

หลักการและทฤษฎีการเคลื่อนที่ของตะกอน

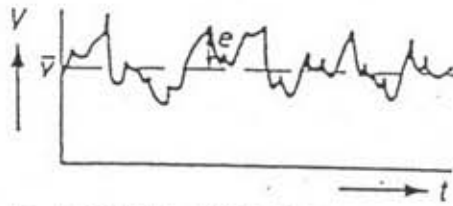
การเคลื่อนที่ของตะกอนและปัญหาทางชลศาสตร์ ของการเดินเรือในแม่น้ำน่านตอนล่าง เป็นขบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลำน้ำ และตัดการไหลของน้ำในลำน้ำ ซึ่งเป็นขบวนการที่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน การวิเคราะห์แนวโน้มระยะยาวของการเปลี่ยนแปลงของลำน้ำที่มีระยะทางยาว ๆ จำเป็นต้องคำนวณการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดลำน้ำเป็นจำนวนมาก เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำของลำน้ำ การวิเคราะห์จำเป็นต้องอาศัยการคำนวณโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และข้อมูลจากการสำรวจวิเคราะห์ เพื่อการเปรียบเทียบแบบจำลองให้มีความเหมาะสม ที่ให้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกับความเป็นจริง ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลจากของจริงในแม่น้ำน่านตอนล่าง ทั้งคุณสมบัติชลศาสตร์และสภาพลำน้ำ และการศึกษาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของลำน้ำ และรูปตัดการไหล (flow profile) เพื่อวิเคราะห์ปัญหาการเดินเรือ ด้วยแบบจำลอง HEC-6 ซึ่งจะต้องอาศัยหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของตะกอน ซึ่งจะกล่าวดังรายละเอียดในบทนี้

3.1 ชลศาสตร์การไหลในลำน้ำ

ชลศาสตร์การไหลในลำน้ำ ในที่นี้หมายถึงแนวความคิดหลักการและทฤษฎีในการคำนวณคุณสมบัติทางชลศาสตร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของน้ำในแม่น้ำธรรมชาติที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของตะกอนในแม่น้ำตะกอนทราย และได้นำมาใช้ในการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลชลศาสตร์ของลำน้ำน่าน

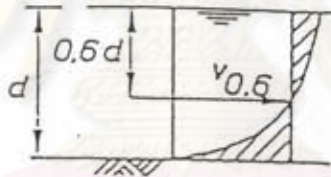
3.1.1 การคำนวณความเร็วเฉลี่ยการไหล

ความเร็วเฉลี่ยการไหลในที่นี้ หมายถึงความเร็วเฉลี่ยการไหลในแต่ละแถบหน้าตัดย่อย (strip) โดยปกติการไหลในแม่น้ำธรรมชาติจะเป็นการไหลในลักษณะไม่คงที่กับเวลา (Unsteady flow) ซึ่งมีความแปรปรวนของความเร็วตามเวลาดังแสดงในรูป 3-1

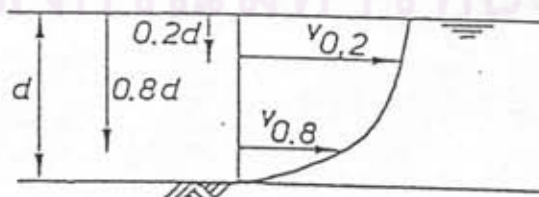


V = ACTUAL VELOCITY
 \bar{V} = MEAN VELOCITY
 e = STOCHASTIC COMPONENT

รูป 3-1 ความแปรปรวนระหว่างความเร็วและเวลา [7]



รูป 3-2 การวัดความเร็วแบบ 1 จุด [7]



รูป 3-3 การวัดความเร็วแบบ 2 จุด [7]

การวัดความเร็วกระแสในแม่น้ำแต่ละแถบหน้าตัดย่อย กำหนดว่าการอยู่ในช่วง 30-60 วินาที เพื่อลดความผิดพลาดจากความแปรปรวนของความเร็ว

ในการตรวจวัดความเร็วในลำน้ำธรรมชาติที่นิยมทำกันอยู่ในปัจจุบันมีอยู่ 4 วิธี คือการตรวจวัดแบบ 1 จุด 2 จุด 3 จุด และ 5 จุด ซึ่งขึ้นอยู่กับความลึก และการแปรปรวนของความเร็วตามความลึก ซึ่งวิธีการคำนวณความเร็วเฉลี่ยจากการตรวจวัดคือ

- 1) การหาความเร็วเฉลี่ยแบบ 1 จุด ใช้สำหรับกรณีที่มีความลึกการไหลน้อยจนไม่สามารถตรวจวัดแบบ 2 จุด หรือ 3 จุดได้ โดยจะหาค่าความเร็วเฉลี่ยของการไหลจากความเร็วที่ระดับความลึก 0.6 ของความลึกจากผิวน้ำ ดังแสดงในรูป 3-2

$$V_{avg} = V_{0.6}$$

เมื่อ d = ความลึกการไหล; V_{avg} = ความเร็วเฉลี่ย

- 2) การหาความเร็วเฉลี่ยแบบ 2 จุด ได้จากการหาค่าเฉลี่ยของความเร็วที่ความลึก 0.2 และ 0.8 ของความลึกการไหลดังแสดงในรูป 3-3

$$V_{avg} = (V_{0.2} + V_{0.8}) / 2$$

- 3) การหาความเร็วเฉลี่ยแบบ 3 จุด ได้จากการหาค่าเฉลี่ยของความเร็วที่ความลึก 0.2 0.6 และ 0.8 ของความลึกการไหล

$$V_{avg} = (V_{0.2} + 2V_{0.6} + V_{0.8}) / 4$$

- 4) การหาความเร็วเฉลี่ยแบบ 5 จุด ได้จากการหาค่าเฉลี่ยของความเร็วที่ผิวน้ำ ที่ความลึก 0.2 0.6 0.8 ของความลึก และที่ท้องน้ำซึ่งโดยปกติจะวัดที่ระดับสูงจากท้องน้ำประมาณ 0.2 ม. และหาความเร็วเฉลี่ยได้คือ

$$V_{avg} = (V_s + 3V_{0.2} + 2V_{0.6} + 3V_{0.8} + V_b) / 10$$

เมื่อ V_s และ V_b คือความเร็วที่ผิวน้ำและ ท้องน้ำตามลำดับ

นอกจากนี้ในการสำรวจวัดข้อมูลในเดือนสิงหาคม 2535 ได้ทำการวัดวันที่ ความลึก 0.4 ของความลึกจากผิวน้ำเพิ่มเติม เพื่อนำมาวิเคราะห์เฉลี่ย โดยหาพื้นที่ ใต้เส้นโค้งการแปรปรวนของความเร็วตามความลึกหารด้วยความลึกการไหล

