



หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาเกี่ยวกับการกัดเซาะ และการตกตะกอนในลำน้ำและอ่างเก็บน้ำ เป็นการศึกษาดังกล่าวถึงสมการเคลื่อนตัวของตะกอนในลำน้ำ วัสดุตะกอนท้องน้ำ และชลศาสตร์การไหลในลำน้ำ ทฤษฎีเกี่ยวกับการไหล และการเคลื่อนตัวของตะกอนที่เข้ามาเกี่ยวข้องขึ้นอยู่กับสมมติฐาน และเงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษา สำหรับการศึกษานี้ใช้โปรแกรม HEC-6 ซึ่งเป็นโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบบมิติเดียวของการไหลแบบคงที่ (One Dimensional Steady State) สำหรับวิเคราะห์แนวโน้มการกัดเซาะและการตกตะกอน ตามแนวรูปตัดตามยาว ของลำน้ำและอ่างเก็บน้ำ โดยการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมของน้ำกับตะกอน ตะกอนท้องน้ำ และชลศาสตร์การไหลให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยมีโครงสร้างของแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 3-1 ซึ่งในขั้นตอนของแบบจำลองจะเกี่ยวข้องกับทฤษฎีต่าง ๆ ดังจะได้กล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป

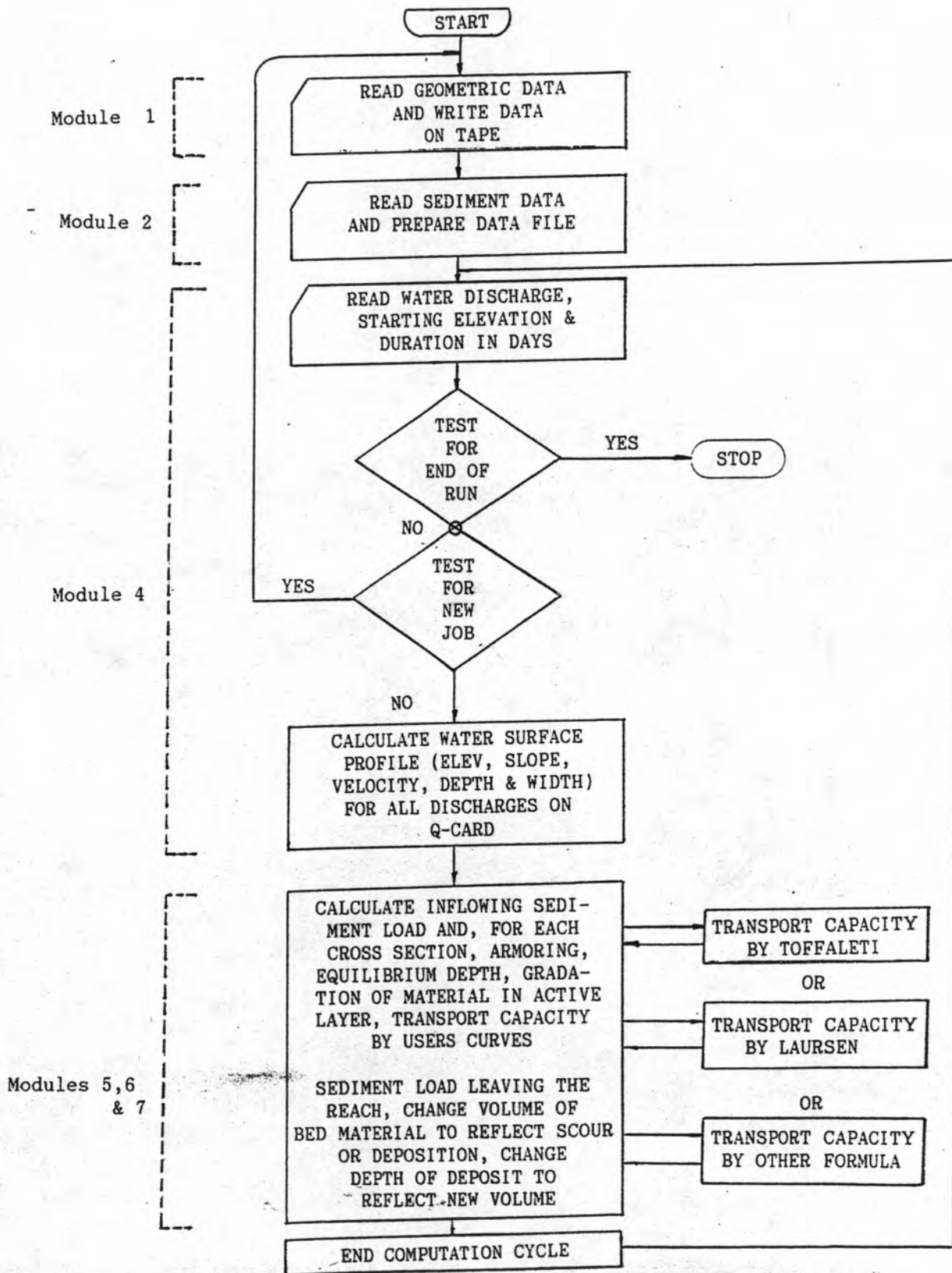
3.1 ทฤษฎีทางด้านชลศาสตร์

3.1.1 สมการพลังงาน ในการศึกษานี้ใช้สมการพลังงาน 1 มิติ ในการคำนวณ รูปตัดตามยาวของระดับน้ำ (Water Surface Profile) โดยใช้วิธีขั้นตอนมาตรฐาน (Standard Step Method) ในการวิเคราะห์สมการพลังงาน การคำนวณความสูญเสียพลังงาน (Head Loss) เนื่องจากความเสียดทานใช้สมการของ Manning ส่วนความสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของรูปตัดขวางลำน้ำ ใช้สัมประสิทธิ์ของความสูญเสียพลังงานซึ่งเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละรูปตัด และในแต่ละรูปตัดก็เปลี่ยนไปตามอัตราการไหลหรือระดับของการไหล

รูปแบบของสมการพลังงาน 1 มิติเป็นดังนี้ (ดูรูปที่ 3-2)

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_o \dots \dots \dots (3-1)$$

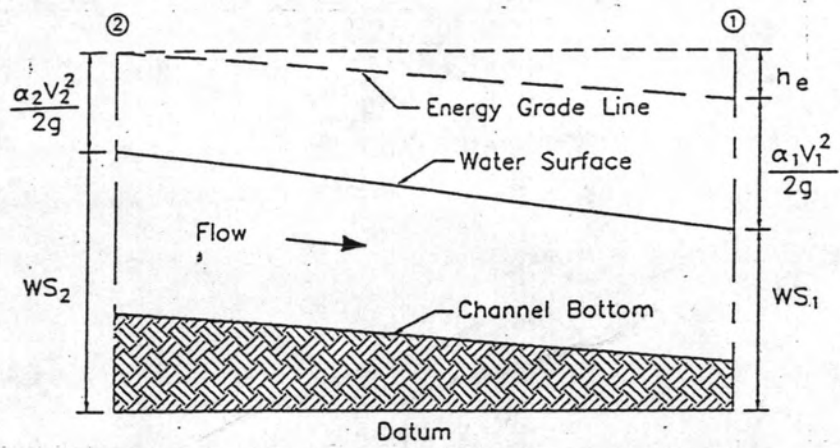
โดยที่ :  $g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก  
 $h_o$  = หัวพลังงานที่สูญเสีย



รูปที่ 3-1 โครงสร้างลำดับการทำงานของโปรแกรม HEC-6

ที่มา : HEC-6 Scour and Sepsition in River and Reservoirs, Users

Manual, 1977.



รูปที่ 3-2 แสดงรายละเอียดของเทอมต่าง ๆ ในสมการพลังงาน

$V_1, V_2$  = ความเร็วเฉลี่ย (อัตราการไหลทั้งหมดหารพื้นที่หน้าตัดการไหลทั้งหมด)

$WS_1, WS_2$  = ระดับผิวน้ำ

$\alpha_1, \alpha_2$  = สัมประสิทธิ์การกระจายความเร็วของการไหล

3.1.2 สมการคำนวณค่าความสูญเสียทางด้านชลศาสตร์ (Hydraulic Losses)

จากสมการพลังงานเทอมความสูญเสียพลังงาน;  $h_o$  เป็นความสูญเสียพลังงานที่เกิดจากความเสียดทาน (Friction Loss) และความสูญเสียพลังงานเนื่องจากรูปร่างของท้องน้ำ (Form Loss)

$$h_o = h_f + h_o \dots \dots \dots (3-2)$$

โดยที่ :  $h_f$  = ความสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทาน

$h_o$  = ความสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

ในการประมาณการกระจายการไหลทางด้านรูปตัดขวางของลำน้ำ จะแบ่งหน้าตัดของลำน้ำออกเป็นส่วนย่อย (Sub Section) โดยในแต่ละส่วนให้มีคุณสมบัติทางด้านชลศาสตร์ใกล้เคียงกัน ดังนั้นสมการความสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานจึงอยู่ในรูปดังนี้

$$h_f = (Q/K')^2 \dots \dots \dots (3-3)$$

โดยที่ 
$$K' = \sum_{j=1}^J \left[ \frac{1.49}{n_j} \right] \frac{(A_2 + A_1)_j \left[ \frac{R_2 + R_1}{2} \right]_j^{2/3}}{L_j^{1/2}} \dots \dots (3-4)$$

โดยที่ :  $A_1, A_2$  = พื้นที่หน้าตัดในทิศทางตั้งฉากกับการไหลของลำน้ำทางด้านท้ายน้ำและเหนือน้ำ ตามลำดับ

$J$  = จำนวนส่วนย่อยของพื้นที่หน้าตัด (sub section) ทั้งหมด

$L_j$  = ระยะระหว่างส่วนย่อยของพื้นที่หน้าตัดที่

$n$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของ Manning

$Q$  = อัตราการไหลของน้ำ

$R_1, R_2$  = รัศมีชลศาสตร์ทางด้านท้ายน้ำและทางด้านเหนือน้ำตามลำดับ

ความสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เป็นการคำนวณความสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการแคบเข้า และการผายออกของหน้าตัดลำน้ำ โดยใช้สมการดังนี้

$$h_o = C_L \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \dots\dots\dots (3-5)$$

โดยที่ :  $C_L$  = สัมประสิทธิ์ความสูญเสียพลังงาน เนื่องจากการแคบเข้าหรือการผายออกของหน้าตัดลำน้ำ

ถ้าค่าภายในเครื่องหมายสัมบูรณ์ เป็นลบ แสดงถึงการไหลที่แคบเข้า ค่า  $C_L$  ที่ใช้ก็ต้องเป็นสัมประสิทธิ์ความสูญเสียพลังงานเนื่องจากการแคบเข้า ถ้าค่าภายในเครื่องหมายสัมบูรณ์เป็นบวก แสดงว่าการไหลผ่านหน้าตัดที่ผายออก ค่า  $C_L$  ที่ใช้ก็ต้องเป็นสัมประสิทธิ์ของความสูญเสียพลังงานเนื่องจากการผายออก

เป็นที่น่าสังเกตว่า ค่าความสูญเสียพลังงาน อยู่รูปตัวแปรเพียง 2 ตัวคือ  $h_f$  และ  $h_o$  ดังนั้นค่า  $h_f$  จึงเป็นค่าความสูญเสียพลังงานเนื่องจากความเสียดทานที่รวมเอาผลเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ คือ

- ความขรุขระของรูปร่างท้องน้ำ (Form Roughness of the Movable Bed)
- ความไม่สม่ำเสมอของตลิ่ง (Bank Irregularities)
- พืชผักที่ขึ้นในลำน้ำ (Vegetation)
- ความโค้ง และการไหลรวมกันของลำน้ำ (Bend Losses and Junction Loss)



