึ่งตรงกับความลึกสมดุลสำหรับจุด 1 และจุดที่ 2 ในภาพประกอบ ก-6)

$$D_{eq} = D_{AL} + D_{se} \quad (ก-23)$$

เงื่อนไขที่ 2 เมื่อ  $D_{AL}$  น้อยกว่า  $D1_{eq}$

$$D_{eq} = D1_{eq} + D_{se} \quad (ก-24)$$

รูปแบบทั่วไปของสมการคือ

$$D_{eq} = D_u + D_{se} \quad (ก-25)$$

โดยที่  $D_u$  อาจจะเป็น  $D_{AL}$  หรือ  $D1_{eq}$  แล้วแต่กรณี

เทคนิคสำหรับการคำนวณ  $D_{eq}$  สำหรับส่วนผสมของเม็ดวัสดุหลายขนาด คือ ขั้นแรกทำการคำนวณ  $D_{se}$  สำหรับ  $D2_{eq}$  โดยใช้สมการ 20 ถึงสมการ ก-22  $D_{se}$  ที่ได้ถูกใช้ในการคำนวณค่า  $V_{se}$  เพื่อตรวจสอบจำนวนของขนาดเม็ดวัสดุที่มีเสถียรภาพว่าเพียงพอที่จะปกคลุมผิวของท้องน้ำได้ทั้งหมดหรือไม่ ถ้าหากไม่เพียงพอค่า  $D2_{eq}$  ก็จะถูกเพิ่มขึ้นครั้งละเล็กน้อยจนกระทั่งได้ค่า  $D_{se}$  ที่ทำให้ปริมาตรของวัสดุท้องน้ำมีจำนวนของเม็ดวัสดุที่มีเสถียรภาพเพียงพอที่จะปกคลุมผิวท้องน้ำได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่จุดนี้  $D2_{eq}$  จะเท่ากับ  $D_{eq}$

โปรแกรม HEC-6 กำหนดโซนของวัสดุระหว่างผิวของท้องน้ำจนถึงระดับความลึกสมดุลเป็นชั้นที่มีการเคลื่อนไหว (Active Layer) และโซนจากระดับความลึกสมดุลถึงชั้นฐานของแบบจำลอง เป็นชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหว (Inactive Layer) ในชั้นที่มีการเคลื่อนไหวนี้จะเป็นแหล่งของวัสดุผิวน้ำ ส่วนในชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหวอัตราส่วนความคละของวัสดุเหมือนกับแหล่งที่มาคือท้องน้ำ การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความคละเกิดขึ้นขณะที่มีการตกตะกอนบนชั้นที่มีการเคลื่อนไหวและจะมีการแลกเปลี่ยนขนาดคละกับชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหว

ชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหวเป็นตะกอนสะสมท้องน้ำเมื่อดิวส์จะมีการเคลื่อนที่จากชั้นหนึ่งไปยังอีกชั้นหนึ่ง ในขณะที่ความหนาของชั้นที่มีการเคลื่อนไหวเปลี่ยนไปเนื่องจาก การเปลี่ยนความลึก, ความเร็ว และความลาดของการไหลของน้ำ มีเพียงวัสดุที่อยู่ในชั้นที่มีการเคลื่อนไหวเท่านั้นที่มีการกัดเซาะโปรแกรม HEC – 6 จะมีการคำนวณอัตราส่วนใหม่ ในระหว่างที่ทำการคำนวณสมการ Exner Equation ในแต่ละช่วงเวลาของการคำนวณ เมื่อวัสดุทั้งหมดถูกเคลื่อนย้ายไปจากชั้นที่มีการเคลื่อนไหวจนหมด ท้องน้ำก็จะเข้าสู่สภาวะที่ดำเนินการกัดเซาะโดยสมบูรณ์ หลักการของชั้นที่มีการเคลื่อนไหวและชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหว ดูในรายละเอียดในหัวข้อ 2.3

อัตราการเกิดสภาวะด้านทานต่อการกัดเซาะจะสอดคล้องกับปริมาณของวัสดุที่ถูกเคลื่อนย้าย และพื้นที่ผิวท้องน้ำที่มีการกัดเซาะ ;  $SA$  อัตราส่วนของพื้นที่ที่มีศักยภาพในการกัดเซาะ ;  $SAE$  อาจหาได้ดังนี้

$$SAE = \frac{VOL_A}{VOL_{SE}} \quad (29)$$

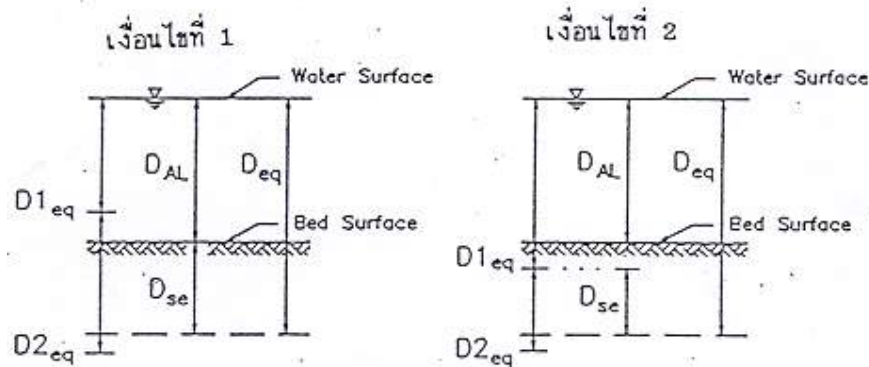
เมื่อ  $VOL_A$  = ปริมาตรที่เคลื่อนในชั้นที่มีการเคลื่อนไหว  
 $VOL_{SE}$  = ปริมาตรทั้งหมดของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว

การชะล้างเมื่อดิวส์ที่มีความละเอียดจากได้ผิวของท้องน้ำ จะถูกป้องกันโดยการปรับค่า  $SAE$  ถ้าขนาดเมื่อดิวส์ท้องน้ำเล็กกว่าขนาดเมื่อดิวส์ที่ดำเนินการกัดเซาะความสามารถในการพัดพาตะกอนจะลดลงเป็นกราฟเส้นตรง จนเป็นศูนย์เมื่อ  $SAE$  ลดลงจนถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่ผิวทั้งหมด หลังจากนั้นก็มีเพียงตะกอนไหลเข้าขนาดดังกล่าวและเล็กกว่า ที่ถูกพัดพาผ่านช่วงที่พิจารณา