$$V_{avg} = A_v / d$$

เมื่อ A_v = พื้นที่ใต้เส้นโค้งความสัมพันธ์ของความเร็วและความลึก

3.1.2 การคำนวณปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนแขวนลอย

การคำนวณปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนแขวนลอย หมายถึงการหาผลรวมของ ความเข้มข้นเฉลี่ยของตะกอนแขวนลอย ในแต่ละแถบหน้าตัดย่อยหาได้จากผลหารของพื้นที่ ใต้เส้นโค้งความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและความลึกการไหล ซึ่งการตรวจวัดความ เข้มข้นตะกอนแขวนลอยในครั้งนี้ได้ตรวจไว้ 6 จุด ที่ความลึกต่าง ๆ กันคือ ท้องน้ำ 0.2 0.4 0.6 0.8 ของความลึกจากผิวน้ำและที่ระดับ 0.1 m จากผิวน้ำ

$$c = A_c / d$$

$$Q_s = \sum_{i=1}^n q_i - c_i$$

เมื่อ c = ความเข้มข้นเฉลี่ย; A_c = พื้นที่ใต้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยและความลึกการไหล, q_i , c_i และ b_i หมายถึง อัตราการไหลต่อหน่วยความกว้าง ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอยเฉลี่ย และความกว้าง ของแถบหน้าตัดย่อย ในแถบหน้าตัดย่อยที่ i และ n คือจำนวนแถบหน้าตัดย่อยในแต่ละ หน้าตัดลำน้ำ

3.1.3 การคำนวณปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนท้องน้ำ

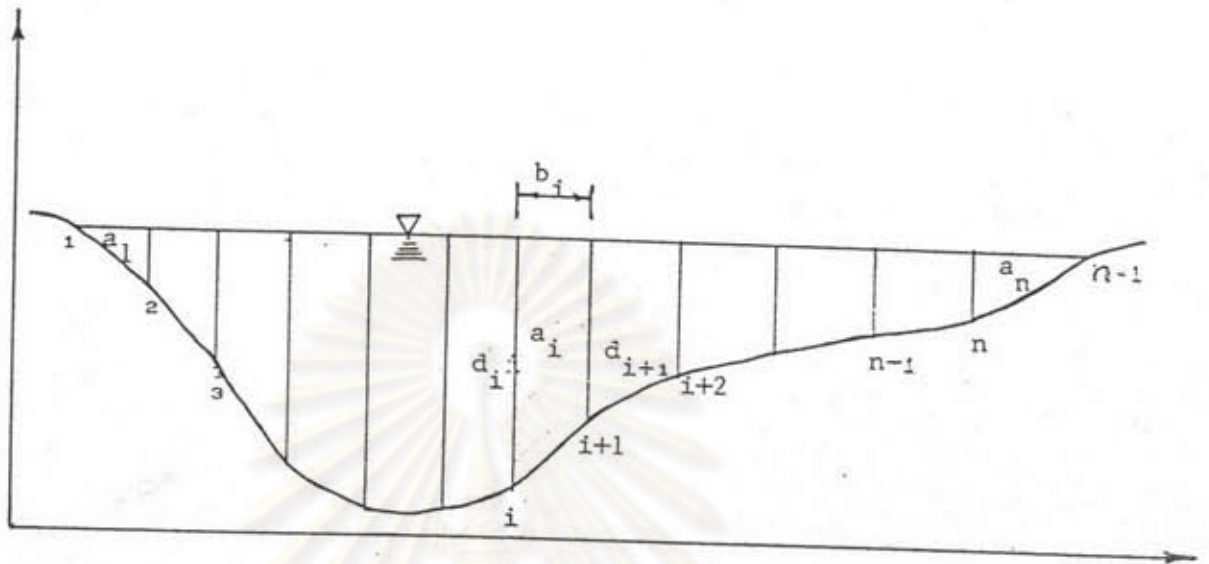
การคำนวณปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำในที่นี้หมายถึง การคำนวณ ปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำต่อหน่วยความกว้าง ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัด ตะกอนท้องน้ำแบบ Helley-Smith ปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำต่อหน่วยความ กว้างคำนวณได้จาก

$$q_b = a \cdot G_s / (b \cdot T)$$

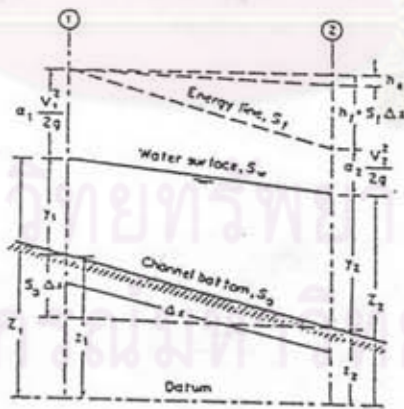
- เมื่อ q_b = ปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำต่อหน่วยความกว้าง
 a = ค่าปรับแก้
 = 0.5 สำหรับขนาดเม็ดตะกอนท้องน้ำ 0.25-0.50 มม.
 (ผลจากปริมาณตะกอนแขวนลอยที่เจือปนอยู่)
 = 1.0 สำหรับขนาดเม็ดตะกอนท้องน้ำ 0.5-16 มม.
 = 1.5 สำหรับขนาดเม็ดตะกอนท้องน้ำ 16-32 มม. (ผลจากขนาดตะ-
 กอนที่มีเม็ดขนาดใหญ่อาจจะยากต่อการเคลื่อนที่เข้าไปในเครื่องวัด)
 G_s = น้ำหนักตะกอนจากการตรวจวัดแต่ละครั้ง
 b = ความกว้างปากทางเข้าตะกอนของเครื่องวัด
 T = เวลาในการตรวจวัด

3.1.4 การคำนวณคุณสมบัติหน้าตัดของการไหล

คุณสมบัติหน้าตัดของการไหลในลำน้ำธรรมชาติ ในที่นี้หมายถึงพื้นที่หน้าตัด; A เส้นขอบเปียก (wetted perimeter); P รัศมีชลศาสตร์; R ความลึกประสิทธิผล (effective depth); D_e และความกว้างประสิทธิผล (effective width) ซึ่ง เป็นคุณสมบัติที่ใช้ในการคำนวณรูปตัดการไหลค่าต่าง ๆ เหล่านี้ สามารถคำนวณด้วยสูตร ทางเรขาคณิตสำหรับทางน้ำที่มีรูปร่างทรงเรขาคณิต แต่ในการศึกษาครั้งนี้เป็นแม่น้ำธรรมชาติที่มีรูปร่างหน้าตัดไม่เป็นทรงเรขาคณิต การคำนวณค่าคุณสมบัติต่าง ๆ เหล่านี้จะได้ จากการประมาณโดยการรวมค่าที่คำนวณจากหน้าตัดย่อย ๆ ที่ประมาณค่าเป็นรูปสี่เหลี่ยม กางหมุดดังแสดงในรูป 3-4