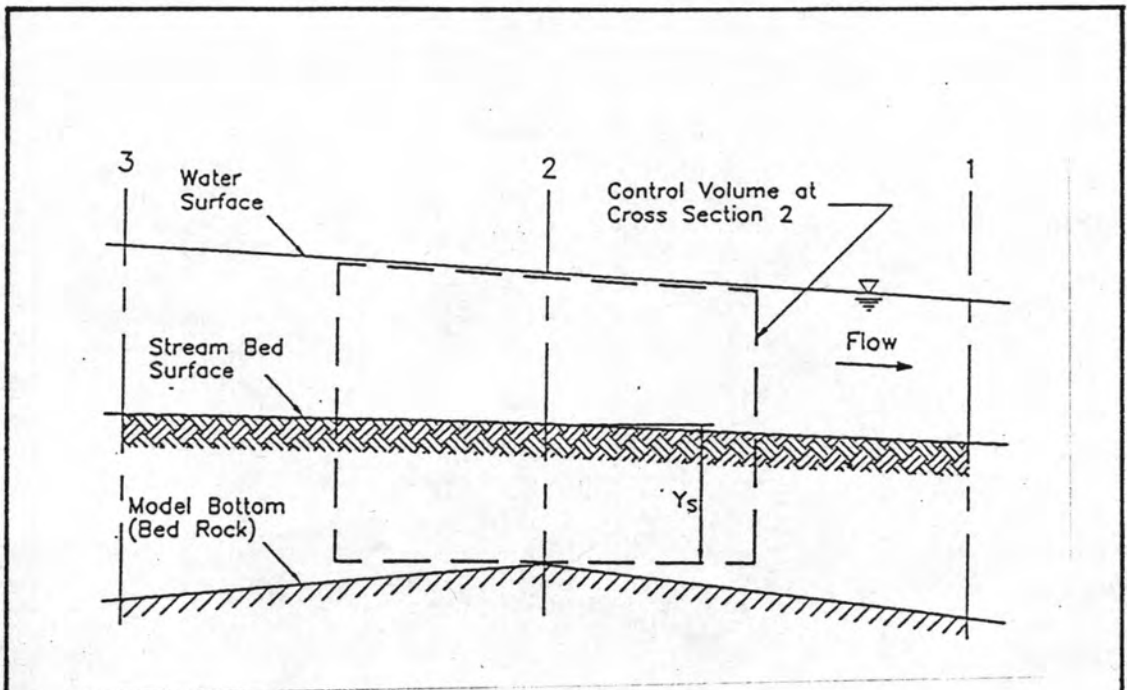
โดยจะรวมผลความสูญเสียพลังงานเนื่องจากสาเหตุเหล่านี้ไว้ในสัมประสิทธิ์ ความสูญเสียพลังงานของ Manning (n)

### 3.2 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการคำนวณเกี่ยวกับตะกอน

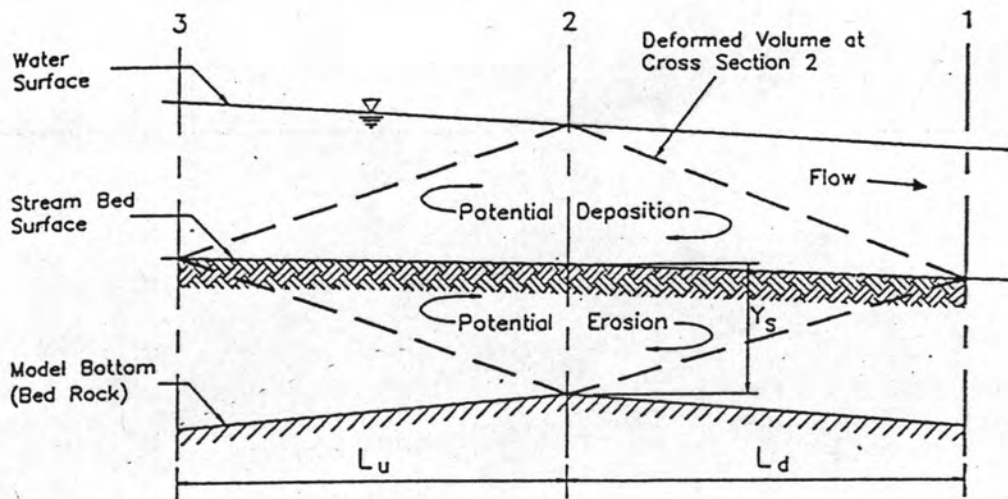
ความสามารถที่จะพัดพาตะกอนของรูปตัดขวางจะถูกคำนวณในแต่ละช่วงเวลาของการคำนวณ (Time Interval) ศักยภาพในการพัดพาตะกอน (Transport Potential) จะถูกคำนวณสำหรับแต่ละชั้นขนาดของเม็ดวัสดุท้องน้ำ โดยถือเสมือนว่าท้องน้ำประกอบด้วยวัสดุที่มีชั้นขนาดนั้น 100 เปอร์เซ็นต์ คุณศักยภาพในการพัดพาตะกอนด้วยอัตราส่วนของแต่ละชั้นขนาดที่เป็นส่วนประกอบของวัสดุท้องน้ำ ซึ่งจะได้ความสามารถที่จะพัดพาตะกอนของแต่ละชั้นขนาด ซึ่งอัตราส่วนของแต่ละชั้นขนาดนี้จะเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างช่วงเวลาการคำนวณดังนั้นเทคนิคในการทำซ้ำๆ จึงถูกใช้เพื่อที่จะนำเอาผลของการเปลี่ยนแปลงนี้ไปปรับความสามารถในการพัดพาตะกอน ปัจจัยเบื้องต้นที่ควบคุมอัตราการกัดเซาะคือความหนาของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว (Active Layer) และปริมาณผิวท้องน้ำที่ต้านทานต่อการกัดเซาะได้ (Armored) ชั้นที่มีการเคลื่อนไหว หมายถึงชั้นของวัสดุระหว่างผิวของท้องน้ำกับชั้นสมมุติ ซึ่งลึกจากผิวท้องน้ำจนถึงระดับที่ไม่มีการเคลื่อนตัวของตะกอน ในเงื่อนไขของการกระจายขนาดเม็ดวัสดุท้องน้ำและเงื่อนไขการไหลที่กำหนด ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป ความหนาของชั้นที่มีการเคลื่อนไหวจะถูกคำนวณตอนเริ่มต้นของช่วงเวลาการคำนวณปริมาณของผิวท้องน้ำที่ต้านทานการกัดเซาะได้ จะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว ที่จะถูกเคลื่อนย้ายโดยการกัดเซาะ หลักการที่ใช้ในการปรับระดับของท้องน้ำตามการกัดเซาะหรือการตกตะกอนที่เกิดขึ้นคือ สมการของ เอกซ์เนอร์ (Exner Equation) เสถียรภาพของชั้นต้านทานการกัดเซาะยึดตามหลักการของ Gessler

#### 3.2.1 สมการสำหรับความต่อเนื่องของวัสดุตะกอน

3.2.1.1 ปริมาตรควบคุม (Control Volume) ในแต่ละรูปตัดขวางจะมีการกำหนดปริมาตรควบคุมโดยที่ความกว้างของปริมาตรควบคุมให้เท่ากับความกว้างของท้องน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลง และความลึกของปริมาตรควบคุมวัดจากผิวน้ำถึงชั้นหินแข็งหรือชั้นควบคุมทางธรณีวิทยาอื่น ๆ ภายใต้อ่างน้ำที่ต้านทานการกัดเซาะ ในกรณีพื้นที่ ๆ ไม่มีชั้นหินแข็ง จะมีการกำหนดชั้นฐานของแบบจำลอง (Model Bottom) และจะไม่มีกรกัดเซาะลึกกว่าชั้นนี้ จากรูปที่ 3-3 จากรูปที่ 3-3 ปริมาตรควบคุมในรูปตัดขวางที่ 2 คือส่วนที่แสดงด้วยเส้นประส่วนปริมาตรควบคุมสำหรับรูปตัดขวางที่ 1 และ 3 จะต่อกับปริมาตร ควบคุมของรูปตัดที่ 2



รูปที่ 3-3 แสดงกำหนดปริมาณควบคุม



รูปที่ 3-4 แสดงปริมาณควบคุมที่มีการตัดแปลง



สมการความต่อเนื่องของตะกอนจะเขียนครอบคลุม ปริมาตรควบคุมนี้ แต่สมการพลังงานจะเขียนขึ้นระหว่างรูปตัดขวาง โดยใช้ค่าเฉลี่ยพื้นที่หน้าตัดที่ตำแหน่งรูปตัดขวาง แต่เนื่องจากทั้งความต่อเนื่องของมวลสาร และพลังงาน ควรจะครอบคลุมในส่วนเดียวกัน ดังนั้นรูปร่างของ ปริมาตรควบคุมจึงมีการดัดแปลงดังแสดงใน รูปที่ 3-4 ปริมาตรของตะกอนในท้องน้ำ โดยใช้ค่าเฉลี่ยพื้นที่ที่ปลายช่วงประมาณได้ตามสูตรดังนี้

$$V_{sed} = B_o \cdot Y_s \cdot \frac{L_u + L_d}{2} \dots\dots\dots (3-6)$$

โดยที่  $B_o$  = ความกว้างของท้องน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลง

$L_u, L_d$  = ความยาวช่วงระหว่างรูปตัดขวางลำน้ำทางด้านเหนือน้ำ และท้ายน้ำของรูปตัดขวางที่พิจารณา ตามลำดับ

$V_{sed}$  = ปริมาตรของตะกอนในปริมาตรควบคุม

$Y_s$  = ความลึกของตะกอนในปริมาตรควบคุม

สำหรับความลึกของน้ำเท่ากับ  $D$  ปริมาตรของน้ำในแท่งน้ำ (Water Column) ประมาณได้ตามสูตรดังนี้

$$V_f = B_o \cdot D \cdot \frac{L_u + L_d}{2} \dots\dots\dots (3-7)$$

$B_o$  และ  $D$  เป็นตัวแปรทางชลศาสตร์ แทนความกว้างและความลึกซึ่งคำนวณโดยใช้ค่าเฉลี่ย ในช่วงเดียวกับที่ใช้ในการแก้สมการพลังงาน ตามที่ได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.1.1

3.2.1.2 สมการเอกซ์เนอร์ (Exner Equation) รูปร่างทางกายภาพที่ได้บรรยายถึงข้างต้นนี้ ถูกแปลงให้อยู่ในรูป กระบวนการคำนวณทางคณิตศาสตร์ หลักการที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของท้องน้ำคือสมการความต่อเนื่องของวัสดุตะกอน เรียกว่าสมการเอกซ์เนอร์ ซึ่งมีรูปแบบของสมการดังนี้



$$\frac{\partial G}{\partial x} + B_0 \cdot \frac{\partial Y_s}{\partial (DD)} = 0 \dots\dots\dots (3-8)$$