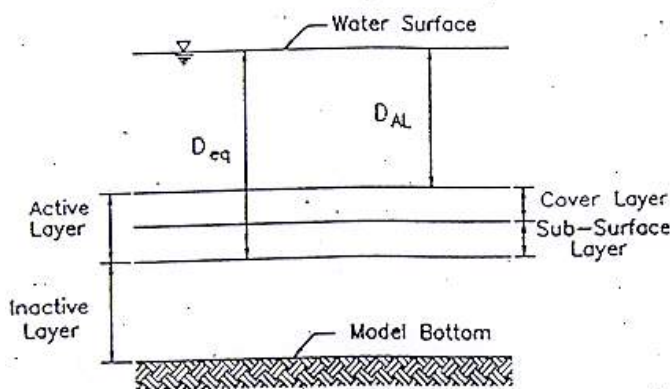
### 2.3 ส่วนประกอบของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว (Composition of the active layer)

ความหนาของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว ถูกคำนวณโดยการให้เท่ากันระหว่างความต้านทานของเม็ดตะกอนท้องน้ำกับแรงที่กระทำต่อเมื่อดิวส์ เนื่องมาจากการไหลของน้ำ (ดูหัวข้อที่ 2.2.1) อันเป็นนิยามความลึกสมมูล คือ ความลึกของการไหลอย่างต่ำที่ทำให้เม็ดตะกอนที่มีเสถียรภาพต่อการกัดเซาะอันเนื่องมาจากแรงที่เกิดจากการไหล เมื่อดิวส์ทั้งหมดในชั้นนี้จะมีโอกาสถูกกัดเซาะได้ถ้าหากว่ามีศักยภาพในการพัดพาเพียงพอ ความหนาของชั้นที่มีการเคลื่อนไหวแทนด้วย  $D_{se}$  (ดูภาพประกอบ 31)

ความหนาสูงสุดของชั้นที่มีการเคลื่อนไหวจะไม่มีการตรวจสอบ ในระหว่างที่ทำการคำนวณในแต่ละช่วงของการคำนวณ ดังนั้นจึงมีความสำคัญที่จะต้องทำให้ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปไม่มีผลกระทบต่อตัวแปรทางชลศาสตร์ (ความเร็ว, ความลึก) มากนักจนมีผลต่อศักยภาพการพัดพาของตะกอน ผู้วิเคราะห์จะต้องตรวจสอบผลลัพธ์สำหรับแต่ละเงื่อนไขการไหล และปรับช่วงเวลาการคำนวณที่เหมาะสม ความหนาของชั้นที่มีการเคลื่อนไหวจะถูกตรวจสอบเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับให้สูงสุดคือ 2 ฟุต ตอนเริ่มต้นของแต่ละช่วงเวลาของการคำนวณ ทั้งนี้เหตุผลหลักเพื่อมิให้มีการตกตะกอนมากเกินไปในแต่ละช่วงการคำนวณซึ่งจะเป็นสาเหตุให้ลักษณะของตะกอนที่ตกวมกันผิดไปจากที่ควรจะเป็น



ภาพประกอบ ก-7 เส้นไขความลึกสมมูล



ภาพประกอบ ก-8 ส่วนประกอบของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว

### 2.3.1 ชั้นปกคลุมผิว (Cover Layer)

ในระหว่างที่มีการกัดเซาะ โปรแกรม HEC-6 จะมีการแบ่งชั้นที่มีการเคลื่อนไหวออกเป็น 2 ชั้นย่อย คือ ชั้นปกคลุมผิว (Cover Layer) และชั้นรองผิว (Sub-Surface Layer) ดังแสดงในภาพประกอบ ก-8 ซึ่งหลักการของชั้นปกคลุมผิวคือ ถ้าหากว่าการไหลแบบคงที่มีความต่อเนื่องเป็นระยะเวลาสั้นเพียงพอที่จะทำให้เกิดสมมูล ระหว่างชั้นที่มีการเคลื่อนไหวและความเข้มข้นของตะกอนในแม่น้ำที่พิจารณา ในระหว่างที่มีการปรับเข้าสู่สมมูลความเข้มข้นดังกล่าวเนื่องมาจาก การเคลื่อนย้ายของตะกอนที่มีขนาดเล็กกว่าจากผิวท้องน้ำ เพราะว่าอัตราการพัดพาตะกอนส่วนนี้จะมากกว่า เมื่อเทียบกับเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า ผลที่ตามมาคือจะเกิดมีชั้นของเม็ดวัสดุที่มีขนาดหยากกว่า ปกคลุมผิวหน้าของท้องน้ำ และทำตัวคล้ายกับเกราะป้องกันที่เคลื่อนที่ไปตามทิศทางกรไหล ป้องกันวัสดุที่มีความละเอียดกว่าที่อยู่ใต้ผิวของชั้นนี้ จากการถูกกัดเซาะ ถ้าหากว่าชั้นปกคลุมผิวนี้ถูกเพิ่มเติมโดยการตกตะกอน จากแม่น้ำที่พิจารณาเรื่อย ๆ เกราะป้องกันนี้ก็ยังคงอยู่ แต่ถ้าไม่มีการตกตะกอนเพิ่มเติม เกราะป้องกันอันนี้ก็เคลื่อนไปช้า ๆ ในทิศทางกรไหลของน้ำจนกระทั่ง ผิวของท้องน้ำ

ถูกเปิดออกจนเพียงพอให้แรงที่เกิดจากการไหล สัมผัสกับวัสดุเม็ดละเอียดของวัสดุท้องน้ำในชั้นรองผิวตามปกติต่อไป Harrison ได้ตั้งข้อสังเกตไว้ว่าชั้นด้านการกักเซาะจะเกิดขึ้นเมื่ออย่างน้อย 40 เปอร์เซ็นต์ ของผิวท้องน้ำถูกปกคลุมด้วยวัสดุเม็ดหยาบ