รูป 3-4 แผนภาพหน้าตัดทดแทนลำน้ำธรรมชาติ



รูป 3-5 รูปตัดความยาวการไหลคงที่ไม่สม่ำเสมอ [6]

$$A = \sum_{i=1}^{n-1} [(b_i/2)(d_{i-1}+d_i)]$$

$$P = \sum_{i=1}^{n-1} [((b_i)^2+(d_{i-1}+d_i)^2)^{1/2}]$$

$$R = A/P = \frac{N-1}{\sum_{i=1}^{N-1}}$$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} [(b_i/2)(d_{i-1}+d_i)^{5/3}]}{\sum_{i=1}^{n-1} [(b_i/2)(d_{i-1}+d_i)^{5/3}]}$$

เมื่อ b_i = ความกว้างของแถบหน้าตัดย่อย ๆ d_i และ d_{i-1} = ความลึกที่ขอบด้านซ้ายและขวาของพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูย่อย ๆ

3.2 แบบจำลอง HEC-6

แบบจำลอง HEC-6 เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่จำลองขบวนการชลศาสตร์แม่น้ำในหนึ่งมิติ (one-dimension) [32] เพื่อคำนวณการกัดเซาะ และการทับถมลำน้ำ (scour and deposition) โดยการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างชลศาสตร์การไหลและอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอน การพัฒนาแบบจำลองมีจุดมุ่งหมายหลักที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพลำน้ำและอ่างเก็บน้ำในระยะยาว และไม่มีจุดมุ่งหมายที่จะวิเคราะห์สภาพการเปลี่ยนแปลงในระยะสั้น เช่น กรณีเกิดน้ำหลากเนื่องจากพายุฝน (flood) และไม่สามารถนำไปวิเคราะห์การกัดเซาะตลิ่งลำน้ำ (bank erosion) และการเคลื่อนที่ตะกอนด้านข้าง (lateral channel migration) ได้

แบบจำลอง HEC-6 ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี 1976 โดย Hydrologic Engineering Center, US. Army Corps of Engineers ในภาษา FORTRAN บนเครื่องคอมพิวเตอร์เมนเฟรม และได้รับความนิยมนิยมทดลองใช้กันอย่างแพร่หลาย แบบจำลองได้รับการพัฒนาปรับปรุงเรื่อยมา จนกระทั่งรุ่น 3.2 (Version 3.2) ในปี 1986 จึงถูกปรับเข้าในเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ภายใต้ระบบจัดการ MS.DOS และ

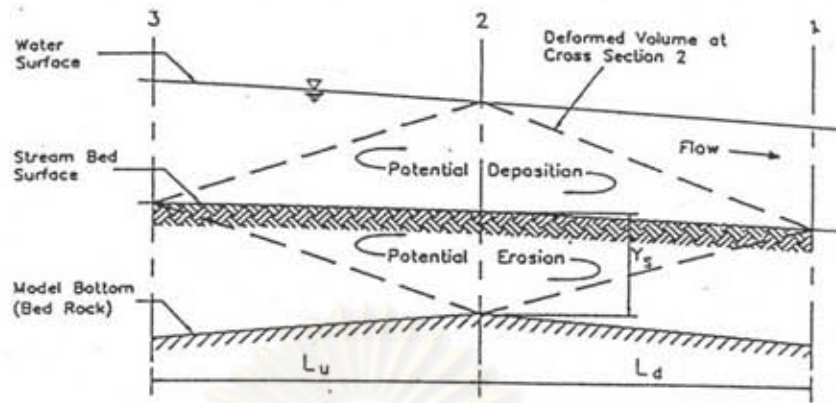
ล่าสุดได้แก่รุ่น 4.0 ปรับปรุงขึ้นในภาษา FORTRAN 77 ในปี 1991 [32] และเป็นชุดแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้

ในแบบจำลอง HEC-6 [32] การวิเคราะห์ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์ศาสตร์ของการไหลในลำน้ำ (flow hydraulics) และส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของตะกอน (Sediment transport) โดยแบ่งลำน้ำออกเป็นหน้าตัดลำน้ำช่วงต่าง ๆ ดังแสดงในรูป 3-6 HEC-6 ทำการคำนวณชลภาพการไหลที่แต่ละหน้าตัด (discharge hydrograph) โดยพิจารณาว่าเป็นการไหลแบบคงที่ (steady flow) ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ และคำนวณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาและระยะทางที่ศึกษา ซึ่งประกอบด้วยปริมาณตะกอนเคลื่อนที่รวม ปริมาณการกัดเซาะหรือตกตะกอน ขบวนการเคลือบผิวท้องน้ำ (armoring of bed surface) และระดับท้องน้ำ นอกจากนี้ยังคำนวณปริมาณตะกอนที่เคลื่อนที่ผ่านหน้าตัดท้ายน้ำต่อไป

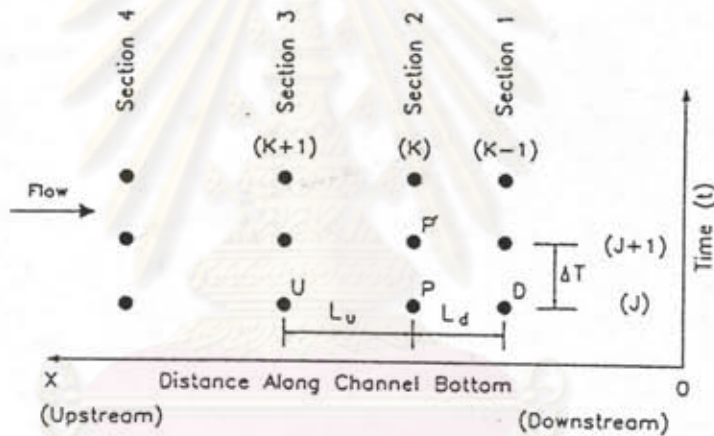
การวิเคราะห์ทางด้านศาสตร์การไหล เป็นการคำนวณรูปตัดการไหล (flow profile) ที่อัตราการไหลค่าหนึ่งระหว่างสองหน้าตัดที่กำลังพิจารณา ใน HEC-6 ได้กำหนดใช้วิธีขั้นคอนมาตรฐาน (Standard Step Method) ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณรูปตัดการไหลในแม่น้ำธรรมชาติ ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ ได้แก่ ความเร็วกระแสน้ำ ความลึก ความกว้างผิวน้ำ และความลาดเส้นหลังงานการไหลของหน้าตัดแต่ละหน้าตัด ทั้งหมดนี้เป็นตัวแปรทางศาสตร์ที่จำเป็นใช้ในการคำนวณปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอน

สำหรับการคำนวณการเคลื่อนที่ตะกอน (sediment transport) ที่แต่ละหน้าตัดจะพิจารณาปริมาตรควบคุม (control volume) และเขียนสมการต่อเนื่องของปริมาณตะกอนที่แต่ละหน้าตัดจะพิจารณา สำหรับปริมาตรควบคุมเพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงของระดับท้องน้ำในแนวตั้ง โดยสมการ Exner ดังนี้

- โดย B = ความกว้างของท้องน้ำที่เปลี่ยนแปลงได้
 DD = ช่วงเวลาที่คำนวณ
 G = ปริมาณตะกอนเคลื่อนที่ (ฟุต³/วินาที)



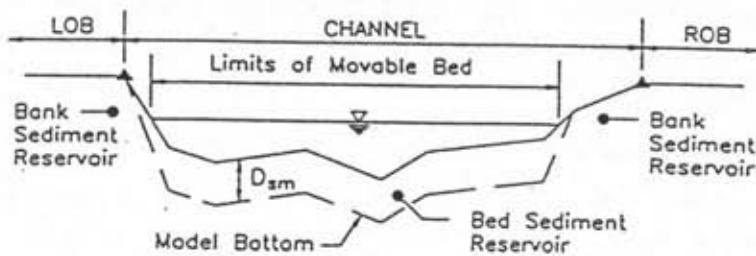
รูป 3-6 การแบ่งลำน้ำออกเป็นหน้าตัดช่วงต่าง ๆ ในการจำลองสภาพการเคลื่อนที่ตะกอน



Exner Equation $\frac{\partial G}{\partial x} + B_o \cdot \frac{\partial Y_s}{\partial (DD)} = 0$

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

รูป 3-7 รูปแบบการคำนวณสมการ Exner โดยวิธี Finite Difference



รูป 3-8 ความลึกการเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ

X = ระยะทางตามความยาวลำน้ำ

Y_s = ความลึกตะกอนในปริมาตรควบคุม

ซึ่งคำนวณสมการ Exner ได้ใช้วิธี Finite Difference ใน 2 มิติ คือระยะทางของหน้าตัดตามลำน้ำ และระยะเวลาที่คำนวณ ดังแสดงในรูป 3-7 รายละเอียดที่สำคัญอื่น ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ ในการจำลองสภาพการเคลื่อนที่ตะกอนโดย แบบจำลอง HEC-6 จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

การคำนวณการเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ ความลึกการเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ ; D_{new} กำหนดให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอเท่ากันตลอดความกว้างท้องน้ำ ที่ถูกกำหนดให้เป็นท้องน้ำเปลี่ยนแปลงเท่ากับปริมาตรของการกัดเซาะ และตกตะกอนหารด้วยความยาวช่วงลำน้ำและความกว้างท้องน้ำเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูป 3-8 และในกรณีที่ไม่มีการกำหนดความกว้างท้องน้ำเปลี่ยนแปลง จะคิดความกว้างท้องน้ำเปลี่ยนแปลงเท่ากันความกว้างผิวน้ำ

3.3 การคำนวณผิวน้ำรูปตัดการไหลในแม่น้ำ

คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์ของการไหลในทางน้ำเปิด ที่ใช้อธิบายการไหลในแม่น้ำธรรมชาติ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเคลื่อนที่ตะกอน คือ ความเร็ว ความลึก ความกว้าง และความลาดพลังงานของการไหล คุณสมบัติเชิงกลศาสตร์เหล่านี้สามารถหาได้ โดยอาศัยการคำนวณรูปตัดตามยาวผิวน้ำ (water surface profile calculations) ของการไหลเปลี่ยนแปลงในทางน้ำเปิดไม่คงรูป (varied flow in nonprismatic channels) ซึ่งจะมีสมการพื้นฐานคือสมการโมเมนตัม และ/หรือสมการพลังงาน สมการการไหลต่อเนื่อง และสูตรประสบการณ์ซึ่งสมการของ Manning เป็นสมการหนึ่งที่ยอมรับหลาย การศึกษาการเคลื่อนที่ตะกอนในแม่น้ำน่านตอนล่างในครั้ง นี้ เป็นการศึกษาแนวโน้มในระยะยาว (long term trends) ของการเคลื่อนที่ของตะกอน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำ โดยใช้แบบจำลอง HEC-6 ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกัดเซาะ และตกตะกอนในแม่น้ำและอ่างเก็บน้ำที่ใช้เป็นแบบจำลองเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับท้องน้ำในแม่น้ำน่านตอนล่างใช้วิธีการคำนวณรูปตัดการไหล โดยวิธีขั้นตอนมาตรฐาน (standard step method) ซึ่งเป็นวิธีที่

เหมาะสม สำหรับการวิเคราะห์รูปตัดตามยาวผิวน้ำ การไหลเปลี่ยนแปลงในแม่น้ำ
 ธรรมชาติแบบการไหลทิศทางเดียวคงที่ไม่สม่ำเสมอ (one dimensional, steady
 and non-uniform flow)

วิธีการขั้นตอนมาตรฐานเป็นวิธีการคำนวณเดาซ้ำซาก (trial & error)
 ซึ่งมีหลักการวิเคราะห์ คือพิจารณาจากรูป 3-5 การไหลรูปตัดตามยาวผิวน้ำการไหล
 เปลี่ยนแปลงจากหน้าตัด 1 ไปหน้าตัด 2 มีระยะทาง x ทำการคำนวณโดยเริ่มเดาค่า
 ความลึกการไหล y_1 แล้วคำนวณพลังงานของการไหลให้เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ
 (1) ซึ่งเป็นสมการพลังงานของการไหลเปลี่ยนแปลงในทางน้ำเปิด

$$Z_1 + \alpha_1(V^2/2g) = Z_2 + \alpha_2(V^2/2g) + h_f + h_e$$

เมื่อ V_1, V_2 = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลที่หน้าตัด 1 และ 2

$$Z_1 = \text{ระดับผิวน้ำที่หน้าตัด 1} = S_0 x + y_1 + z_1$$

$$Z_2 = \text{ระดับผิวน้ำที่หน้าตัด 2} = y_2 + z_2$$

α_1, α_2 = สัมประสิทธิ์ของพลังงาน (energy coefficient
 หรือ coriolis coefficient) ที่หน้าตัด 1 และ 2

z_1, z_2 = ระดับท้องน้ำที่หน้าตัด 1 และ หน้าตัด 2

h_f = การสูญเสียพลังงานจากความเสียดทาน (friction loss)

$$= 1/2(S_{f1} + S_{f2})x$$

h_e = การสูญเสียพลังงานจากการหมุนวนของกระแสน้ำ (eddy loss)