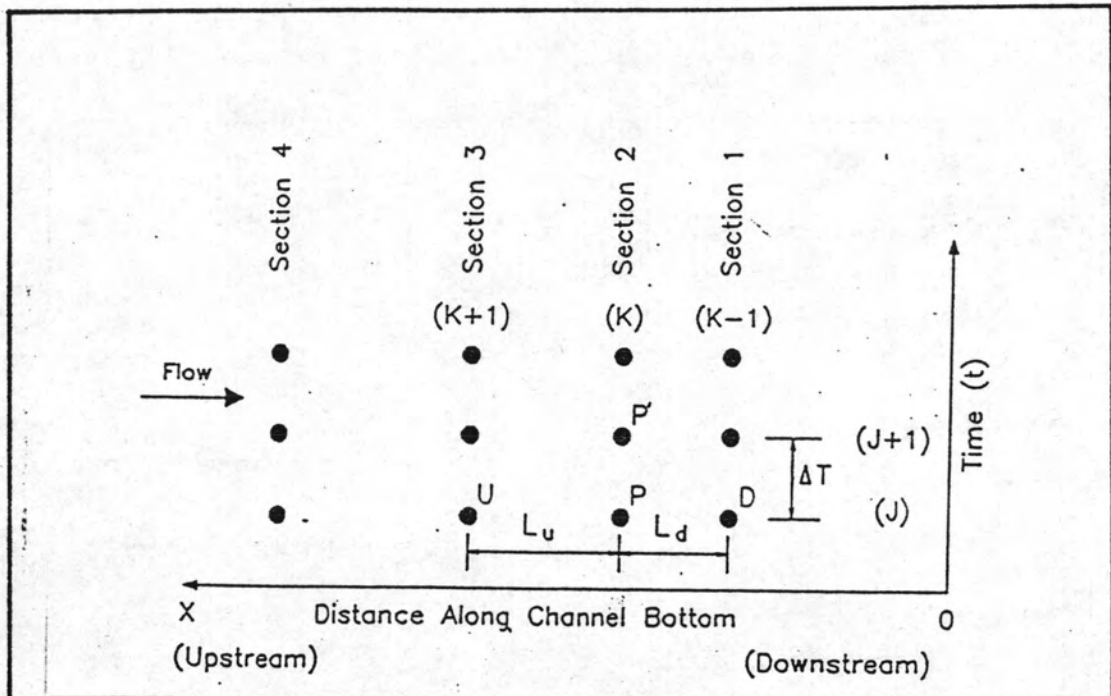
- โดยที่ :  $B_0$  = ความกว้างของท้องน้ำที่มีการเคลื่อนที่ (Movable Bed)
- $DD$  = ระยะเวลาในแต่ละช่วงของการคำนวณ
- $G$  = อัตราการไหลของตะกอน
- $x$  = ระยะทางตามแนวลำน้ำ
- $Y_s$  = ความหนาของชั้นตะกอนในปริมาตรควบคุม

จากสมการสามารถแสดงในรูปของไฟไนต์ ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite Difference) สำหรับจุด P ดังแสดงในรูปที่ 3-5

$$\frac{G_u - G_d}{0.5 (L_d + L_u)} + \frac{B_{sp} (Y'_{sp} - Y_{sp})}{DD} = 0 \dots\dots\dots (3-9)$$

$$Y'_{sp} = Y_{sp} - \frac{DD}{(0.5) B_{sp}} \cdot \frac{G_u - G_d}{L_d + L_u} \dots\dots\dots (3-10)$$

- โดยที่ :  $B_{sp}$  = ความกว้างท้องน้ำที่เคลื่อนที่ ที่จุด P
- $G_u, G_d$  = อัตราการไหลของตะกอนที่หน้าตัดด้านเหนือน้ำ และด้านท้ายน้ำ ตามลำดับ
- $L_u, L_d$  = ระยะระหว่างหน้าตัดด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ วัดจากจุด P ตามลำดับ
- $Y_{sp}, Y'_{sp}$  = ความหนาของชั้นตะกอนที่จุด P ก่อนและหลังช่วงเวลาที่คำนวณ
- 0.5 = เป็นแฟคเตอร์ถ่วงน้ำหนักระยะ ระหว่างหน้าตัดด้านเหนือน้ำและท้ายน้ำ



รูปที่ 3-5 แสดงรูปแบบของการคำนวณ

ความหนาเริ่มต้นของวัสดุท้องน้ำที่จุด  $P$  แทนด้วยค่าเริ่มต้น  $Y_{up}$  อัตราการไหลของตะกอน;  $G_u$  คือปริมาณตะกอนโดยอัตราส่วนคละที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุมทางด้านเหนือน้ำสำหรับช่วงเหนือสุดของการศึกษา ปริมาณการไหลนี้จะป้อนเข้าการไหลที่ขอบเขตด้านเหนือน้ำซึ่งจะเป็นข้อมูลที่จำเป็นต้องป้อนเข้า ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนที่ไหลออกจากปริมาตรควบคุม;  $G_d$  จะเป็นค่า;  $G_u$  ของปริมาตรควบคุมถัดไปทางท้ายน้ำ

ค่าอัตราการไหลของตะกอนทางด้านท้ายน้ำ;  $G_d$  จะถูกคำนวณโดยพิจารณาความสามารถในการพัดพาตะกอนที่จุด  $P$ , ปริมาณการไหลเข้าของตะกอน, วัสดุท้องน้ำที่มีอยู่เดิม และส่วนที่ด้านการกัดเซาะ ค่าความแตกต่างระหว่าง  $G_u$  และ  $G_d$  คือปริมาณของตะกอนที่ตกตะกอนหรือถูกกัดเซาะในช่วงระหว่างจุด  $D$  และจุด  $U$  ในช่วงเวลาที่คำนวณแต่ละครั้ง (Time Step) และค่านี้จะถูกแปลงไปเป็นความเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ (สมการที่ 3-10)

ตามที่แสดงในรูปที่ 3-5 ความสามารถในการพัดพาตะกอนจะถูกคำนวณที่ค่าระดับท้องน้ำตอนเริ่มต้นของช่วงเวลาคำนวณ และจะไม่มีค่าคำนวณซ้ำในระหว่างช่วงเวลาคำนวณ ดังนั้นจึงมีความสำคัญในการกำหนด ช่วงเวลาของการคำนวณ ให้สั้นพอที่จะไม่ทำให้การเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำมีผลมากนักต่อความสามารถในการพัดพาตะกอนในตอนปลายของช่วงของการคำนวณซึ่งในกรณีที่อัตราการไหลมาก ๆ ระยะเวลาที่เหมาะสม ในแต่ละช่วงของการคำนวณ อาจจะเป็นเศษส่วนของวัน ในขณะที่ระยะเวลาที่เหมาะสมในกรณีอัตราการไหลต่ำ ๆ อาจจะเป็นหลายวันหรือเป็นเดือน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำในแต่ละช่วงเวลาของการคำนวณควรอยู่ในช่วงประมาณไม่เกิน 1 ฟุต หรือประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของความลึกของน้ำ โดยใช้ค่าที่น้อยกว่า แต่สำหรับ อัตราส่วนคละของวัสดุตะกอนท้องน้ำ จะมีการคำนวณใหม่ในระหว่างช่วงเวลาของการคำนวณ ทั้งนี้เพราะค่าความสามารถในการพัดพาตะกอน จะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนคละของวัสดุท้องน้ำ (ดูหัวข้อ 3.2.4.1)

### 3.2.2 การกำหนดชั้นที่มีการเคลื่อนไหวและชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหว

(Determination of the Active and Inactive Layer)

โปรแกรม HEC-6 ได้กำหนดหลักการของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว และชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหว โดยสมมติให้ชั้นที่มีการเคลื่อนไหว หมายถึง ชั้นที่มีการผสมกันอย่างต่อเนื่องกับการไหลแต่อาจจะมีชั้นของผิวที่มีการเคลื่อนตัวของเม็ดวัสดุเป็นเกราะป้องกันวัสดุที่มีความละเอียดกว่าจากการผสมกับน้ำ มีการสมมติให้มี 2 กระบวนการที่แตกต่างกันขึ้น คือ

- 1) การผสมกันจะเกิดขึ้นระหว่างวัสดุตะกอนท้องน้ำ กับ ส่วนผสมของน้ำและตะกอน เนื่องจากพลังงานในการเคลื่อนตัวของน้ำ
- 2) การผสมจะเกิดขึ้นระหว่างชั้นที่มีการเคลื่อนไหว และชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหว เนื่องมาจากการผิตรีรูปแบบไปของผิวท้องน้ำ

กลไกในการผสมกันเกิดขึ้นเนื่องมาจากการไหลแบบอลวน และความเสียดทานท้องน้ำ ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนตัวของน้ำ ความลึกของชั้นที่มีการผสมกัน สามารถแสดงได้ด้วยฟังก์ชันของความเข้มของการไหล (อัตราการไหลหนึ่งหน่วย), ความลาดของเส้นพลังงาน, และขนาดของเม็ดวัสดุ ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.2.2.1 ความลึกสมดุลย์ (Equilibrium Depth) เงื่อนไขทางชลศาสตร์อย่างต่ำที่จะทำให้เม็ดวัสดุขนาดที่กำหนดไม่เกิดการเคลื่อนที่ไปบนผิวของท้องน้ำ สามารถคำนวณได้โดยการรวมสูตรของ Manning, Stricklers, และ Einstein เข้าด้วยกัน ดังนี้คือ

$$V = \frac{1.49}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \dots\dots\dots (3-11)$$

$$n = \frac{d^{1/6}}{29.3} \dots\dots\dots (3-12)$$

$$\psi = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \cdot \frac{d}{DS_f} \dots\dots\dots (3-13)$$

โดยที่ : d = เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดวัสดุ

D = ความลึกของน้ำ

V = ความเร็วของน้ำ

$\rho_s$  = ความหนาแน่นของเม็ดวัสดุ

$\rho_f$  = ความหนาแน่นของน้ำ

$\psi$  = ความเข้มของการเคลื่อนตัวของตะกอน จากฝั่งชั้นตะกอนตื้น  
น้ำของ Einstein

$S_f$  = ความลาดของความเสียหาย

ในกรณีไม่มีการเคลื่อนตัวของตะกอน ค่า  $\psi$  มีค่าเท่ากับ 30 หรือมากกว่า โดยการแก้สมการ 3-13 ในเทอมของ  $S_f$  สำหรับความถ่วงจำเพาะของทราย 2.65 และกำหนดค่า  $\psi$  เท่ากับ 30 จะได้

$$S_f = \frac{d}{18.18 D} \dots\dots\dots (3-14)$$

รวมสมการที่ได้กับสมการของ Manning และ Strickler โดยแทนค่า R ด้วย D และคูณความเร็วด้วยความลึกจะได้อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง

$$q = 10.21 \cdot D^{7/6} \cdot d^{1/3} \dots\dots\dots (3-15)$$

โดยที่  $q$  = อัตราการไหลของน้ำต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของการไหล

ดังนั้นจะได้ความลึกสมตลย์สำหรับขนาดเม็ดวัสดุ และอัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วย ความกว้างที่กำหนดให้ ดังสมการต่อไปนี้

$$D_c = D = \left[ \frac{q}{10.21 d^{1/3}} \right]^{6/7} \dots\dots\dots (3-16)$$

โดยที่  $D_c$  = ความลึกต่ำสุดของน้ำที่ไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของตะกอน (ความลึกสมตลย์) สำหรับขนาดเม็ดตะกอนเท่ากับ d



3.2.2.2 ความลึกของการกัดเซาะ และการต้านการกัดเซาะ  
(Scour Depth and Armoring)

โดยที่วัสดุท้องน้ำ เป็นส่วนผสมของเม็ดวัสดุขนาดต่าง ๆ ความลึกของการกัดเซาะหาได้โดยการรวมปริมาณของเม็ดวัสดุหยาบจนมีปริมาณมากพอที่จะต้านการกัดเซาะท้องน้ำ ซึ่งคำนวณได้โดยการคูณจำนวนของเม็ดวัสดุด้วยพื้นที่ผิวที่ได้รับการป้องกันการกัดเซาะจากวัสดุแต่ละเม็ด จะเท่ากับพื้นที่ผิวทั้งหมด (SA) ของแท่งแนวตั้งของวัสดุท้องน้ำที่พิจารณา ดังรายละเอียดในรูปที่ 3-6 และสมการ 3-17 และ 3-18

$$SA = N \left[ \frac{\pi d^2}{4} \right] \dots\dots\dots (3-17)$$

$$N = \frac{SA}{\left[ \frac{\pi d^2}{4} \right]} \dots\dots\dots (3-18)$$

โดยที่ N = จำนวนของเม็ดวัสดุบนผิวท้องน้ำ

$$SA = \text{พื้นที่ผิวท้องน้ำ}$$

พื้นที่ผิวบางส่วนของแต่ละแท่ง อาจมีเกราะป้องกันการกัดเซาะเนื่องมาจากหินที่ไหลผ่านท้องน้ำ หรือชั้นต้านทานการกัดเซาะ ทำให้พื้นที่ผิวที่มีศักยภาพที่จะถูกการกัดเซาะน้อยกว่าพื้นที่ผิวทั้งหมดของแต่ละแท่ง ซึ่งจะลดจำนวนของเม็ดวัสดุที่เปิดเผชิญต่อการกัดเซาะดังสมการ

$$N = \frac{SA \cdot SAE}{\left[ \frac{\pi d^2}{4} \right]} \dots\dots\dots (3-19)$$