### 2.3.2 ชั้นรองผิว (Sub-Surface Layer)

ชั้นรองผิวประกอบด้วยตะกอนที่มีการผสมกันอย่างดี ซึ่งมาจากวัสดุในชั้นที่ไม่มี การเคลื่อนไหวยรวมกับตะกอนซึ่งตกตะกอนจากแหล่งน้ำจะเป็นชั้นที่ทำให้เกิดชั้นปกคลุมผิว และในขณะเดียวกันก็จะเป็นแหล่งตะกอนจากท้องน้ำเมื่อมีความต้องการที่จะเพิ่มให้ได้ตามความสามารถในการพัดพาตะกอนที่เงื่อนไขการไหลหนึ่งๆ เมื่อน้ำหนักของตะกอนในชั้นรองผิวนี้น้อยกว่าน้ำหนักที่ต้องการเพื่อที่จะปกคลุมให้เต็มผิวท้องน้ำโดยมีความหนาแน่นเท่ากับสองเท่าของเม็ดวัสดุที่ใหญ่ที่สุดที่มีการพัฒนา ชั้นรองผิวใหม่ก็จะถูกนำขึ้นมาจากชั้นที่ไม่มี การเคลื่อนไหว

### 2.3.3 อัตราการเพิ่มขึ้นที่มีการเคลื่อนไหว (Rate of Replenishing the Active Layer)

ในท้องน้ำที่มีผิวเป็นกรวดหรือหินก้อนใหญ่ ปกคลุมชั้นของวัสดุเม็ดละเอียด เรียกว่าอยู่ในสภาวะด้านการกักเซาะ เงื่อนไขอันนี้ไม่ได้ไปลดศักยภาพในการพัดพาตะกอนของลำน้ำ แต่ถูกจำกัดแหล่งที่มาของตะกอน ดังนั้นทฤษฎีการพัดพาตะกอนไม่สามารถใช้กับวัสดุที่มีความละเอียดกว่าวัสดุปกคลุมผิวหน้าได้ เพราะอัตราการเคลื่อนตัวถูกจำกัดด้วยเหตุผลดังกล่าวไม่ใช่กลศาสตร์ของการไหล ชั้นด้านการกักเซาะจะเกิดขึ้นเมื่อตะกอนเม็ดละเอียดถูกพัดพาไถด้วยอัตราเร็วกว่า อัตราการไหลทดแทนจากตะกอนที่ไหลเข้ามา กับน้ำ ทำให้ผิวของท้องน้ำมีแต่วัสดุเม็ดหยาบเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะป้องกันไม่ให้เกิดการกักเซาะอีกต่อไป

เสถียรภาพของชั้นด้านการกักเซาะอยู่บนพื้นฐานของฟังก์ชัน การกระจายความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Distribution Function) โดยมีอัตราส่วนระหว่างแรงเฉือนวิกฤติต่อแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริง เป็นตัวแปรอิสระ ซึ่งแรงเฉือนทั้งสองแสดงได้ในรูปสมการดังต่อไปนี้

$$\tau_c = 0.047 (\gamma_s - \gamma) d_m \quad (n-27)$$

$$\tau_b = \gamma \cdot EFD \cdot S_f \quad (n-28)$$

- โดยที่  $d_m$  = ค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุในชั้นขนาดที่พิจารณาเสถียรภาพ  
 $EFD$  = ความลึกประสิทธิผล  
 $S_f$  = ความลาดความเสียดทาน  
 $S_f \quad 0.47$  = ค่าจุดตัดบนแกน Y ตามสูตรของ Shields  
 $\gamma$  = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ  
 $\gamma_s$  = น้ำหนักจำเพาะของตะกอน  
 $\tau$  = แรงเฉือนท้องน้ำที่เกิดขึ้น

$\tau_c$  = แรงเฉือนวิกฤติตามข้อมูลจาก Meyer – Peter and Muller

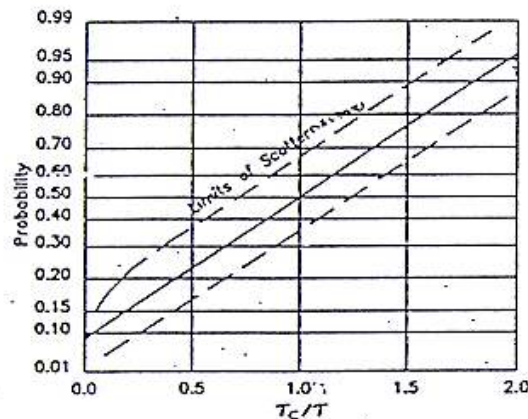
ความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็น ซึ่งเสนอโดย Gessler ดังแสดงในภาพประกอบ ก-9 ตามข้อเสนอของ Gessler เสถียรภาพของเม็ดตะกอนบนผิวของท้องน้ำเป็นความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นจากกราฟของ Shield สำหรับการเคลื่อนตัวของเม็ดตะกอนที่สอดคล้องกับอัตราส่วนของแรงเฉื่อย ( $\tau_c/\tau$ ) เท่ากับ 1 ดังในภาพประกอบ 33 นั้นจะมีความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.5 ในขณะที่แรงเฉื่อยที่เกิดขึ้นจริงเพิ่มขึ้นอัตราส่วน  $\tau_c/\tau$  จะลดลง ซึ่งส่งผลให้ความน่าจะเป็นที่เม็ดวัสดุนั้นจะมีเสถียรภาพลดต่ำลง แต่ทั้งนี้ก็ไม่อาจรับรองการเคลื่อนที่ของตะกอนได้หรือการที่อัตราส่วนของแรงมากกว่า 1 ก็ไม่อาจจะรับรองได้ว่าเม็ดวัสดุนั้นจะยังคงอยู่ที่เดิมในท้องน้ำ ความสัมพันธ์นี้ใช้คำนวณสัมประสิทธิ์เสถียรภาพของท้องน้ำ ซึ่งรวมการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ดังแสดงต่อไปนี้

$$BSF = \frac{\sum_{i=1}^{NGS} PROB.PI_i.d_{mi}}{\sum_{i=1}^{NGS} PROB.PI_i.d_{mi}} \quad (ก-29)$$

- โดยที่  $BSF$  = สัมประสิทธิ์ของเสถียรภาพท้องน้ำ  
 $d_{mi}$  = ขนาดเฉลี่ยปานกลางเส้นผ่าศูนย์กลางชั้นขนาดที่  $i$   
 $i$  = ชั้นขนาดที่ถูกวิเคราะห์  
 $NGS$  = จำนวนชั้นขนาดที่มี  
 $PI$  = อัตราส่วนของท้องน้ำที่ประกอบด้วยแต่ละชั้นขนาด  
 $PROB$  = ความน่าจะเป็นที่เม็ดวัสดุจะยังคงอยู่กับที่ในท้องน้ำ