การสูญเสียพลังงานจากความเสียดทาน คำนวณโดยสมการของ Manning คือ

$$S_f = (nV/R^{2/3})^2$$

เมื่อ n = สัมประสิทธิ์ของ Manning

R = รัศมีชลศาสตร์

การสูญเสียพลังงานจากการหมุนวน คำนวณได้จาก

$$h_e = k (V^2/2g)$$

เมื่อ $(V^2/2g) =$ ผลต่างของหัวความเร็ว (velocity head) ที่สองหน้าตัด
 $k =$ สัมประสิทธิ์

- 0-0.1 สำหรับการไหลผายออก (expanding); $V_1 > V_2$
- 0.2 สำหรับการไหลบีบเข้า (contracting); $V_1 < V_2$
- 0.5 สำหรับการไหลบีบเข้า/ผายออกโดยทันทีทันใด

3.4 การเคลื่อนที่ของตะกอน

ปัจจัยที่สำคัญของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และระดับท้องน้ำของแม่น้ำตะกอนทราย คือการเคลื่อนที่ของตะกอน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับลักษณะทางชลศาสตร์การไหลในลำน้ำ และลักษณะวัสดุท้องน้ำ ดังนั้นปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอน (load) ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการทราบ โดยทั่วไปจะกล่าวถึงในหน่วยของตันต่อวัน หรือลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที เป็นต้น

การแยกประเภทของปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนโดยทั่วไปมีอยู่ 2 วิธีคือ แยกเป็นปริมาณตะกอนท้องน้ำ (bed load) และปริมาณตะกอนแขวนลอย (suspended load) ส่วนอีกวิธีหนึ่งจะแยกเป็นปริมาณตะกอนชะล้าง (wash load) และปริมาณตะกอนวัสดุท้องน้ำ (bed-material load) โดยที่ปริมาณตะกอนท้องน้ำหมายถึงส่วนของวัสดุที่เคลื่อนที่บนผิว หรือใกล้ผิวท้องน้ำในลักษณะของการกลิ้ง (rolling) การไถล (sliding) หรือการกระโดด (saltating) ไปบนผิวท้องน้ำ ซึ่งโดยไปจะเป็นส่วนของวัสดุที่เป็นกรวดและทราย โดยทั่วไปสำหรับแม่น้ำตะกอนทราย ชั้นของตะกอนท้องน้ำจะอยู่ในชั้นที่มีความสูงไม่เกิน 3 นิ้ว จากผิวท้องน้ำ ปริมาณตะกอนแขวนลอยหมายถึง ส่วนของวัสดุที่เคลื่อนที่ลอยอยู่ในชั้นอยู่เหนือชั้นของตะกอนท้องน้ำขึ้นไป โดยจะมีขนาดของเม็ดวัสดุเล็กกว่ามักจะเป็นโคลนและดินเหนียว

ปริมาณตะกอนชะล้างหมายถึง ส่วนของตะกอนที่ละเอียดมักจะเป็นดินโคลน และดินเหนียวซึ่งเป็นส่วนของวัสดุที่ไม่พบบนท้องน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดจากการชะล้างผิวลำน้ำ และผิวคินสองฝั่งเข้าสู่ลำน้ำ ดังนั้นปริมาณของตะกอนชะล้างนี้จึงไม่ขึ้นกับคุณสมบัติการไหลในลำน้ำจะขึ้นกับปริมาณการไหลเข้า (rate of supply) สำหรับปริมาณตะกอนวัสดุท้องน้ำ หมายถึงปริมาณตะกอนทั้งหมดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของวัสดุที่พบบนท้องน้ำ ซึ่ง

จะมีขนาดของเม็ดตะกอนที่โตกว่า และมีปริมาณการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการไหลในลำน้ำ

วิธีการคำนวณปริมาณตะกอนสามารถพบเห็นว่ามีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ละวิธีได้พัฒนาขึ้น เพื่อใช้กับการคาดคะเนการเคลื่อนที่ของวัสดุที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว (noncohesive material) ในสภาวะการไหลแบบคงที่สม่ำเสมอ (steady uniform flow) จึงไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับตะกอนที่เป็นวัสดุที่มีแรงยึดเหนี่ยว (cohesive material) ซึ่งโดยทั่วไปมักจะเป็นตะกอนละเอียด เนื่องจาก การเคลื่อนที่ของตะกอนเป็นขบวนการที่ยุ่งยากสลับซับซ้อนมาก จึงทำให้การคาดคะเนปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอน ไม่สามารถกระทำได้โดยอาศัยการวิเคราะห์ ในเชิงทฤษฎีเพียงอย่างเดียวดังกล่าวก่อนแล้วข้างต้น

สูตรการคำนวณปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนทั้งหลายดังที่ได้กล่าวแล้ว ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยพื้นฐานแนวความคิดที่แยกออกเป็น 3 หลักการ คือ

- 1) หลักการความเค้นเฉือน (shear stress approach) ได้แก่สูตร Toffaleti สูตร Duboys สูตร Meyer-Peter and Muller สูตร Laursen และสูตร Madden's modification of Laursen's relationship เป็นต้น
- 2) หลักการพลังงาน (Power Approach) ได้แก่สูตร Ackers-white และสูตร Yang formula เป็นต้น
- 3) หลักการพารามิเตอร์ (Parametric Approach) ได้แก่ความสัมพันธ์ของ Colby เป็นต้น

สูตรการคำนวณการเคลื่อนที่ตะกอน สามารถจำแนกประเภทตามชนิดของตะกอนที่ต้องการคาดคะเนปริมาณการเคลื่อนที่ ได้แก่ปริมาณตะกอนท้องน้ำ ปริมาณตะกอนแขวนลอย และปริมาณตะกอนวัสดุท้องน้ำ ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะสูตรที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้ เท่านั้นคือ

- 1) สูตรปริมาณตะกอนท้องน้ำ (Bed-load Formule): ได้แก่สูตร Duboys สูตร Meyer-Peter and Muller สูตร Toffaleti and Schoklitsch

- สูตร Toffaleti and Meyer-Peter and Muller และสูตร Madden's modification of Laureen's relationship
- 2) สูตรปริมาณตะกอนแขวนลอย ซึ่งในการศึกษาค้างนี้ใช้ความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองของ Krone สำหรับการคำนวณการตกตะกอนของดินโคลนและดินเหนียว และการทดลองของ Parthenaides สำหรับการกักเซาะดินโคลนและดินเหนียว
 - 3) สูตรปริมาณตะกอนวัสดุท้องน้ำคือ ความสัมพันธ์ของ Colby สูตร Acker and White สูตร Yang สูตร Toffaleti และสูตร Laursen