โดยที่ SAE = อัตราส่วนพื้นที่ผิวที่มีศักยภาพในการกัดเซาะต่อพื้นที่ผิวทั้งหมด

สมมติว่าวัสดุท้องน้ำเป็นส่วนผสมของเม็ดวัสดุขนาดต่างกัน ความลึกของการกัดเซาะจะต้องทำให้เกิดปริมาตรของเม็ดวัสดุที่สามารถต้านการกัดเซาะเพียงพอที่จะปกคลุมผิวของท้องน้ำได้เต็มทั้งหมดโดยมีความหนาเท่ากับ 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดวัสดุ ตามแสดงในสมการ (3-20) และ (3-21)

$$V_{\dots} = SA \cdot D_{\dots} \dots\dots\dots (3-20)$$

$$V_{so} = PC \cdot SA \cdot D_{so} = N \frac{\pi d_a^3}{6} \dots\dots\dots (3-21)$$

โดยที่  $d_u$  = ขนาดเล็กที่สุดของเม็ดวัสดุในชั้นด้านการกัดเซาะ

$D_{so}$  = ความลึกของวัสดุท้องน้ำที่จะถูกพัดพาไปเพื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลในช่วงเวลาการคำนวณ

PC = เปอร์เซนต์ของเม็ดวัสดุที่ใหญ่กว่า  $d_u$

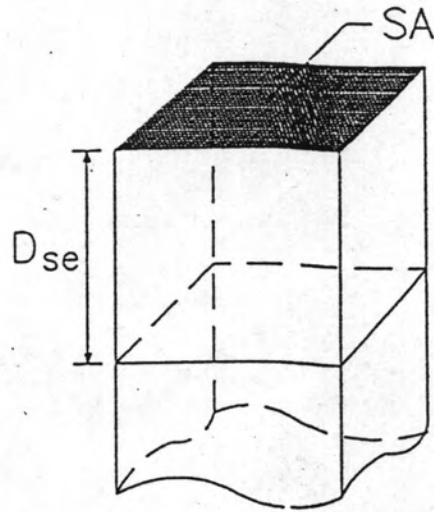
$V_{so}$  = ปริมาตรของวัสดุท้องน้ำ ซึ่งถูกพัดพาไป ก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะสมดุลย์ในแต่ละช่วงเวลาของการคำนวณ

รวมสมการสำหรับพื้นที่ผิว และปริมาตรเข้าด้วยกัน จะ ได้ความลึกของการกัดเซาะที่ทำให้เกิดชั้นด้านการกัดเซาะเต็มพื้นที่ผิวท้องน้ำ ดังนี้

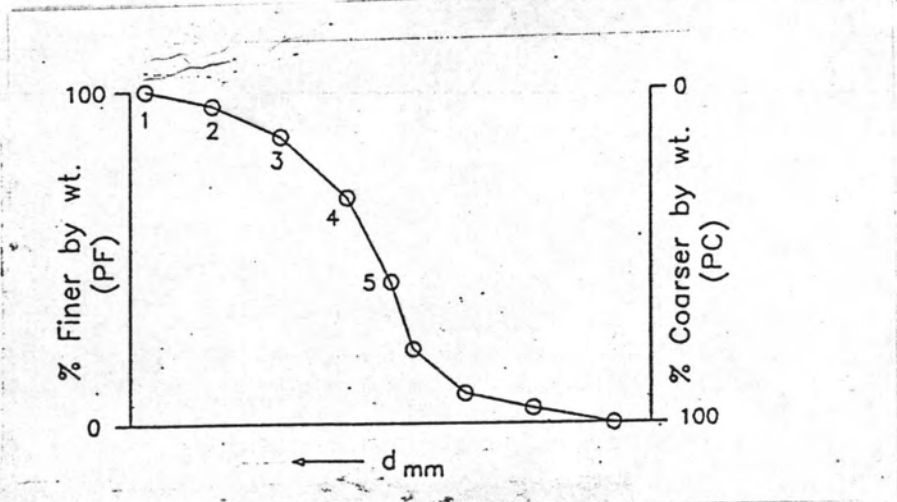
$$D_{so} = \left[ \frac{SA \cdot SAE}{(\pi d^2/4)} \right] \cdot \left[ \frac{(\pi d^3/6)}{PC \cdot SA} \right] \\ = \left( \frac{2}{3} \right) \left[ \frac{SAE \cdot d}{PC} \right] \dots\dots\dots (3-22)$$

สมการที่ได้นี้ใช้ร่วมกับสมการที่ (3-16) เพื่อใช้คำนวณความลึกสมดุลย์สำหรับส่วนผสมของเม็ดวัสดุขนาดต่าง ๆ การกำหนดค่า PC ที่จะใช้ในสมการที่ (3-22) นั้น ทำโดยการแบ่งโค้งอัตราส่วนคละของวัสดุท้องน้ำออกเป็นส่วนย่อยของเส้นตรงที่เหมาะสม โดยการประมาณความสัมพันธ์ระหว่าง  $d$  และ PC (โค้งอัตราส่วนคละ) ซึ่งจะเป็นอนุกรมของเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 3-7

ขั้นตอนที่หนึ่ง ในการกำหนดตำแหน่งส่วนของเส้นตรงที่เหมาะสมบน โค้งอัตราส่วนคละคือ จำนวนความลึกสมดุลย์  $D1_{su}$  และ  $D2_{su}$  สำหรับขนาดเม็ดวัสดุที่จุด 1 และ 2 ตามลำดับ โดยการใชสมการ (3-16) ถ้าหากว่าค่าความลึกที่แท้จริง;  $D_{AL}$  น้อยกว่า  $D2_{su}$  เส้นตรงที่เชื่อมระหว่างจุด 1 และ 2 ตามรูปที่ 3-7 จะเป็นตัวกำหนดฟังก์ชันความสัมพันธ์ที่ต้องการ และความลึกสมดุลย์ จะถูกคำนวณในที่สุด ถ้า  $D_{AL}$  มากกว่า ความลึกสมดุลย์ สำหรับขนาดเม็ดวัสดุที่จุด 2 การคำนวณจะเลื่อนตาม โค้งอัตราส่วนคละลงมาที่ส่วนของเส้นตรงระหว่างจุด 2 และจุด 3, ระหว่างจุด 3 และจุด 4, เรื่อยไปจนกระทั่งทุกส่วนย่อยของเส้นตรงผ่านการพิจารณาหรือเม็ดวัสดุที่เล็กที่สุดเพียงพอที่จะต้านการกัดเซาะท้องน้ำ ซึ่งในกรณีนี้การกัดเซาะจะไม่เกิดขึ้น



รูปที่ 3-6 รูปตัดแท่ง ในแนวตั้งของวัสดุท้องน้ำซึ่งมีพื้นที่ผิว SA



รูปที่ 3-7 โค้งอัตราส่วนเคลของวัสดุท้องน้ำ สำหรับคำนวณความลึกสมดุลย์

การสร้างความสัมพันธ์ของการกัดเซาะและความลึกสมมูล ต้องพิจารณาเงื่อนไขสองอย่างดังรายละเอียดในรูปที่ 3-8 เงื่อนไขที่ 1 เมื่อ  $D_{AL}$  คือความลึกจริงของการไหล อยู่ระหว่าง  $D1_{eq}$  และ  $D2_{eq}$  (ซึ่งตรงกับความสัมพันธ์สำหรับจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ในรูปที่ 3-7)

$$D_{eq} = D_{AL} + D_{so} \quad \dots\dots\dots (3-23)$$

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

$$D_{eq} = D1_{eq} + D_{so} \quad \dots\dots\dots (3-24)$$

รูปแบบทั่วไปของสมการคือ

$$D_{eq} = D_u + D_{so} \quad \dots\dots\dots (3-25)$$

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

เทคนิคสำหรับการคำนวณ  $D_{eq}$  สำหรับส่วนผสมของเม็ดวัสดุหลายขนาด คือ ชั้นแรกทำการคำนวณ  $D_{so}$  สำหรับ  $D2_{eq}$  โดยใช้สมการ 3-17 ถึงสมการ 3-22  $D_{so}$  ที่ได้ถูกใช้ในการคำนวณค่า  $V_{so}$  เพื่อเช็คจำนวนของขนาดเม็ดวัสดุที่มีเสถียรภาพว่าเพียงพอที่จะปกคลุมผิวของท้องน้ำได้หมดหรือไม่ ถ้าหากไม่เพียงพอค่า  $D2_{eq}$  ก็จะถูกเพิ่มขึ้นครั้งละเล็กน้อยจนกระทั่งได้ค่า  $D_{so}$  ที่ทำให้ปริมาตรของวัสดุท้องน้ำมีจำนวนของเม็ดวัสดุที่มีเสถียรภาพเพียงพอที่จะปกคลุมผิวท้องน้ำได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่จุดนี้  $D2_{eq}$  จะเท่ากับ  $D_{eq}$

โปรแกรม HEC-6 กำหนดโซนของวัสดุระหว่าง ผิวของท้องน้ำถึงระดับความลึกสมมูล เป็นชั้นที่มีการเคลื่อนไหว (Active Layer) และโซนจากระดับความลึกสมมูลถึงชั้นฐานของแบบจำลอง เป็นชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหว (Inactive Layer) ในชั้นที่มีการเคลื่อนไหวนี้จะเป็นแหล่งของวัสดุของผิวท้องน้ำ ในชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหวอัตราส่วนเคลของวัสดุเหมือนกับแหล่งที่มาคือท้องน้ำ การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเคลเกิดขึ้นขณะที่มีการตกตะกอนบนชั้นที่มีการเคลื่อนไหว และจะมีการแลกเปลี่ยนขนาดเคลกับชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหว ชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหวเป็นตะกอนสะสมท้องน้ำเม็ดวัสดุจะมีการเคลื่อนที่จากชั้นหนึ่งไปอีกชั้นหนึ่ง ในขณะที่ ความหนาของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว เปลี่ยนไปเนื่องจาก การเปลี่ยนความลึก, ความเร็ว และความลาด ของการไหล



ของน้ำ มีเพียงวัสดุในชั้นที่มีการเคลื่อนไหวเท่านั้นที่มีการกัดเซาะ โปรแกรม HEC-6 จะมีการคำนวณอัตราส่วนเคลือบใหม่ ในระหว่างที่ทำการการคำนวณสมการเอ็กซ์เนอร์ ในแต่ละช่วงเวลาของการคำนวณ เมื่อวัสดุทั้งหมดถูกเคลื่อนย้ายไปจากชั้นที่มีการเคลื่อนไหวจนหมด ท่อน้ำก็จะเข้าสู่สภาวะที่ต้านการกัดเซาะ โดยสมบูรณ์ หลักการของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว และชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหว ตูรายละเอียดในหัวข้อ 3.2.3

อัตราการเกิดสภาวะต้านทานต่อการกัดเซาะจะสอดคล้องกับปริมาณของวัสดุที่ถูกเคลื่อนย้ายและพื้นที่ผิวท่อน้ำที่มีการกัดเซาะ; SA อัตราส่วนของพื้นที่ที่มีศักยภาพในการกัดเซาะ; SAE อาจหาได้ดังนี้

$$SAE = \frac{VOL_A}{VOL_{SE}} \dots\dots\dots (3-26)$$

โดยที่ VOL<sub>A</sub> = ปริมาตรที่ไหลในชั้นที่มีการเคลื่อนไหว

VOL<sub>SE</sub> = ปริมาตรทั้งหมดของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว

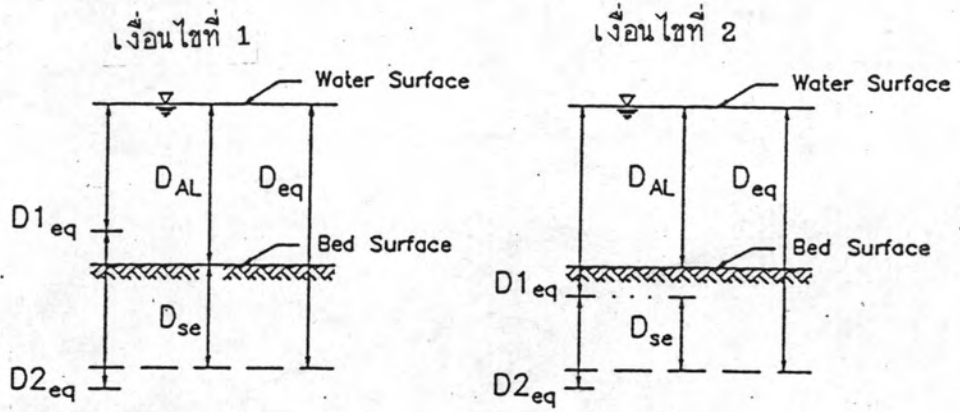
การชะล้างเม็ดวัสดุที่มีความละเอียดจากใต้ผิวของท่อน้ำ จะถูกป้องกันโดยการปรับค่า SAE ถ้าขนาดเม็ดวัสดุท่อน้ำเล็กกว่าขนาดเม็ดวัสดุที่ต้านการกัดเซาะความสามารถในการพัฒนาตะกอนจะลดลงเป็นกราฟเส้นตรง จนเป็นศูนย์เมื่อเมื่อ SAE ลดลงจนถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ของพื้นที่ผิวทั้งหมด หลังจากนั้นจะมีเพียงตะกอนไหลเข้าขนาดดังกล่าวและเล็กกว่า ที่ถูกพัฒนาผ่านช่วงที่พิจารณา

### 3.2.3 ส่วนประกอบของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว

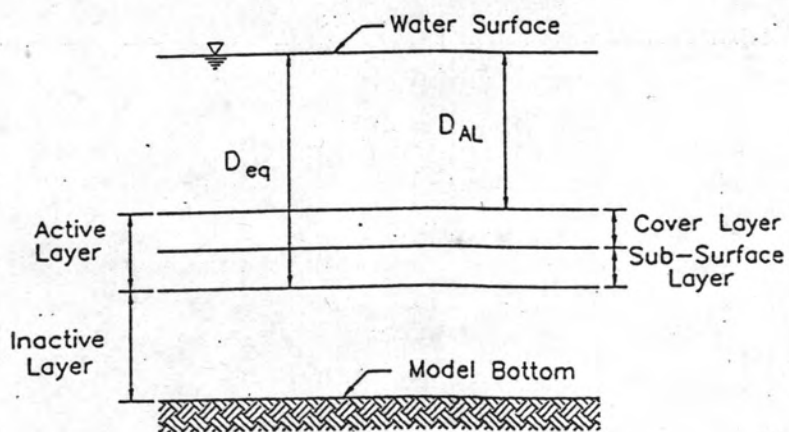
(Composition of The Active Layer)

ความหนาของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว ถูกคำนวณโดยการให้เท่ากันระหว่างความต้านทานของเม็ดตะกอนท่อน้ำ กับแรงที่กระทำต่อเม็ดวัสดุ เนื่องมาจากการไหลของน้ำ (ดูหัวข้อ 3.2.2.1) อันเป็นนิยามของความลึกลับคือความลึกของการไหลอย่างต่ำที่ทำให้เม็ดตะกอนมีเสถียรภาพต่อการกัดเซาะอันเนื่องมาจากแรงที่เกิดจากการไหล เม็ดวัสดุทั้งหมดในชั้นนี้จะมีโอกาสถูกกัดเซาะได้ถ้าหากว่ามีศักยภาพในการพัฒนาเพียงพอ ความหนาของชั้นที่มีการเคลื่อนไหวแทนด้วย D<sub>50</sub> (ดูรูปที่ 3-8 )





รูปที่ 3-8 เงื่อนไขความลึกสมตลย์



รูปที่ 3-9 ส่วนประกอบของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว

ความหนาสูงสุดของชั้นที่มีการเคลื่อนไหวยังจะไม่มีการตรวจสอบ ในระหว่างที่ทำการคำนวณในแต่ละช่วงของการคำนวณ ดังนั้นจึงมีความสำคัญที่จะต้องทำให้ความหนาที่เปลี่ยนแปลงไปไม่มีผลกระทบต่อตัวแปรทางศาสตร์ (ความเร็ว, ความลึก) มากนักจนมีผลต่อศักยภาพการพัดพาของตะกอน ผู้วิเคราะห์จะต้องตรวจสอบผลลัพท์สำหรับแต่ละเงื่อนไขการไหล และปรับช่วงเวลาการคำนวณให้เหมาะสม ความหนาของชั้นที่มีการเคลื่อนไหวยังจะถูกตรวจสอบเปรียบเทียบกับค่าที่ยอมรับให้สูงสุดคือ 2 ฟุต ตอนเริ่มต้นของแต่ละช่วงเวลา ของการคำนวณ ทั้งนี้เหตุผลหลักเพื่อป้องกันไม่ให้มีการตกตะกอนมากเกินไปในแต่ละช่วงการคำนวณซึ่งจะเป็นสาเหตุให้ ลักษณะของตะกอนที่ตกกรวมกันผิดไปจากที่ควรจะเป็น

### 3.2.3.1 ชั้นปกคลุมผิว (Cover Layer)

ในระหว่างที่มีการกัดเซาะ โปรแกรม HEC-6 จะแบ่งชั้นที่มีการเคลื่อนไหวยออกเป็น 2 ชั้นย่อย คือชั้นปกคลุมผิว (Cover Layer) และชั้นรองผิว (Sub - Surface Layer) ดังแสดงในรูปที่ 3-9 ซึ่งหลักการของชั้นปกคลุมผิวคือ ถ้าหากว่า การไหลแบบคงที่มีความต่อเนื่องเป็นระยะเวลาสั้นเพียงพอที่จะทำให้เกิดสมดุลง่าย ระหว่างชั้นที่มีการเคลื่อนไหวยและความเข้มข้นของตะกอน ในพื้นที่ที่พิจารณา ในระหว่างที่มีการปรับเข้าสู่สมดุลง่าย ความเข้มข้นของตะกอนเม็ดละเอียดคือ ทรายละเอียดและตะกอนทราย (Silt) จะลดลง โดยที่ศักยภาพในการพัดพาตะกอนขนาดดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลง การลดลงของความเข้มข้นดังกล่าวเนื่องมาจาก การเคลื่อนย้ายของตะกอนที่มีขนาดเล็กกว่าจากผิวท้องน้ำ เพราะว่าอัตราการผลิตตะกอนส่วนนี้จะมากกว่า เมื่อเทียบกับเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่า ผลที่ตามมาคือจะเกิดมีชั้นของเม็ดวัสดุที่มีขนาดหยาบกว่า ปกคลุมผิวของท้องน้ำมากขึ้น และทำตัวคล้ายกับเกราะป้องกันที่เคลื่อนที่ไปตามทิศทางการไหล ป้องกันวัสดุที่มีความละเอียดกว่าที่อยู่ใต้ผิวของชั้นนี้ จากการถูกกัดเซาะ ถ้าหากว่าชั้นปกคลุมผิวนี้ถูกเพิ่มเติมโดยการตกตะกอน จากพื้นที่ที่พิจารณาเรื่อย ๆ เกราะป้องกันนี้จะยังคงอยู่ แต่ถ้าไม่มีการตกตะกอนเพิ่มเติม เกราะป้องกันอันนี้จะเคลื่อนไปช้า ๆ ในทิศทางการไหลของน้ำจนกระทั่ง ผิวของท้องน้ำถูกเปิดออกจนเพียงพอให้แรงที่เกิดจากการไหล สัมผัสกับวัสดุเม็ดละเอียดของวัสดุท้องน้ำในชั้นรองผิวตามปกติต่อไป Harrison ได้ตั้งข้อสังเกตไว้ว่าชั้นด้านการกัดเซาะจะเกิดขึ้นเมื่ออย่างน้อย 40 เปอร์เซ็นต์ ของผิวท้องน้ำถูกปกคลุมด้วยวัสดุเม็ดหยาบ

### 3.2.3.2 ชั้นรองผิว (Sub-Surface Layer)

ชั้นรองผิวประกอบด้วยตะกอนที่มีการผสมกันอย่างดี ซึ่งมาจากวัสดุในชั้นที่ไม่มีการเคลื่อนไหวยรวมกับตะกอนซึ่งตกตะกอนจากพื้นที่น้ำจะเป็นชั้นที่ทำให้เกิดชั้นปกคลุมผิว

และในขณะเดียวกันก็จะเป็นแหล่งตะกอนจากท้องน้ำเมื่อมีความต้องการที่จะเพิ่มให้ได้ตามความสามารถในการพัฒนาตะกอนที่เงื่อนไขการไหลหนึ่ง ๆ เมื่อน้ำหนักของตะกอน ในชั้นรองผิวนี้้น้อยกว่าน้ำหนักที่ต้องการเพื่อที่จะปกคลุม ให้เต็มผิวท้องน้ำ โดยมีความหนาเท่ากับสอง เท่าของ เม็ดวัสดุที่ใหญ่ที่สุดที่มีการพัฒนา ชั้นรองผิวใหม่ก็จะถูกนำขึ้นมาจากชั้นที่ไม่มีมีการเคลื่อนไหว

3.2.3.3 อัตราการเพิ่มเติมชั้นที่มีการเคลื่อนไหว

(Rate of Replenishing the Active Layer)

ในท้องน้ำซึ่งมีผิวเป็นกรวดหรือหินก้อนใหญ่ ปกคลุมบนชั้นของวัสดุเม็ดละเอียด เรียกว่าอยู่ในสภาวะต้านการกัดเซาะ เงื่อนไขอันนี้ไม่ได้ไปลดศักยภาพในการพัฒนาตะกอนของลำน้ำ แต่ถูกจำกัดแหล่งที่มาของตะกอนดังนั้นทฤษฎีการพัฒนาตะกอนไม่สามารถใช้กับวัสดุที่มีความละเอียดกว่าวัสดุปกคลุมผิวหน้าได้ เพราะอัตราการเคลื่อนตัวถูกจำกัดด้วยเหตุผลดังกล่าวไม่ใช่ศาสตร์ของการไหล ชั้นต้านทานการกัดเซาะจะเกิดขึ้นเมื่อตะกอนเม็ดละเอียดถูกพัดพาไปด้วยอัตราเร็วกว่า อัตราการตกทดแทนจากตะกอนที่ไหลเข้ามาทับน้ำ ทำให้ผิวของท้องน้ำมีแต่วัสดุเม็ดหยาบเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะป้องกัน ไม่ให้เกิดการกัดเซาะอีกต่อไป

เสถียรภาพของชั้นต้านทานการกัดเซาะอยู่บนพื้นฐานของฟังก์ชัน การกระจายความน่าจะเป็นแบบปกติ (Normal Probability Distribution Function) โดยมีอัตราส่วนระหว่างแรงเฉือนวิกฤตต่อแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริง เป็นตัวแปรอิสระ ซึ่งแรงเฉือนทั้งสองแสดงได้ในรูปสมการดังต่อไปนี้

$\tau_c = 0.047 (\gamma_s - \gamma) d_m \dots\dots\dots (3-27)$

$\tau_b = \gamma \cdot EFD \cdot S_f \dots\dots\dots (3-28)$

โดยที่ :  $d_m$  = ค่าเฉลี่ยปานกลาง เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุในชั้นขนาดที่พิจารณาเสถียรภาพ