จากการทำงานของ GESSLER เสนอให้ใช้สัมประสิทธิ์ของเสถียรภาพ เท่ากับ หรือมากกว่า 0.65 เป็นดัชนีบอกขั้นด้านการกัดเซาะมีเสถียรภาพภายใต้เงื่อนไขทางชลศาสตร์ที่กำหนดจะถูกลดกัดเซาะไปจากชั้นที่มีการเคลื่อนไหว โดยเหลือเม็ดวัสดุที่มีเสถียรภาพไว้จนกระทั่งมีปริมาณเพียงพอที่จะปกคลุมผิวท้องน้ำให้มีความหนาเท่ากับ 1 เท่า ของเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดวัสดุที่มีเสถียรภาพ ถ้าหากขั้นด้านการกัดเซาะนี้ไม่มีเสถียรภาพมันก็จะถูกทำลายไปตามเงื่อนไขชลศาสตร์ที่เปลี่ยนไปและชั้นที่มีการเคลื่อนไหวที่สมบูรณ์จะถูกคำนวณใหม่อีกครั้งหนึ่ง

ฟังก์ชันความน่าจะเป็นสามารถหาคำนวณปริมาณของขั้นด้านการกัดเซาะที่ถูกทำลายได้ซึ่งใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง โดยให้ปริมาณของขั้นด้านการกัดเซาะมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของเสถียรภาพ ดังนี้



ภาพประกอบ ก-9 ความน่าจะเป็นของเสถียรภาพเม็ดวัสดุ

$$SAE_{i+1} = 1.0 - \frac{BSF}{0.65} (1.0 - SAE_i) \quad (ก-30)$$

โดยที่  $i$  และ  $i+1$  หมายถึงที่เวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของช่วงการคำนวณ วัสดุจากชั้นที่มีการเคลื่อนไหวจะถูกเคลื่อนย้ายจนกระทั่งเหลือขนาดวัสดุที่มีเสถียรภาพมากพอที่จะปกคลุมผิวท้องน้ำที่เวลาสิ้นสุดช่วงการคำนวณ

## 2.4 การเคลื่อนตัวของตะกอน (Movement of Sediment)

### 2.4.1 การคำนวณอัตราส่วนคละของวัสดุท้องน้ำใหม่ (Bed Gradation Recompilations)

โปรแกรม HEC-6 จะแก้สมการเอกซ์เนอร์ สำหรับคิดความต่อเนื่องของวัสดุ ถ้าหากว่าความสามารถในการพัดพาตะกอนมีมากกว่าอัตราการไหลเข้าของตะกอน ปริมาณตะกอนจากท้องน้ำจะถูกเคลื่อนย้าย เพื่อให้สอดคล้องตามสมการต่อเนื่อง แต่เนื่องจากความสามารถในการพัดพาสำหรับขนาดตะกอนที่กำหนดขึ้นอยู่กับว่ามีตะกอนขนาดดังกล่าวเป็นองค์ประกอบของท้องน้ำเป็นอัตราส่วนเท่าไร จึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนวณอัตราส่วนของตะกอนขนาดต่างๆที่มีอยู่ในท้องน้ำใหม่บ่อยๆ ในขณะที่มีการแลกเปลี่ยนวัสดุเกิดขึ้นในท้องน้ำจำนวนครั้งที่ต้องคำนวณใหม่  $LTI$  สัมพันธ์กับระยะเวลาของการไหล, ความเร็ว และความยาวของช่วงที่พิจารณา ดังนี้

$$LTI = \frac{\text{ระยะเวลาการไหล} - \text{ความเร็วการไหล}}{\text{ความยาวของช่วงที่พิจารณา}} \quad (ก-31)$$

### 2.4.2 อัตราจำกัดคุณสมบัติของการผสมรวมกับน้ำ (Characteristic Rate of Entrapment)

อัตราจำกัดคุณสมบัติการผสมรวมกับน้ำจะมีความสัมพันธ์กับการไหลแบบปั่นป่วน แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองการไหลแบบอลวนอยู่นอกเหนือขอบเขตของโปรแกรมนี้ ด้วยเหตุที่ อัตราการไหลผสมรวมกับน้ำไม่ใช่ค่าที่ขณะใดขณะหนึ่ง ดังนั้นระยะทางการไหลจำกัดคุณสมบัติจึงถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้ประมาณอัตราการ



ผสมรวมกับน้ำโดยใช้ระยะทางที่ต้องการเพื่อทำให้ความเข้มข้นของตัวอย่างที่ทดสอบการไหลในรางน้ำเข้าสู่สมดุลง่าย ซึ่งระยะทางจำกัดคุณสมบัติสำหรับการผสมรวมกับน้ำถูกกำหนดให้เท่ากับ 30 เท่าของความลึกของการไหล อัตราส่วนการผสมรวมกับน้ำ (Entrapment Ratio);  $ENTRLR$  จะเกี่ยวเนื่องกับอัตราซึ่งการไหลเข้าสู่สภาวะที่มีความสมดุลของปริมาณตะกอน ซึ่งคำนวณได้โดยการหารระยะทางช่วงการไหลที่พิจารณาด้วยระยะทางจำกัดคุณสมบัติสำหรับการผสมรวมกับน้ำ

$$ENTRLR = \frac{\text{Reach Length}}{30 \cdot \text{Depth}} \quad (n-32)$$

สัมประสิทธิ์ของการผสมรวมกับน้ำ;  $ETCON$  แสดงในรูปสมการดังนี้

$$ETCON = 1.368 - e^{-ENTRLR} \quad (n-33)$$

โดยที่ค่า  $ETCON$  จะถูกใช้เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นต่อความเข้มข้นสมดุลง่าย (สำหรับแต่ละขนาดของเม็ดตะกอน) ของช่วงลำน้ำที่พิจารณา ซึ่งค่าสูงสุด = 1.0

#### 2.4.3 อัตราจำกัดคุณสมบัติสำหรับการตกตะกอน (Characteristic Rate for Deposition)

การตกตะกอนจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุมมากกว่าค่าความสามารถในการพัดพาตะกอน ซึ่งจะมีตะกอนเพียงบางขนาดเท่านั้นที่ตกตะกอน ดังนั้นการคำนวณอัตราการตกตะกอนจึงต้องแยกตามชั้นขนาดของเม็ดตะกอน อัตราการตกตะกอนจะถูกควบคุมด้วยความเร็วในการตกตะกอนของเม็ดวัสดุ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$DECAYZ(i) = \frac{V_s(i) \cdot DD}{D_s(i)} \quad (n-34)$$