3.4.1 สูตรตะกอนท้องน้ำ

การพัฒนาวิธีการคาดคะเนปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนท้องน้ำนั้น ได้เริ่มต้นขึ้นในยุโรปตะวันตก ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีวัสดุในลำน้ำค่อนข้างหยาบ และได้ถูกพัฒนาในรูปของตะกอนท้องน้ำ ดังนั้นสูตรการคาดคะเนปริมาณการเคลื่อนที่ทั้งหมด จึงได้อาศัยหลักการความเค้นเฉื่อยบนผิวหน้ามาใช้ในการสร้างสูตรต่าง ๆ เหล่านี้ ความเค้นเฉื่อยคือแรงจุดต่อหน่วยพื้นที่ที่กระทำบนผิวทางน้ำ ซึ่งทำให้ตะกอนท้องน้ำเคลื่อนที่ในลักษณะกลิ้ง ไถลและบางครั้งกระโดดไปบนผิวท้องน้ำ สำหรับสูตรตะกอนท้องน้ำที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้มี 2 สูตรคือ สูตร Duboys และสูตร Meyer-Peter และ Muller ซึ่งมีรายละเอียดคือ

สูตร Duboys

Duboys ได้เสนอสูตรซึ่งพัฒนาโดยอาศัยหลักการความเค้นเฉื่อย เพื่อคาดคะเนปริมาณตะกอนท้องน้ำ; q_b

$$q_b = C_d (\tau_0 - \tau_c)$$

$$C_d = \text{ค่าสัมประสิทธิ์คุณสมบัติของตะกอน}$$

$$= 0.17 / (d_{50})^{3/4}$$

$$\tau_0 = \text{ความเค้นเฉื่อยบนท้องน้ำ} = \gamma R S_f$$

τ_c = ความเค้นเฉือนวิกฤต

$$= 0.061 + 0.093d_{50}$$

d_{50} = ค่ามัธยฐานของขนาดเม็ดวัสดุท้องน้ำ

(median grain size of bed material)

สูตร Meyer-Peter and Muller

จากผลการทดลองการเคลื่อนที่ของตะกอนชนิดทรายหยาบ ที่มีขนาดของเม็ดตะกอน 0.40 มม.-30 มม. ในรางระบาย(Flume) ในห้องทดลอง Meyer-Peter และ Muller ได้เสนอสูตรการคาดคะเนปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนท้องน้ำไว้คือ

$$q_b = 8 [((\gamma_s - \gamma) / \gamma) g d^3]^{1/2} [\gamma R S f / ((\gamma_s - \gamma) / \gamma) - 0.047]^{3/2}$$

เมื่อ γ และ γ_s = น้ำหนักจำเพาะ และน้ำในลำน้ำตามลำดับ

3.4.2 สูตรตะกอนแขวนลอย

ตะกอนแขวนลอยที่เกิดจากดินโคลนและดินเหนียว ได้ถูกแยกการคำนวณออกเป็น 2 ลักษณะ ตามพฤติกรรมของการเคลื่อนที่คือ การคำนวณการตกตะกอนและการคำนวณการกัดเซาะ ดังจะได้อธิบายต่อไปนี้

- 1) การคำนวณการตกตะกอนที่เป็นดินเหนียวและดินโคลน ใช้วิธีของ Krone ซึ่งได้เสนอสมการสำหรับคาดคะเนการตกตะกอนไว้คือ

$$c/c_0 = e^{(-k'x)}$$

เมื่อ c = ความเข้มข้นของตะกอน ณ เวลาสิ้นสุดของช่วงเวลา

c_0 = ความเข้มข้นของตะกอน ณ เวลาเริ่มต้นของช่วงเวลา

k' = $w P / 2.3 D$

- เมื่อ D = ความลึกการไหลของน้ำ
 $P_r = 1 - \tau_0 / \tau_c$
 t = เวลา
 τ_c = ความเค้นเฉือนวิกฤตขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเม็ดตะกอน
 w = ความเร็วตกตะกอน (fall velocity) ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่าง

- 2) การคำนวณการกัดเซาะสำหรับการศึกษาคั้งนี้ ใช้วิธีการที่เสนอโดย Parthenaides ซึ่งปรับปรุงเพื่อใช้ในการคาดคะเนการกัดเซาะดินโคลนและดินเหนียวคือ

$$C = (M_1 \cdot S_0 / Q \cdot c) [\tau_0 / \tau_c - 1] + C_0$$

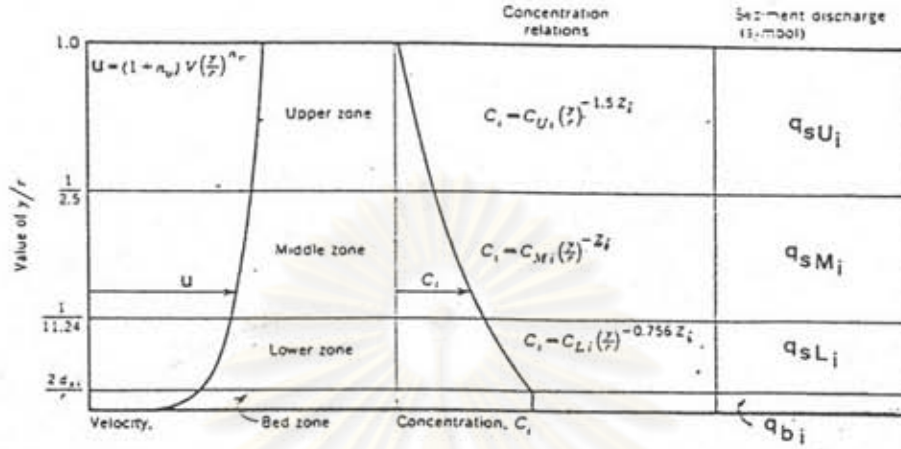
- เมื่อ C = ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย ณ เวลาเริ่มต้นของช่วงเวลา
 C_0 = ความเข้มข้นตะกอนแขวนลอย ณ เวลาสิ้นสุดของช่วงเวลา
 M_1 = อัตราการกัดเซาะของเม็ดดินแต่ละขนาด
 S_0 = พื้นที่ผิวที่มีการกัดเซาะ
 Q = อัตราการไหลของน้ำในลำน้ำ