$EFD$  = ความลึกประสิทธิภาพ

$S_f$  = ความลาดความเสียดทาน

0.047 = ค่าจุดตัดบนแกน Y ตามสูตรของ Shields

$\gamma$  = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ

$\gamma_s$  = น้ำหนักจำเพาะของเม็ดตะกอน

$\tau_b$  = แรงเฉือนที่ท้องน้ำที่เกิดขึ้น

$\tau_c$  = แรงเฉือนวิกฤติตามข้อมูลจาก Meyer - Peter and Muller

ความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็น ซึ่งเสนอโดย Gessler ดังแสดงในรูปที่ 3-10 ตามข้อเสนองของ Gessler เสถียรภาพของเม็ดตะกอนบนผิวของท้องน้ำเป็นความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็น จากกราฟของ Shield สำหรับการเคลื่อนตัวของเม็ดตะกอนที่สอดคล้องกับอัตราส่วนของแรงเฉือน ( $\tau_c/\tau$ ) เท่ากับ 1 ดังในรูปที่ 3-10 นั้นจะมีความน่าจะเป็นเท่ากับ 0.5 ในขณะที่แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจริงเพิ่มขึ้นอัตราส่วน  $\tau_c/\tau$  จะลดลง ซึ่งส่งผลให้ความน่าจะเป็นที่เม็ดวัสดุนั้นจะมีเสถียรภาพลดต่ำลง แต่ทั้งนี้ก็ไม่อาจรับรองการเคลื่อนที่ของตะกอนได้ หรือการที่อัตราส่วนของแรงมากกว่า 1 ก็ไม่อาจจะรับรองได้ว่าเม็ดวัสดุนั้นจะยังคงอยู่ที่เดิมในท้องน้ำ ความสัมพันธ์นี้ ใช้คำนวณสัมประสิทธิ์เสถียรภาพของท้องน้ำ ซึ่งรวมการกระจายขนาดของวัสดุท้องน้ำ ดังแสดงต่อไปนี้

$$BSF = \frac{\sum_{i=1}^{NGS} PROB \cdot PROB \cdot PI_i \cdot d_{mi}}{\sum_{i=1}^{NGS} PROB \cdot PI_i \cdot d_{mi}} \dots\dots\dots (3-29)$$

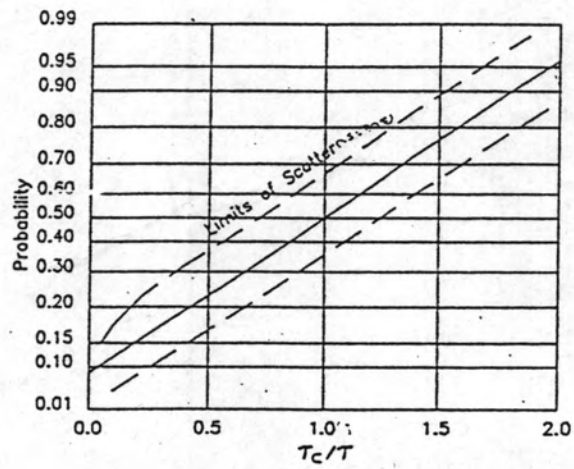
โดยที่ BSF = สัมประสิทธิ์ของเสถียรภาพท้องน้ำ

$d_{m_i}$  = ขนาดเฉลี่ยปานกลางเส้นผ่าศูนย์กลางชั้นขนาดที่ i

i = ชั้นขนาดที่ถูกวิเคราะห์

NGS = จำนวนชั้นขนาดที่มี

PI = อัตราส่วนของท้องน้ำที่ประกอบด้วยแต่ละชั้นขนาด



รูปที่ 3-10 ความน่าจะเป็นของเสถียรภาพเม็ดวัสดุ



PROB = ความน่าจะเป็นที่เม็ดวัสดุจะยังคงอยู่กับที่ในท้องน้ำ

จากการทำงานของ Gessler เสนอให้ใช้สัมประสิทธิ์ของเสถียรภาพ เท่ากับ หรือมากกว่า 0.65 เป็นบรรทัดฐานเกินกว่าขั้นตอนการกัดเซาะมีเสถียรภาพ ถ้าบางส่วนของขั้นตอนการกัดเซาะมีเสถียรภาพภายใต้เงื่อนไขทางชลศาสตร์ที่กำหนดวัสดุจะถูกกัดเซาะไปจากชั้นที่มีการเคลื่อนไหว โดยเหลือเม็ดวัสดุที่มีเสถียรภาพไว้จนกระทั่งมีปริมาณเพียงพอที่จะปกคลุมผิวท้องน้ำให้มีความหนาเท่ากับ 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดวัสดุที่มีเสถียรภาพ ถ้าหากขั้นตอนการกัดเซาะนี้ไม่มีเสถียรภาพ มันก็อาจจะถูกทำลายไปตามเงื่อนไขทางชลศาสตร์ที่เปลี่ยนไป และชั้นที่มีการเคลื่อนไหวที่สมบูรณ์จะถูกคำนวณใหม่อีกครั้งหนึ่ง

ฟังก์ชันความน่าจะเป็นสามารถใช้คำนวณปริมาณของขั้นตอนการกัดเซาะที่ถูกทำลายได้ ซึ่งใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง โดยให้ปริมาณของขั้นตอนการกัดเซาะมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ของเสถียรภาพ ดังนี้

$$SAE_{t+1} = 1.0 - \frac{BSF}{0.65} (1.0 - SAE_t) \dots\dots\dots (3-30)$$

โดยที่ t และ t+1 หมายถึงที่เวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของช่วงการคำนวณ วัดจากชั้นที่มีการเคลื่อนไหวจะถูกเคลื่อนย้ายจนกระทั่งเหลือขนาดวัสดุที่มีเสถียรภาพมากพอที่จะปกคลุมผิวท้องน้ำที่เวลาสิ้นสุดช่วงการคำนวณ

3.2.4 การเคลื่อนตัวของตะกอน (Movement of Sediment)

3.2.4.1 การคำนวณอัตราส่วนคละของวัสดุท้องน้ำใหม่ (Bed Gradation Recomputations)

โปรแกรม HEC-6 จะแก้สมการเอกซ์เนอร์ สำหรับคิดความต่อเนื่องของวัสดุ ถ้าหากว่าความสามารถในการพัดพาตะกอนมีมากกว่าอัตราการไหลเข้าของตะกอน ปริมาณตะกอนจากท้องน้ำจะถูกเคลื่อนย้าย เพื่อให้สอดคล้องตามสมการต่อเนื่อง แต่เนื่องจากความสามารถในการพัดพาสำหรับขนาดตะกอนที่ กำหนดขึ้นอยู่กับว่ามีตะกอนขนาดดังกล่าวเป็นองค์ประกอบของท้องน้ำเป็นอัตราส่วนเท่าไร จึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนวณอัตราส่วนของตะกอนขนาดต่าง ๆ ที่มีอยู่ในท้องน้ำใหม่บ่อย ๆ ในขณะที่มีการแลกเปลี่ยนวัสดุเกิดขึ้นในท้องน้ำ

จำนวนครั้งที่ต้องทำการคำนวณใหม่; LTI สัมพันธ์กับระยะเวลาของการไหล, ความเร็ว และความยาวของช่วงที่พิจารณา ดังนี้

$$LTI = \frac{\text{ระยะเวลาการไหล} \cdot \text{ความเร็วการไหล}}{\text{ความยาวของช่วงที่พิจารณา}} \dots\dots\dots (3-31)$$

### 3.2.4.2 อัตราจำกัดคุณสมบัติ ของการผสมรวมกับน้ำ (Characteristic Rate of Entrainment)

อัตราจำกัดคุณสมบัติการผสมรวมกับน้ำจะมีความสัมพันธ์กับการไหลแบบปั่นป่วน แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองการไหลแบบบอลลูนอยู่นอกเหนือขอบเขตของโปรแกรมนี้ ด้วยเหตุที่ อัตราการผสมรวมกับน้ำไม่ใช่ค่าที่คงที่โดยขณะหนึ่ง ดังนั้นระยะทางการไหลจำกัดคุณสมบัติจึงถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้ประมาณ อัตราการผสมรวมกับน้ำโดยใช้ระยะทางที่ต้องการ เพื่อให้ ความเข้มข้นของตัวอย่างที่ทดสอบการไหลในรางน้ำเข้าสู่สมดุลย์ ซึ่งระยะทางจำกัดคุณสมบัติสำหรับการผสมรวมกับน้ำถูกกำหนดให้เท่ากับ 30 เท่าของความลึกของการไหล อัตราส่วนการผสมรวมกับน้ำ (Entrainment Ratio); ENTRLR จะเกี่ยวเนื่องกับอัตราซึ่งการไหลเข้าสู่ภาวะที่มีความสมดุลย์ของปริมาณตะกอน ซึ่งคำนวณได้โดยการหารระยะทางช่วงการไหลที่พิจารณาด้วย ระยะทางจำกัดคุณสมบัติสำหรับการผสมรวมกับน้ำ

$$ENTRLR = \frac{\text{Reach Length}}{30 \cdot \text{Depth}} \dots\dots\dots (3-32)$$

และสัมประสิทธิ์ของการผสมรวมกับน้ำ; ETCON แสดงในรูปสมการดังนี้

$$ETCON = 1.368 \cdot e^{-ENTRLR} \dots\dots\dots (3-33)$$

โดยที่ค่า ETCON จะถูกใช้เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นต่อความเข้มข้นสมดุลย์ (สำหรับแต่ละขนาดของเม็ดตะกอน) ของช่วงลำน้ำที่พิจารณา ซึ่งค่าสูงสุด = 1.0

3.2.4.3 อัตราจำกัดคุณสมบัติ สำหรับการตกตะกอน

(Characteristic Rate for Deposition)

การตกตะกอนจะเกิดขึ้น เมื่ออัตราการไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุมมากกว่าค่าความสามารถในการพัดพาตะกอน ซึ่งจะมีตะกอนเพียงบางขนาดเท่านั้นที่ตกตะกอน ดังนั้นการคำนวณอัตราการตกตะกอนจึงต้องแยกตามชั้นขนาดของเม็ดตะกอน อัตราการตกตะกอนจะถูกควบคุมด้วยความเร็วในการตกตะกอนของเม็ดวัสดุ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$DECAY(i) = \frac{V_s(i) \cdot DD}{D_s(i)} \dots\dots\dots (3-34)$$

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

$DD$  = ระยะเวลาของช่วงการคำนวณ

$V_s(i)$  = ความเร็วในการตกตะกอนสำหรับเม็ดตะกอนขนาด  $i$

3.2.4.4 อิทธิพลของการต้านทานการกัดเซาะ ต่อความสามารถในการพัดพา

(Influence of Armoring on Transport Capacity)

ในแต่ละครั้งของการคำนวณแบบทำซ้ำจะวิเคราะห์ การพัดพาของตะกอนทุกขนาดและก่อนที่จะทำการคำนวณซ้ำในครั้งต่อไป จะมีการคำนวณพื้นที่ผิวของท้องน้ำที่เปิดเผยต่อการกัดเซาะ ในความสัมพันธ์ของ Einstein สัมประสิทธิ์การปกคลุมจะเป็นตัวปรับความสามารถในการพัดพาตะกอนอันเป็นผลของการต้านทานการกัดเซาะที่เกิดขึ้น สำหรับฟังก์ชันความสามารถในการพัดพาตะกอนฟังก์ชันอื่น ๆ ความสามารถในการพัดพาตะกอนจะถูกแก้ไขตามผลของการต้านทานการกัดเซาะ ใช้ความสัมพันธ์แบบพาราโบลา ดังนี้

$$FSAE = CSAE + (1.0 - CSAE) SAE^{BSAE} \dots\dots\dots (3-35)$$

โดยที่ :  $BSAE$  = สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณการพัดพาตะกอนภายใต้เงื่อนไขที่มีการต้านทานการกัดเซาะ

CSAE = ส่วนของความสามารถในการพัฒนาตะกอนที่เพียงพอที่จะพัฒนาตะกอนส่วนที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม

FSAE = ความสามารถในการพัฒนาตะกอน ปรับค่าเนื่องจากผลของการดำเนินการกัดเซาะ

ค่าของ CSAE เป็นส่วนของความสามารถในการพัฒนาตะกอนที่เพียงพอ ในการพัฒนาตะกอนส่วนที่ไหลเข้าสู่ปริมาตรควบคุมให้ไหลผ่านไป โดยไม่เกิดการตกตะกอนในปริมาตรควบคุมสำหรับค่า BSAE ถ้าหากไม่มีการกำหนดโปรแกรมจะกำหนดโดยปริยายให้เท่ากับ 0.5

### 3.2.5 น้ำหนักจำเพาะของตะกอน (Unit Weight of Deposits)

#### 3.2.5.1 น้ำหนักจำเพาะเริ่มต้น (Initial Unit Weight)

น้ำหนักจำเพาะหมายถึงน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของตะกอน ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของน้ำหนักแห้ง

$$\gamma_s = (1 - P_d) \cdot SG \cdot \gamma \quad \dots \dots \dots (3-36)$$

โดยที่ :  $P_d$  = ความพรุนของตะกอน

$SG$  = ความถ่วงจำเพาะของอนุภาคตะกอน

$\gamma$  = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ

$\gamma_s$  = น้ำหนักจำเพาะของตะกอน

#### 3.2.5.2 น้ำหนักจำเพาะผสมของตะกอน (Composite Unit Weight)

เมื่อมีการคิดคำนวณวัสดุที่เป็นส่วนผสมของอนุภาคหลายขนาด การคำนวณน้ำหนักจำเพาะผสมสามารถทำได้ โดยใช้สูตรต่อไปนี้

$$\gamma_{sc} = \frac{1}{\left[ \frac{F_{SA}}{\gamma_{SA}} + \frac{F_{SL}}{\gamma_{SL}} + \frac{F_{CL}}{\gamma_{CL}} \right]} \quad \dots \dots \dots (3-37)$$

โดยที่ :  $\gamma_{SC}$  = น้ำหนักจำเพาะผสมของตะกอน

$\gamma_{SA}, \gamma_{SL}, \gamma_{CL}$  = น้ำหนักจำเพาะของทราย, ตะกอนทราย, และดินเหนียวตามลำดับ

$F_{SA}, F_{SL}, F_{CL}$  = อัตราส่วนของทราย, ตะกอนทราย, และดินเหนียวในตะกอนทั้งหมด ตามลำดับ

### 3.2.5.3 น้ำหนักจำเพาะยู่ตัว (Consolidated Unit Weight)

การอัดตัวของตะกอนที่ตกตะกอน เกิดจากอนุภาคของตะกอนมีการจัดเรียงตัวของมันเอง และการอัดไล่น้ำออกจากโพรงช่องว่าง สมการสำหรับคำนวณน้ำหนักจำเพาะยู่ตัวดังแสดงต่อไปนี้

$$\gamma = \gamma_1 + B \cdot \log_{10} T \quad \dots \dots \dots (3-38)$$

โดยที่ :  $B$  = สัมประสิทธิ์ความยู่ตัวของตะกอนทราย หรือดินเหนียว

$T$  = เวลาสะสมเป็นปี

$\gamma_1$  = น้ำหนักจำเพาะเริ่มต้นของตะกอนที่ตกตะกอน  
ปกติใช้น้ำหนักจำเพาะภายหลังจากการตกตะกอน 1 ปี

น้ำหนักจำเพาะยู่ตัวเฉลี่ยในช่วงเวลา  $T$  สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตร ซึ่งพัฒนาขึ้นโดย Miller ดังนี้

$$\gamma_{ave} = \gamma_1 + B \cdot \left[ \frac{T}{T-1} \right] \cdot \log_{10} T - 0.434 B \quad \dots \dots (3-39)$$

ซึ่งสูตรการคำนวณน้ำหนักจำเพาะนี้ ถูกใช้ในการแปลงน้ำหนักของตะกอนให้เป็นปริมาตรสำหรับคำนวณการเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ



### 3.2.6 คุณสมบัติของเม็ดตะกอน (Sediment Particle Properties)

คุณสมบัติ 4 อย่างของตะกอนที่มีความสำคัญ ในการทำนายการเคลื่อนตัวของ ตะกอน คือ ขนาด, แพลคเตอร์รูปร่าง, ความถ่วงจำเพาะ, และความเร็วในการตกตะกอน การ แบ่งชั้นขนาดของตะกอนที่กำหนดในโปรแกรม HEC-6 เป็นไปตามรายละเอียดในตารางที่ 3-1 ส่วนแพลคเตอร์รูปร่างกำหนดโดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$SF = \frac{c}{(a.b)^{1/2}} \dots\dots\dots (3-40)$$

โดยที่ a,b,c = ความยาวของด้านยาวที่สุด, ปานกลาง, และสั้นที่สุด ตามลำดับ ของแกนตั้งฉากกันของเม็ดตะกอน

แพลคเตอร์รูปร่างของเม็ดทรงกลมโดยสมบูรณ์เท่ากับ 1.0 และสามารถลดลงจนถึง 0.1 สำหรับอนุภาคที่มีความขรุขระมาก ๆ โปรแกรม HEC-6 จะกำหนดแพลคเตอร์รูปร่างโดยปริยายเท่ากับ 0.667 แต่ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงค่าแพลคเตอร์เป็นอย่างอื่นได้

ความถ่วงจำเพาะของเม็ดตะกอนขึ้นอยู่กับแร่ธาตุ ที่ก่อให้เกิดเม็ดตะกอนนั้น ในลำน้ำธรรมชาติวัสดุท้องน้ำส่วนใหญ่จะเป็นแร่ควartz ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะ 2.65 โปรแกรม HEC-6 จะกำหนดค่าความถ่วงจำเพาะโดยปริยายเป็น 2.65 แต่อย่างไรก็ตามผู้ใช้สามารถที่จะกำหนดความถ่วงจำเพาะของทราย, ตะกอนทราย และดินเหนียว ในข้อมูลป้อนเข้าได้

ความเร็วในการตกตะกอนในโปรแกรม HEC-6 จะมีให้เลือกคำนวณได้ 2 วิธี คือ วิธีที่ 1 คำนวณความเร็วในการตกตะกอน โดยใช้สูตรที่เสนอโดย Toffaleti ซึ่งคล้ายคลึงกับวิธีของ Rubey ซึ่งวิธีนี้สมมติแพลคเตอร์รูปร่างเท่ากับ 0.9 วิธีที่ 2 เป็นวิธีที่เสนอโดย Williams ซึ่งโปรแกรม HEC-6 จะกำหนดวิธีที่ 2 เป็นวิธีโดยปริยาย

ตารางที่ 3-1 การแบ่งชั้นขนาดของอนุภาคตะกอนในโปรแกรม HEC-6

หมายเลขชั้นขนาดในโปรแกรม HEC-6	วัสดุตะกอน	เส้นผ่านศูนย์กลางของตะแกรง (มม.)	ค่าเฉลี่ย (มม.)
1	<u>ดินเหนียว</u> ดินเหนียว	0.002-0.004	0.0028
1	<u>ตะกอนทราย (Silt)</u> ตะกอนทรายละเอียดมาก	0.004-0.008	0.006
2	ตะกอนทรายละเอียด	0.008-0.016	0.011
3	ตะกอนทรายขนาดปานกลาง	0.016-0.032	0.022
4	ตะกอนทรายหยาบ	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 Rivers and Reservoirs, Users Manual, 1991.

### 3.2.7 ลำดับขั้นตอนการคำนวณความลึกของการกัดเซาะ (Scour Depth Calculation Sequence)

การคำนวณความลึกของการกัดเซาะทำตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เซท ค่า  $D_{50}$  เริ่มต้นเป็นศูนย์
- 2) คำนวณความหนาของชั้นที่มีการเคลื่อนไหว
- 3) คำนวณอัตราส่วนเคละของตะกอนในชั้นที่มีการเคลื่อนไหว
- 4) แก้มการเอ็กซ์เนอร์ คำนวณการแลกเปลี่ยนวัสดุตะกอนระหว่างสนามการไหล และชั้นที่มีการเคลื่อนไหวในหน่วยตัน
- 5) ความเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในชั้นที่เคลื่อนไหว จะถูกแปลงเป็นปริมาตรและจะคำนวณการเปลี่ยนแปลงนิกิตของรูปตัดลำน้ำ หลังจากนั้นก็จะอ่านค่าข้อมูลการไหลจากชลาภาพค่าถัดไป
- 6) คำนวณ ค่ารูปตัดความยาวของระดับผิวน้ำใหม่รวมทั้งคำนวณค่าแรงทางชลศาสตร์ที่สอดคล้องกัน
- 7) คำนวณค่า  $D_{50}$  ใหม่
- 8) เมื่อทุกขนาดของ ตะกอน ถูกพัดพาจนครบ ก็จะเกิดภาวะเกราะป้องกันอย่างสมบูรณ์สำหรับเงื่อนไขชลศาสตร์ นั้น
- 9) ถ้าค่า  $D_{50}$  ใหม่ มีค่ามากกว่า 0.0 จะถูกเปรียบเทียบกับค่าความลึกทั้งหมดของตะกอนสะสมท้องน้ำ ถ้าผลการเปรียบเทียบได้ว่า ปริมาณตะกอนที่สอดคล้องกับ  $D_{50}$  ที่คำนวณได้ต้องการมากกว่าปริมาณตะกอนที่มีอยู่ในตะกอนสะสมท้องน้ำ ค่า  $D_{50}$  ก็จะถูกเซทให้ลึกตามที่ปริมาณตะกอนสะสมท้องน้ำทั้งหมด และโปรแกรมก็จะหมายเหตุ ให้ทราบ

- 10) ถ้าหากปริมาณตะกอนสะสมที่ท้องน้ำมีเพียงพอดำ  $D_{se}$  จะถูกเปรียบเทียบกับความลึกของชั้นที่เคลื่อนไหวที่ยังคงมีอยู่ก่อนหน้านี้,  $D_{seold}$  ถ้าความแตกต่างของ  $(D_{se} - D_{seold})$  มีค่ามากกว่า 5 ฟุต น้ำหนักของตะกอนที่มีปริมาตรเทียบเท่ากับความหนา 5 ฟุต จะถูกนำย้อนกลับสู่ชั้นที่ไม่เคลื่อนไหว เหตุผลของการแลกเปลี่ยนนี้ เพื่อควบคุมองค์ประกอบ ความอ่อนไหวของท้องน้ำต่ออัตราส่วนคละของผิวท้องน้ำ เพราะว่าการคำนวณการพัดพาของตะกอนขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนคละของผิวท้องน้ำ
- 11) ถ้าความแตกต่างของ  $(D_{se} - D_{seold})$  น้อยกว่า 5 ฟุต น้ำหนักเป้าหมายใหม่ ของตะกอนจะถูกคำนวณ สำหรับการแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นไม่เคลื่อนไหวกับชั้นที่เคลื่อนไหว ในการคำนวณลำดับต่อไป

### 3.2.8 การเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ (Bed Elevation Change)

เมื่อการกัดเซาะหรือการตกตะกอนเกิดขึ้น หลังจากผ่านไปหนึ่งช่วงเวลาการคำนวณโปรแกรม HEC-6 จะปรับค่าระดับท้องน้ำที่อยู่ในขอบเขตของท้องน้ำที่มีการเปลี่ยนแปลงของรูปตัด สำหรับการตกตะกอน ท้องน้ำจะมีการเคลื่อนขึ้นในแนวตั้งเฉพาะ ในส่วนของท้องน้ำที่มีการเคลื่อนที่ ซึ่งกำหนดในรหัสบันทึก H หรือ HD และอยู่ภายใต้ระดับน้ำ (ภายในเส้นขอบเปียก) การตกตะกอนอนุญาตให้เกิดขึ้นได้ในส่วนที่อยู่นอกขอบเขตความสามารถต่อการไหล (Conveyance) ซึ่งกำหนดในรหัสบันทึก XL สำหรับการกัดเซาะจะยอมให้เกิดขึ้นเฉพาะในส่วนของท้องน้ำที่มีการเคลื่อนที่ภายในขอบเขตของความสามารถต่อการไหล ภายในขอบเขตของการไหลประสิทธิผล (Effective flow) ซึ่งกำหนดในรหัสบันทึก  $X_u$  และอยู่ภายใต้ระดับน้ำเท่านั้น เมื่อปริมาณของการกัดเซาะหรือการตกตะกอนได้รับการคำนวณปริมาตรของความอ่อนไหวหรือการตกตะกอนจะถูกหารด้วยความกว้างประสิทธิผล และความยาวที่ควบคุมโดยรูปตัดนั้น จะได้ค่า  $Y_u$  ซึ่งเป็นค่าระดับท้องน้ำที่เปลี่ยนไป และโปรแกรมจะปรับค่าในแนวตั้งของนิกัดของรูปตัดลำน้ำใหม่