โดยที่  $D_s(i)$  = ความลึกประสิทธิผลที่บรรจุตะกอนขนาด  $i$

$DD$  = ระยะเวลาของช่วงการคำนวณ

$V_s(i)$  = ความเร็วในการตกตะกอนสำหรับเม็ดตะกอนขนาด  $i$

#### 2.4.4 อิทธิพลของการต้านทานการกัดเซาะต่อความสามารถในการพัฒนา (Influence of Armoring on Transport Capacity)

ในแต่ละครั้งของการคำนวณแบบทำซ้ำจะวิเคราะห์การพัฒนาของตะกอนทุกขนาดและก่อนที่จะทำการคำนวณซ้ำในครั้งต่อไป จะมีการคำนวณพื้นที่ผิวของท้องน้ำที่เปิดเผยต่อการกัดเซาะ ในความสัมพันธ์ของ Einstein สัมประสิทธิ์การปกคลุมจะเป็นตัวปรับความสามารถในการพัดพาตะกอนอันเป็นผลของการต้านทาน

การกัดเซาะที่เกิดขึ้น สำหรับฟังก์ชันความสามารถในการพัดพาตะกอนของฟังก์ชันอื่น ๆ ความสามารถในการพัดพาตะกอนจะถูกแก้ไขตามผลของการต้านทานการกัดเซาะใช้ความสัมพันธ์แบบพาราโบลาดังนี้

$$FSAE = CSAE + (1.0 - CSAE) SAE^{BSAE} \quad (ก-35)$$

โดยที่  $BSAE$  = สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณการพัดพาตะกอน ภายใต้เงื่อนไขที่มีการต้านทานการกัดเซาะ

$CSAE$  = ความสามารถในการพัดพาตะกอนที่เพียงพอที่จะพัดพาตะกอนส่วนที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม

$FSAE$  = ความสามารถในการพัดพาตะกอน ปรับค่าเนื่องจากผลของการต้านทานการกัดเซาะ

ค่าของ  $CSAE$  เป็นส่วนของความสามารถในการพัดพาตะกอนที่เพียงพอ ในการพัดพาตะกอนส่วนที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุมให้ไหลผ่านไป โดยไม่เกิดการตกตะกอนในปริมาตรควบคุมสำหรับค่า  $BSAE$  ถ้าหากไม่มีการกำหนดโปรแกรมจะกำหนดโดยปริยายให้เท่ากับ 0.5

## 2.5 น้ำหนักจำเพาะของตะกอน (Unit Weight of Deposits)

2.5.1 น้ำหนักจำเพาะเริ่มต้น (Initial Unit Weight) น้ำหนักจำเพาะหมายถึงน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของตะกอน ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของน้ำหนักแห้ง

$$\gamma_s = (1 - P_d) \cdot SG \cdot \gamma \quad (ก-36)$$

โดยที่  $P_d$  = ความพรุนของตะกอน

$SG$  = ความถ่วงจำเพาะของอนุภาคตะกอน

$\gamma$  = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ

$\gamma_s$  = น้ำหนักจำเพาะของตะกอน

## 2.5.2 น้ำหนักจำเพาะผสมของตะกอน (Composite Unit Weight)

เมื่อมีการคิดคำนวณวัสดุที่เป็นส่วนผสมของอนุภาคหลายขนาด การคำนวณน้ำหนักจำเพาะผสมสามารถทำได้ โดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$\gamma_{sc} = \frac{1}{\left( \frac{F_{SA}}{\gamma_{SA}} + \frac{F_{SL}}{\gamma_{SL}} + \frac{F_{CL}}{\gamma_{CL}} \right)} \quad (ก-37)$$

โดยที่  $\gamma_{SC}$  = น้ำหนักจำเพาะผสมของตะกอน  
 $\gamma_{SA}, \gamma_{SL}, \gamma_{CL}$  = น้ำหนักจำเพาะของทราย, ตะกอนทราย และดินเหนียว ตาม  
 $F_{SA}, F_{SL}, F_{CL}$  = อัตราส่วนของทราย, ตะกอนทรายและดินเหนียวในตะกอนทั้งหมดตามลำดับ

### 2.5.3 น้ำหนักจำเพาะยวบตัว (Consolidated Unit Weight)

การอัดตัวของตะกอนที่ตกตะกอน เกิดจากอนุภาคของตะกอนมีการจัดเรียงตัวของมันเอง และการอัดไล่น้ำออกจากโพรงช่องว่าง สมการสำหรับคำนวณน้ำหนักจำเพาะยวบตัวดังแสดงต่อไปนี้

$$\gamma = \gamma_1 + B \cdot \log_{10} T \quad (ก-38)$$

โดยที่  $B$  = สัมประสิทธิ์ความยวบตัวของตะกอนทรายหรือดินเหนียว  
 $T$  = เวลาสะสมเป็นปี  
 $\gamma_1$  = น้ำหนักจำเพาะเริ่มต้นของตะกอนที่ตกตะกอน ปกติใช้น้ำหนักจำเพาะภายหลังจากการตกตะกอน 1 ปี

น้ำหนักจำเพาะยวบตัวเฉลี่ยที่ช่วงเวลา  $T$  สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตร ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Miller ดังนี้

$$\gamma_{ave} = \gamma_1 + B \left[ \frac{T}{T-1} \right] \log_{10} T - 0.434 B \quad (ก-39)$$

ซึ่งสูตรการคำนวณน้ำหนักจำเพาะนี้ ถูกใช้ในการแปลงน้ำหนักของตะกอนให้เป็นปริมาตรสำหรับคำนวณการเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ

### 2.6 คุณสมบัติของเม็ดตะกอน (Sediment Particle Properties)

คุณสมบัติ 4 อย่างของตะกอนที่มีความสำคัญในการทำนายการเคลื่อนตัวของตะกอน คือ ขนาด , แพลคเตอร์รูปร่าง , ความถ่วงจำเพาะ และความเร็วในการตกตะกอน การแบ่งชั้นขนาดของตะกอนที่กำหนดในโปรแกรม HEC-6 เป็นไปตามรายละเอียดในตาราง 16 ส่วนแพลคเตอร์รูปร่างกำหนดโดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$SF = \frac{c}{\sqrt{(a \cdot b)}} \quad (ก-40)$$

โดยที่  $a, b, c$  = ความยาวของด้านยาวที่สุด, ปานกลางและสั้นที่สุด ตามลำดับของแกนตั้งฉากกันของเม็ดตะกอน