3.4.3 สูตรตะกอนวัสดุท้องน้ำ

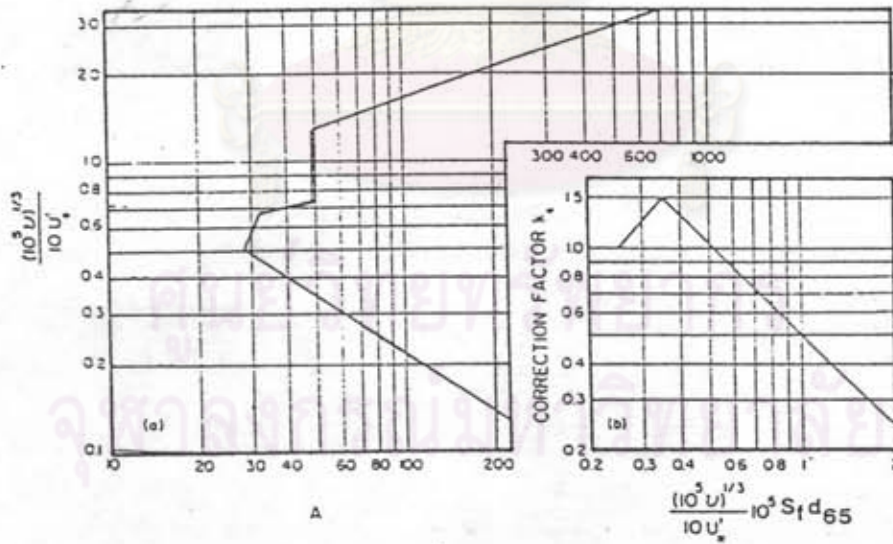
การคำนวณปริมาณตะกอนวัสดุท้องน้ำต่อการคำนวณปริมาณตะกอน รวมทั้งตะกอนแขวนลอยและตะกอนท้องน้ำ ซึ่งเกิดจากวัสดุที่พบได้ในท้องน้ำของลำน้ำ

สูตร Toffaleti

Toffaleti ได้เสนอแนวความคิดของการคำนวณปริมาณตะกอน โดยแยกออกเป็นตะกอนท้องน้ำและตะกอนแขวนลอย ซึ่งแยกออกเป็น 3 ชั้นความลึก ดังแสดงในรูป 3-9 และในแต่ละชั้นความลึกจะคำนวณหาค่าปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนแยกเป็นแต่ละขนาดชั้น (class size) ของตะกอนโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูป 3-9 แผนภาพการเคลื่อนที่ตะกอนของ Toffaletti [33]



รูป 3-10 องค์ประกอบความสัมพันธ์ของ Toffaletti [33]

$$n_v = 0.1198 + 0.00048T$$

เมื่อ u = ความเร็วที่ระดับความลึก y เหนือพื้นท้องน้ำ (ฟุต/วินาที)

R = รัศมีชลศาสตร์ของการไหล (ฟุต)

T = อุณหภูมิของน้ำ (องศาฟาเรนไฮต์)

$$z_1 = w_1 \cdot V / C_2 \cdot R \cdot S_r$$

$$C_2 = 260.67 - 0.667T$$

เมื่อ w_1 = ความเร็วการตกตะกอน (fall velocity) ของตะกอนใน
แต่ละขนาดชั้น (ฟุต/วินาที)

V = ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (ฟุต/วินาที)

S_r = ความลาดพลังงาน (energy slope) ของการไหล

สำหรับปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนแขวนลอยในแต่ละขนาดชั้นของตะกอน ใน
ชั้นล่าง (Lower Zone) q_{u1} นั้น สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ในลักษณะของสูตร
ประสพการณ์ (empirical formula)

$$q_{u1} = M_1 [(r/11.24)^{a1} - (2d_1)^{a2}] / a2$$

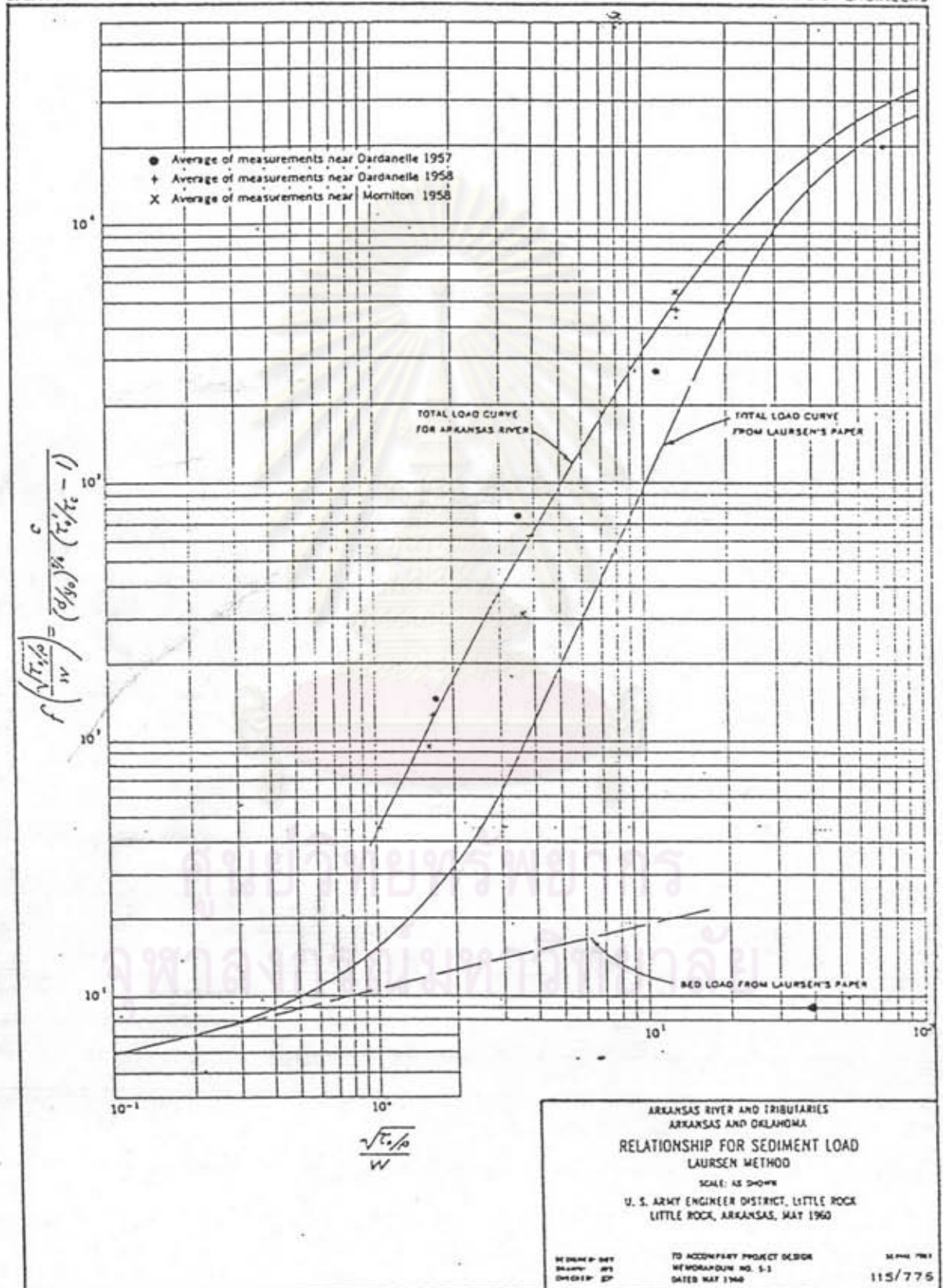
$$= 0.6p_1 / [(I_r \cdot A \cdot k_1 / V^2) (d_1 / 0.00058)^{3/3}]$$