### 3.2.9 การพัดพาตะกอนทรายและดินเหนียว (Silt and Clay Transport)

#### 3.2.9.1 การตกตะกอนของตะกอนที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (Cohesive Sediment Deposition)

สมการสำหรับคำนวณการตกตะกอน ของตะกอนทราย และดินเหนียวด้วยวิธีที่ 2 ในโปรแกรม HEC-6 ได้จากการทดลอง ในรางน้ำ ที่อัตราการไหลต่ำ ๆ และความเข้มข้นของ



ตะกอนแขวนลอย น้อยกว่า 300 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นดังนี้

$$\ln \frac{C}{C_0} = -k't \quad \dots\dots\dots (3-41)$$

$$\text{หรือ } \frac{C}{C_0} = e^{(-k't)} \quad \dots\dots\dots (3-42)$$

โดยที่  $C$  = ความเข้มข้นของตะกอนที่จุดสิ้นสุดของช่วงเวลา

$C_0$  = ความเข้มข้นของตะกอนที่ตอนเริ่มต้นช่วงเวลา

$D$  = ความลึกของน้ำ

$$K = \frac{V_s P_r}{2.3D} \quad \dots\dots\dots (3-43)$$

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

$t$  = เวลา = ความยาวช่วง/ความเร็วการไหล

$V_s$  = ความเร็วในการตกตะกอน ของอนุภาคตะกอน

$\tau_b$  = แรงเฉือนท้องน้ำ

$\tau_d$  = แรงเฉือนท้องน้ำวิกฤตสำหรับการตกตะกอน

อัตราส่วนที่ได้นี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตะกอนดินเหนียวหรือตะกอนทรายที่ไหลเข้า จะได้ค่าศักยภาพในการพัฒนาของตะกอนดังกล่าวความเข้มข้นจะถูกแปลงเป็นปริมาตร และการตกตะกอนบนท้องน้ำ



3.2.9.2 การกัดเซาะของตะกอนที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค (Cohesive Sediment Scour)

หลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์การกัดเซาะของตะกอนที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคได้จากการศึกษาของ Parthenaides (1965) และมีการปรับปรุงโดย Ariathurai (1973) ซึ่งอยู่ในรูปของ สมการดังนี้

$$C = \frac{M_1 \cdot S_a}{Q \cdot \gamma} \cdot \left[ \frac{\tau_b}{\tau_s} - 1 \right] + C_0 \dots\dots\dots (3-44)$$

โดยที่ C = ความเข้มข้นของตะกอนที่จุดสิ้นสุดของช่วง เวลา

C<sub>0</sub> = ความเข้มข้นของตะกอนตอนเริ่มต้นของช่วง เวลา

M<sub>1</sub> = อัตราการกัดเซาะ สำหรับ การกัดเซาะอนุภาค

Q = อัตราการไหลของน้ำ

S<sub>a</sub> = พื้นที่ผิวของท้องน้ำที่เปิดเผยต่อการกัดเซาะ

τ<sub>b</sub> = แรงเฉือนท้องน้ำ

τ<sub>s</sub> = แรงเฉือนวิกฤต สำหรับการกัดเซาะอนุภาค

γ = น้ำหนักจำเพาะของน้ำ

ในขณะที่ค่าแรงเฉือนท้องน้ำเพิ่มสูงขึ้น การกัดเซาะอนุภาคอาจเปลี่ยนไปเป็นการกัดเซาะเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งจะทำให้อัตราการกัดเซาะสูงขึ้น เพราะให้อัตราการกัดเซาะเป็นกลุ่มก้อนตาม ทฤษฎีแล้วสามารถเพิ่มขึ้นโดยไม่จำกัด ดังนั้น Ariathurai จึงแนะนำให้ใช้ "ช่วงเวลาจำกัด คุณสมบัติ" (Characteristic time) ; Δt กับระยะเวลาการคำนวณ DD จะได้สมการ สำหรับคำนวณ อัตราการกัดเซาะแบบเป็นกลุ่มก้อน ดังนี้

$$C = \frac{M_2 \cdot S_a}{Q \cdot \gamma} \cdot \frac{\Delta t}{DD} + C_0 \dots\dots\dots (3-45)$$

โดยที่  $DD =$  ระยะเวลาของช่วงการคำนวณ

$M_2 =$  อัตราการกัดเซาะสำหรับการกัดเซาะเป็นกลุ่มก้อน

$t =$  เวลาจำกัดคุณสมบัติ ของการกัดเซาะ

Ariathurai ได้ให้คำแนะนำวิธีที่จะประมาณว่า  $t$ ,  $M_1$ , และ  $M_2$  เนื่องจากขอบเขตของแรงเฉือนที่เริ่มการกัดเซาะและอัตราการกัดเซาะของตะกอนที่มีแรงยึดเหนี่ยวขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติเฉพาะของอนุภาคตะกอนและสภาวะคุณสมบัติของน้ำ เช่น แร่ธาตุที่ผสม, อัตราส่วนโซเดียม ความจุในการเปลี่ยนแปลงประจุบวก, PH, ความเค็ม และการตกตะกอนที่ผ่านมา ดังนั้น การทดสอบในสนาม และหรือในห้องทดลองจะเป็นวิธีที่จะได้ค่า คุณสมบัติในการกัดเซาะดังกล่าวของตะกอนที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดตะกอน

### 3.2.10 ความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของตะกอน (Sediment Transport Relationship)

การเคลื่อนตัวของตะกอนในลำน้ำเป็นขบวนการที่มีความซับซ้อนซึ่งนักวิจัยหลาย ๆ ท่านพยายามที่จะศึกษา ค้นคว้าทฤษฎีเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของตะกอน แต่อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของตะกอนยังอยู่ในรูปสมการที่ได้จากการสังเกตและทดลอง (Empirical) ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเคลื่อนตัวของตะกอน กับคุณสมบัติทางศาสตร์ของการไหล คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุท้องน้ำ และวัสดุตะกอนที่ไหลมากับน้ำ โดยอาศัยการทดลองในห้องปฏิบัติการและการตรวจวัดข้อมูลสนาม เป็นเครื่องมือช่วยในการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของตะกอนส่วนใหญ่เป็นการศึกษากรณีของตะกอนที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดวัสดุ (Noncohesive Material) ดังนั้นความสัมพันธ์เหล่านี้จึงอาจไม่ถูกต้องหากนำไปใช้กับกรณีของตะกอนเป็นดินเหนียว และตะกอนทราย (silt) อันเป็นตะกอนที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดวัสดุ ซึ่งจะมีความซับซ้อนในขบวนการกัดเซาะและการตกตะกอนมากกว่า

ดังกล่าวแล้วว่าความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของตะกอนขึ้นอยู่กับสมมุติฐานและข้อมูลจากการทดลอง และข้อมูลสนาม การเลือกใช้ฟังก์ชันการเคลื่อนตัวของตะกอนที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาถึงพื้นฐานที่มาของความสัมพันธ์และข้อมูลของพื้นที่ศึกษา ในโปรแกรม HEC-6 มีความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของตะกอนที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดตะกอนอยู่ 11 ความสัมพันธ์ดังรายละเอียดในตารางที่ 3-2 นอกจากนั้น โปรแกรมยังอนุญาตให้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดความ

สัมพันธของการเคลื่อนตัวของตะกอนเองได้ ถ้าหากมีข้อมูลเพียงพอที่จะพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทางชลศาสตร์ และการเคลื่อนตัวของตะกอนตามชั้นขนาดของวัสดุ โดยที่การพัฒนาความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันดังต่อไปนี้

$$GP = \frac{D \cdot S_f - C}{A}^B \dots\dots\dots (3-46)$$

โดยที่ :  $D \cdot S_f$  = ผลคูณความลึกกับความลาด

$A, B, C$  = สัมประสิทธิ์การเคลื่อนตัวของตะกอนซึ่งพัฒนาขึ้นจากข้อมูลที่มีอยู่

$GP$  = ศักยภาพในการเคลื่อนตัวของตะกอน

เนื่องจากค่าศักยภาพในการเคลื่อนตัวของตะกอนจะมีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความเสียดทานในการไหลอยู่เสมอ เพื่อที่จะคิดผลกระทบดังกล่าวนี้ ค่าแฟคเตอร์ STO ถูกใช้เพื่อเป็นตัวคูณกับ GP เพื่อปรับค่าศักยภาพในการเคลื่อนตัวของตะกอน ซึ่งค่าของ STO อยู่ในรูปของความสัมพัทธ์ดังนี้

$$STO = 10^{-a} \cdot D \cdot n^E \dots\dots\dots (3-47)$$

โดยที่ :  $D, E$  = สัมประสิทธิ์การเคลื่อนตัวของตะกอน ซึ่งพัฒนามาจากข้อมูลที่มีอยู่

$n$  = สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning

$STO$  = แฟคเตอร์ใช้คูณปรับค่า GP

ในการศึกษาครั้งนี้ เลือกใช้ ฟังก์ชันการเคลื่อน ตัวของตะกอน 5 ฟังก์ชัน ด้วยกันคือ

1. Toffaleti method (1969)
2. Meyer-Peter and Muller (1948)
3. Yang's Stream power (1973)

4. Ackers-white (1973)
5. Colby (1964)

เหตุผลในการเลือกใช้ ฟังชันทั้ง 5 เพื่อที่จะเปรียบเทียบความเหมาะสมของฟังชันการเคลื่อนตัวทั้ง 5 ซึ่งที่สมมุติฐานที่มาแตกต่างกัน คือ ฟังชันที่ 1 และที่ 2 อยู่ในกลุ่มของ Shear Stress Approach ประเภท Bed-Load Formula ส่วนฟังชันที่ 3 และ 4 อยู่ในกลุ่ม Power Approach ประเภท Bed-Material Load Formula และฟังชันที่ 5 อยู่ในกลุ่ม Parametric Approach ประเภท Bed-Material Load Formula และเกณฑ์อีกอย่างหนึ่งของการเลือกคือขนาดของเม็ดตะกอน ของข้อมูลจากพื้นที่การศึกษา ซึ่งรายละเอียดของความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของตะกอนทั้ง 5 ฟังชันแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 3-2 ความสัมพันธ์สำหรับคำนวณการเคลื่อนตัวของตะกอนในโปรแกรม HEC-6

ลำดับ	ความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของตะกอน	หลักการที่มา	ชนิดของความสัมพันธ์	ขนาดของตะกอนที่เหมาะสม ( มม. )
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	0.06 - 2.0
5	Dubois (Brown, 1950)	Shear Stress Approach	Bed-Load Formula	
6	Einstein - *ยังใช้งานไม่ได้	Shear Stress Approach	Bed-Load Formula	
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	Taffaleti 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	* ไม้ใช้	-	-	
12	Toffaleti(1969)-Meyer-Peter and Muller(1948)Combination.	Shear Stress Approach	Bed-Load Formula	0.12 - 30.00



ตารางที่ 3-2 (ต่อ) ความสัมพันธ์สำหรับคำนวณการเคลื่อนตัวของตะกอนในโปรแกรม HEC-6

ลำดับ	ความสัมพันธ์การเคลื่อนตัวของตะกอน	หลักการที่มา	ชนิดของความสัมพันธ์	ขนาดของตะกอนที่เหมาะสม (มม.)
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.