แฟคเตอร์รูปร่างของเม็ดทรงกลมโดยสมบูรณ์เท่ากับ 1.0 และสามารถลดลงจนถึง 0.1 สำหรับอนุภาคที่มีความขรุขระมากๆ โปรแกรม HEC-6 จะกำหนดรูปร่างโดยปริยายเท่ากับ 0.667 แต่ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงค่าแฟคเตอร์เป็นอย่างอื่นได้

ความถ่วงจำเพาะของเม็ดตะกอนขึ้นอยู่กับแร่ธาตุ ที่ก่อให้เกิดเม็ดตะกอนนั้น ในลำน้ำธรรมชาติ วัสดุท้องน้ำส่วนใหญ่จะเป็นแร่ควอทซ์ ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 2.65 โปรแกรม HEC-6 จะกำหนดค่าความถ่วงจำเพาะโดยปริยายเป็น 2.65 แต่อย่างไรก็ตามผู้ใช้สามารถที่จะกำหนดความถ่วงจำเพาะของทราย, ตะกอนทรายและดินเหนียว ในข้อมูลป้อนเข้าได้

ความเร็วในการตกตะกอนในโปรแกรม HEC-6 จะมีให้เลือกคำนวณได้ 2 วิธี คือ

วิธีที่ 1 คำนวณความเร็วในการตกตะกอน โดยใช้สูตรที่เสนอโดย Toffaleti ซึ่งคล้ายคลึงกับวิธีของ Rubey ซึ่งวิธีนี้สมมุติแฟคเตอร์รูปร่างเท่ากับ 0.9

วิธีที่ 2 เป็นวิธีที่เสนอโดย Williams ซึ่งโปรแกรม HEC-6 จะกำหนดวิธีที่ 2 เป็นวิธีโดยปริยาย

## 2.7 ลำดับขั้นการคำนวณความลึกของการกัดเซาะ (Scour Depth Calculation Sequence)

การคำนวณความลึกของการกัดเซาะทำตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เซท ค่า  $D_{se}$  เริ่มต้นเป็นศูนย์
- 2) คำนวณความหนาของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว
- 3) คำนวณอัตราส่วนคละของตะกอนในชั้นที่มีการเคลื่อนไหว
- 4) แก๊สมการเอกซ์เนอร์ คำนวณการแลกเปลี่ยนวัสดุตะกอนระหว่างสนามการไหลและชั้นที่มีการเคลื่อนไหวในหน่วยตัน
- 5) ความเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในชั้นที่เคลื่อนไหว จะถูกแปลงเป็นปริมาตรและจะคำนวณการเปลี่ยนแปลงพิกัดของรูปตัดลำน้ำ หลังจากนั้นก็จะอ่านค่าข้อมูลการไหลจากชลภาพค่าถัดไป
- 6) คำนวณค่ารูปตัดตามยาวของระดับผิวน้ำใหม่รวมทั้งคำนวณค่าแรงทางชลศาสตร์ที่สอดคล้องกัน
- 7) คำนวณค่า  $D_{se}$  ใหม่
- 8) เมื่อทุกขนาดของตะกอนถูกพัดพาจนครบ ก็จะทำให้ภาวะเกราะป้องกันอย่างสมบูรณ์สำหรับเงื่อนไขชลศาสตร์นั้น
- 9) ถ้าค่า  $D_{se}$  ใหม่ มีค่ามากกว่า 0.0 จะถูกเปรียบเทียบกับค่าความลึกทั้งหมดของตะกอนสะสมท้องน้ำ ถ้าผลการเปรียบเทียบได้ว่า ปริมาณตะกอนที่สอดคล้องกับ  $D_{se}$  ที่คำนวณได้ต้องการมากกว่าปริมาณตะกอนที่มีอยู่ในตะกอนสะสมท้องน้ำค่า  $D_{se}$  ก็จะถูกเซทให้ลึกตามที่มีปริมาณตะกอนสะสมท้องน้ำทั้งหมด และโปรแกรมก็จะหมายเหตุให้ทราบ
- 10) ถ้าหากปริมาณตะกอนสะสมท้องน้ำมีเพียงพอค่า  $D_{se}$  จะถูกเปรียบเทียบกับความลึกของชั้นที่เคลื่อนไหวที่ยังคงมีอยู่ก่อนหน้านี้,  $D_{seold}$  ถ้าความแตกต่างของ  $(D_{se} - D_{seold})$  มีค่ามากกว่า 5 ฟุต น้ำหนักของตะกอนที่มีปริมาตรเทียบเท่ากับความหนา 5 ฟุต จะถูกนำย้อนกลับสู่ชั้นที่ไม่เคลื่อนไหว เหตุผลของการ

แลกเปลี่ยนนี้ เพื่อควบคุมองค์ประกอบความอ่อนไหวของท้องน้ำต่ออัตราส่วนคละของผิวท้องน้ำ เพราะว่าการคำนวณการพัดพาของตะกอนขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนคละของผิวท้องน้ำ

11) ถ้าความแตกต่างของ  $D_{seold}$  น้อยกว่า 5 ฟุต น้ำหนักเป้าหมายใหม่ของตะกอนจะถูกคำนวณสำหรับการแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นไม่เคลื่อนไหวกับชั้นที่เคลื่อนไหว ในการคำนวณลำดับต่อไป

## 2.8 การเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ (Bed Elevation Change)

เมื่อการกัดเซาะหรือการตกตะกอนเกิดขึ้น หลังจากผ่านไปหนึ่งช่วงเวลาการคำนวณโปรแกรม HEC-6 จะปรับค่าระดับท้องน้ำที่อยู่ในขอบเขตของท้องน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงของรูปตัด สำหรับการตกตะกอนท้องน้ำจะมีการเคลื่อนขึ้นในแนวตั้งเฉพาะในส่วนของการเคลื่อนที่ ซึ่งกำหนดในรหัสบันทึก H หรือ HD และอยู่ภายใต้ระดับน้ำ (ภายในเส้นขอบเปียก) การตกตะกอนอนุญาตให้เกิดขึ้นได้ ในส่วนที่อยู่นอกขอบเขตความสามารถต่อการไหล (Conveyance) ซึ่งกำหนดในรหัสบันทึก XL สำหรับการกัดเซาะจะยอมให้เกิดขึ้นเฉพาะในส่วนของการเคลื่อนที่ภายในขอบเขตของความสามารถต่อการไหล ภายในขอบเขตของการไหลประสิทธิผล (Effective flow) ซึ่งกำหนดในรหัสบันทึก  $X_s$  และอยู่ภายใต้ระดับน้ำเท่านั้น เมื่อปริมาณของการกัดเซาะหรือการตกตะกอนได้รับการคำนวณปริมาตรของความอ่อนไหวหรือการตกตะกอนจะถูกหารด้วยความกว้างประสิทธิผลและความยาวที่ควบคุมโดยรูปตัดนั้น จะได้ค่า  $Y_s$  ซึ่งเป็นค่าระดับท้องน้ำที่เปลี่ยนไปและโปรแกรมจะปรับค่าในแนวตั้งของพิกัดของรูปตัดลำน้ำใหม่

## 2.9 การพัดพาตะกอนทรายและดินเหนียว (silt and Clay Transport)

### 2.9.1 การตกตะกอนของตะกอนที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (Cohesive Sediment Deposition)

สมการสำหรับคำนวณการตกตะกอน ของตะกอนทราย และดินเหนียวด้วยวิธีที่ 2 ในโปรแกรม HEC-6 ได้จากการทดลองในรางน้ำ ที่อัตราการไหลต่ำ ๆ และความเข้มข้นของตะกอนแขวนลอย น้อยกว่า 300 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นดังนี้

$$\ln \frac{C}{C_o} = -k't \quad (ก-41)$$

$$\text{หรือ} \quad \frac{C}{C_o} = e^{(-k't)} \quad (ก-42)$$

โดยที่  $C$  = ความเข้มข้นของตะกอนที่จุดสิ้นสุดของช่วงเวลา  
 $C_o$  = ความเข้มข้นของตะกอนที่ตอนเริ่มต้นช่วงเวลา  
 $C_o D$  = ความลึกของน้ำ

$$K = \frac{V_s \cdot P_r}{2.3 D} \quad (ก-43)$$

$$P_r = \text{ความน่าจะเป็นที่ } 1 - (\tau_b / \tau_d)$$

$$P_r t = \text{เวลา} = \text{ความยาวช่วง} / \text{ความเร็วการไหล}$$

$$V_s = \text{ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคตะกอน}$$

$$\tau_b = \text{แรงเฉือนท้องน้ำ}$$

$$\tau_d = \text{แรงเฉือนท้องน้ำวิกฤติสำหรับการตกตะกอน}$$

อัตราส่วนที่ได้นี้คูณกับความเข้มข้นของตะกอนดินเหนียวหรือตะกอนทรายที่ไหลเข้า จะได้ค่าศักยภาพในการพัดพาของตะกอนดังกล่าวความเข้มข้นจะถูกแปลงเป็นปริมาตร และการตกตะกอนบนท้องน้ำ

## 2.9.2 การกัดเซาะของตะกอนที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (Cohesive Sediment Scour)

หลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์การกัดเซาะของตะกอนที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคได้จากการศึกษาของ Parthenaides (1965) และมีการปรับปรุงโดย Ariathurai (1973) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$C = \frac{M_1 \cdot S_a}{Q \cdot \gamma} \left[ \frac{\tau_b}{\tau_s} - 1 \right] + C_o \quad (\text{ก-44})$$

โดยที่  $C$  = ความเข้มข้นของตะกอนที่จุดสิ้นสุดของช่วงเวลา

$C_o$  = ความเข้มข้นของตะกอนเริ่มต้นของช่วงเวลา

$M_1$  = อัตราการกัดเซาะสำหรับการกัดเซาะอนุภาค

$Q$  = อัตราการไหลของน้ำ

$S_a$  = พื้นที่ผิวของท้องน้ำที่เปิดเผยต่อการกัดเซาะ

$\tau_b$  = แรงเฉือนท้องน้ำ

$\tau_s$  = แรงเฉือนวิกฤติ สำหรับการกัดเซาะอนุภาค

$\gamma$  = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ

ในขณะที่ค่าแรงเฉือนท้องน้ำเพิ่มสูงขึ้น การกัดเซาะอนุภาคอาจเปลี่ยนไปเป็นการกัดเซาะเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งจะให้อัตราการกัดเซาะสูงขึ้น เพราะว่าอัตราการกัดเซาะเป็นกลุ่มก้อนตามทฤษฎีแล้วสามารถเพิ่มขึ้นโดยไม่จำกัด ดังนั้น Ariathurai จึงแนะนำให้ใช้ “ช่วงเวลาจำกัดคุณสมบัติ” (Characteristic time);  $\Delta t$  กับระยะเวลาการคำนวณ  $DD$  จะได้สมการสำหรับคำนวณอัตราการกัดเซาะแบบเป็นกลุ่มก้อนดังนี้

$$C = \frac{M_2 \cdot S_a}{Q \cdot \gamma} \frac{\Delta t}{DD} + C_o \quad (\text{ก-45})$$

โดยที่  $DD$  = ระยะเวลาของช่วงการคำนวณ

$M_2$  = อัตราการกัดเซาะสำหรับการกัดเซาะเป็นกลุ่มก้อน

$T$  = เวลาจำกัดคุณสมบัติของการกัดเซาะ

Ariathurai ได้ให้คำแนะนำวิธีที่จะประมาณว่า  $t$ ,  $M_1$  และ  $M_2$  เนื่องจากขอบเขตของแรงเฉือนที่เริ่มการกัดเซาะและอัตราการกัดเซาะของตะกอนที่มีแรงยึดเหนี่ยวขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติเฉพาะของอนุภาคตะกอนและสภาวะคุณสมบัติของน้ำ เช่น แร่ธาตุที่ผสม, อัตราส่วนโซเดียม, ความจุในการเปลี่ยนแปลงประจุบวก,  $pH$ , ความเค็มและการตกตะกอนที่ผ่านมา ดังนั้นการทดสอบในสนามหรือในห้องทดลองจะเป็นวิธีที่ได้ค่า คุณสมบัติในการกัดเซาะดังกล่าวของตะกอนที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดตะกอน

## 2.10 ความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของตะกอน (Sediment Transport Relationship)

การเคลื่อนตัวของตะกอนในลำน้ำเป็นขบวนการที่มีความซับซ้อนซึ่ง นักวิจัยหลาย หลายท่านพยายามที่จะศึกษาค้นคว้าทฤษฎีเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของตะกอน แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของตะกอนยังอยู่ในรูปสมการที่ได้จากการสังเกตและทดลอง (Empirical) ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเคลื่อนตัวของตะกอนกับคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของการไหล คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุท้องน้ำและวัสดุตะกอนที่ไหลมากับน้ำโดยอาศัยการทดลองในห้องปฏิบัติการและการตรวจวัดข้อมูลสนามเป็นเครื่องมือช่วยในการปรับเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของตะกอนส่วนใหญ่เป็นการศึกษากรณีตะกอนที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดวัสดุ (Noncohesive Material) ดังนั้นความสัมพันธ์เหล่านี้จึงอาจไม่ถูกต้อง หากนำไปใช้กับกรณีของตะกอนเป็นดินเหนียวและตะกอนทราย (Silt) อันเป็นตะกอนที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดวัสดุ ซึ่งจะมีความซับซ้อนในขบวนการกัดเซาะและการตกตะกอนมากกว่า

ดังกล่าวแล้วว่าความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของตะกอนขึ้นอยู่กับสมมุติฐานและข้อมูลจากการทดลองและข้อมูลสนาม การเลือกฟังก์ชันการเคลื่อนตัวของตะกอนที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาถึงพื้นฐานที่มาของความสัมพันธ์และข้อมูลของพื้นที่ศึกษา ในโปรแกรม HEC-6 มีความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของตะกอนที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดตะกอนอยู่ 11 ความสัมพันธ์ ดังรายละเอียดในตาราง ก-1 นอกจากนี้โปรแกรมยังอนุญาตให้ผู้ใช้สามารถกำหนดความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวของตะกอนเองได้ ถ้าหากมีข้อมูลเพียงพอที่จะพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางกลศาสตร์และการเคลื่อนตัวของตะกอนตามขนาดของวัสดุ โดยที่การพัฒนาความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันดังต่อไปนี้

$$GP = \frac{(D.S_f - C)^B}{A} \quad (ก-46)$$

โดยที่  $D.S_f$  = ผลคูณของความลึกกับความลาด

$A, B, C$  = สัมประสิทธิ์การเคลื่อนตัวของตะกอนซึ่งพัฒนาขึ้นจากข้อมูลที่มีอยู่

$GP$  = ศักยภาพในการเคลื่อนตัวของตะกอน

เนื่องจากค่าศักยภาพในการเคลื่อนตัวของตะกอนจะมีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความเสียดทานในการไหลอยู่เสมอ เพื่อที่จะคิดผลกระทบดังกล่าวนี้ ค่าแฟคเตอร์ *STO* ถูกใช้เพื่อเป็นตัวคูณกับ *GP* เพื่อปรับค่าศักยภาพในการเคลื่อนตัวของตะกอน ซึ่งค่าของ *STO* อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ดังนี้

$$STO = 10^{-6} \cdot D \cdot n^E \quad (ก-47)$$

โดยที่  $D, E$  = สัมประสิทธิ์การเคลื่อนตัวของตะกอน ซึ่งพัฒนามาจากข้อมูลที่มีอยู่

$n$  = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning

$STO$  = แฟคเตอร์ใช้คูณปรับค่า *GP*

ตาราง ก-1 ตารางการแบ่งชั้นขนาดของอนุภาคตะกอนในโปรแกรม HEC-6

หมายเลขชั้นขนาดในโปรแกรม HEC-6	วัสดุตะกอน	เส้นผ่านศูนย์กลางของตะแกรง (มม.)	ค่าเฉลี่ย (มม.)
<u>ดินเหนียว</u>			
1	ดินเหนียว	0.002-0.004	0.0028
<u>ทรายแป้ง</u>			
1	ทรายแป้งละเอียดมาก	0.004-0.008	0.006
2	ทรายแป้งละเอียด	0.008-0.016	0.011
3	ทรายแป้งขนาดปานกลาง	0.016-0.032	0.022
4	ทรายแป้งหยาบ	0.032-0.0625	0.044
<u>ทรายและกรวด</u>			
1	ทรายละเอียดมาก (VFS)	0.0625-0.125	0.088
2	ทรายละเอียด (FS)	0.125-0.250	0.177
3	ทรายขนาดปานกลาง (MS)	0.250-0.500	0.354
4	ทรายหยาบ (CS)	0.500-1.000	0.707
5	ทรายหยาบมาก (VCS)	1.000-2.000	1.414
6	กรวดละเอียดมาก (VFG)	2.000-4.000	2.828
7	กรวดละเอียด (FG)	4.000-8.000	5.657
8	กรวดขนาดปานกลาง (MG)	8.000-16.000	11.314
9	กรวดหยาบ (CG)	16.000-32.000	22.627
10	กรวดหยาบมาก (VCG)	32.000-64.000	45.255

ที่มา : HEC-6 Scour and Deposition in River and Reservoir, Users Manual, 1993

ที่มา : The Hydrologic Engineering Center, 1993.



ตาราง ก-2 ความสัมพันธ์สำหรับคำนวณการเคลื่อนตัวของตะกอนในโปรแกรม HEC-6

ลำดับ	ความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของตะกอน	หลักการที่มา	ชนิดความสัมพันธ์	ขนาดตะกอนที่เหมาะสม
1	Toffaleti Method (1969)	Shear Stress Approach	Bed-load Formula	0.12-0.93
2	ฟังก์ชันซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดเองได้	-	-	
3	Madden's (1963) Modification of Laursen's (1958) Relationship**			
4	Yang's Streampower (1973)	Power Approach	Bed-Material load Formula	0.006-2.00
5	Dubois (Brown, 1950)	Shear Stress Approach	Bed-load Formula	
6	Einstein	Shear Stress Approach	Bed-load Formula	> 3.00
7	Ackers-White (1973)	Power Approach	Bed-Material load Formula	0.04-4.00
8	Colby (1964)	Parametric Approach	Bed-Material load Formula	0.10-1.00
9	Toffaleti and Schoklitsch.	Shear Stress Approach	Bed-load Formula	0.12-5.00
10	Meyer-Peter and Muller (1948)	Shear Stress Approach	Bed-load Formula	6.4-30.00
11	**ไม่ใช้	-	-	
12	Toffaleti (1969) Meyer-Peter and Muller (1948) Combination	Shear Stress Approach	Bed-load Formula	0.12-30.00
13	Madden's (1985) Modification of Laursen's (1958) Relationship**			
14	Laursen-Copeland**			

หมายเหตุ \*\* ไม่มีข้อมูล

ที่มา : Howard, H.C, Fluvial Processes in River Engineering, 1988.

ที่มา : The Hydrologic Engineering Center, 1993.