$$\text{เมื่อ } a1 = 1 + n_v - 0.758z_1$$

$$a2 = 1 + n_v - 0.756z_1$$

$$I_r = 0.0561 + 0.000099 T$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ A และ k_1 สามารถหาได้จากรูป 3-10 เมื่อ
 ν = ความหนืดจลน์ (kinematic viscosity) ของน้ำ (ตารางฟุต/วินาที)
 u_* = ความเร็วเฉือน (shear velocity) บนท้องน้ำ เนื่องจากความหมายของ
ผิวท้องน้ำ (ฟุต/วินาที) และ d_{50} = ขนาดของเม็ดตะกอนที่ความน่าจะเป็น 65 % และ
ปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนแขวนลอย ในแต่ละขนาดชั้นในชั้นกลาง (middle zone),
 q_{u2} ; และชั้นบน (upper zone) q_{u3} และตะกอนท้องน้ำ q_{b1} สามารถหาได้ใน
ลักษณะสูตรประสพการณ์เช่นเดียวกันคือ



รูป 3-11 ความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ตะกอนของ Laursen [29]

$$q_{sH1} = M_1 (r/11.24)^{e1} [(r/2.5)^{e2} - (r/11.24)^{e2}] / (1+n_v)$$

$$q_{sH2} = M_1 (r/11.24)^{e1} (r/2.5)^{f1} [(r/2.5)^{f2} - (r/11.24)^{f2}] / f2$$

$$q_{bi} = M_1 (2d_i)^{e1}$$

ในเมื่อ $M_1 = 43.2 p_i C_{Li} (1+n_v) V_r^{0.75d_i - n_v}$ ซึ่งสามารถได้จาก
สมการคำนวณตะกอนแขวนลอยชั้นล่าง และสามารถหาค่า C_{Li} ได้เช่นกัน เมื่อทราบ
ปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนในแต่ละชั้นความลึกแล้ว สามารถหาค่าปริมาณการเคลื่อนที่
ตะกอนรวมในแต่ละขนาดชั้นตะกอน ได้จากการรวมปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนแขวนลอย
ทั้ง 3 ชั้นความลึก และตะกอนท้องน้ำได้คือ

$$q_{ci} = q_{bi} + q_{sLi} + q_{sH1} + q_{sH2} \quad \text{ตัน/วัน/ฟุต}$$

เมื่อ q_{ci} คือปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนรวมของแต่ละขนาดชั้น i ของชนิดขนาดเม็ด
ตะกอน

สูตร Laursen

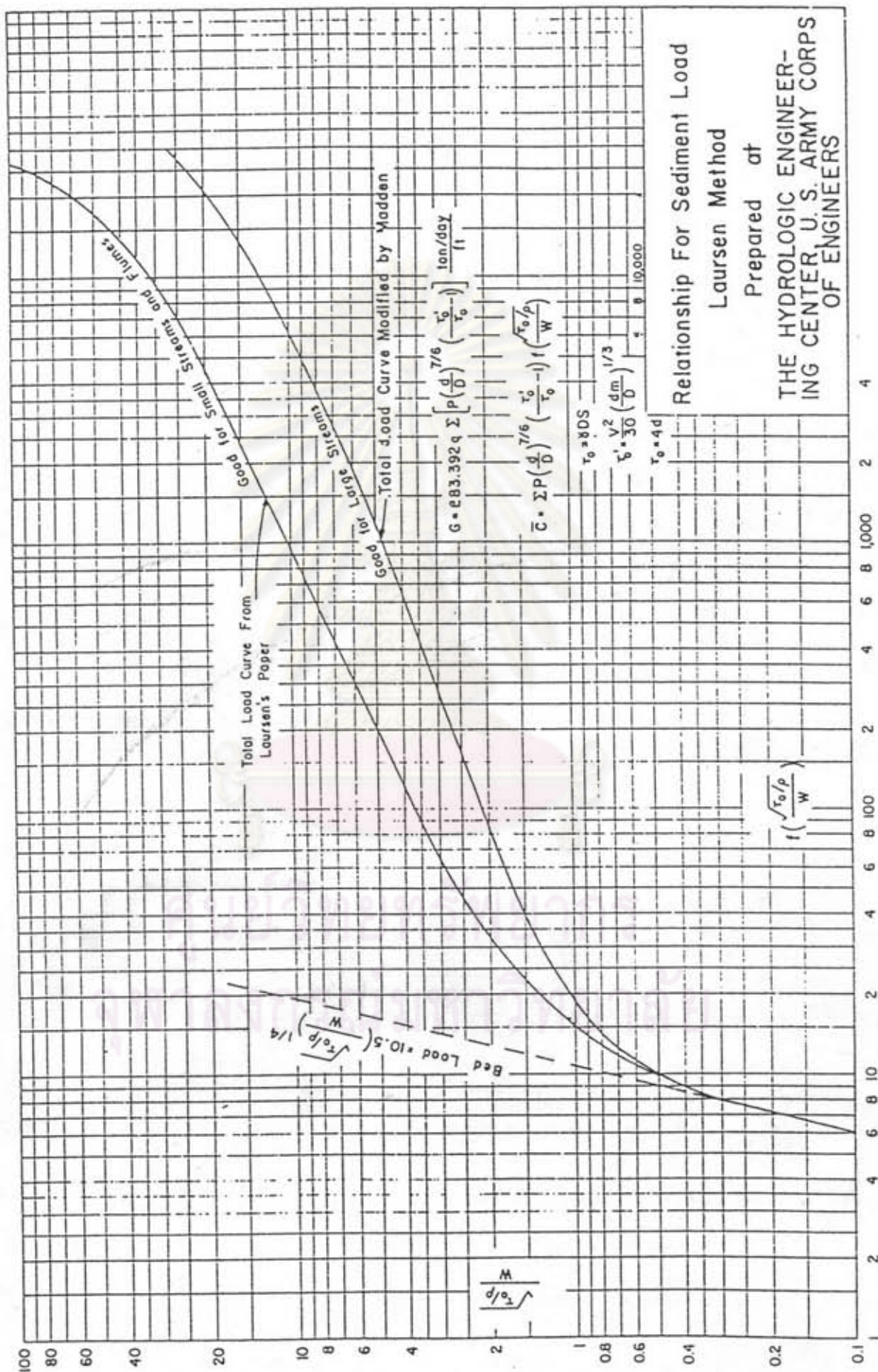
$$C_s = 0.01 [p_i (d_i/d) (\tau_0/\tau_{ci} - 1) f(U_x/w_i)]$$

$$= (V^2/58) (d_{50}/d)^{1/3}$$

$$\tau_{ci} = 0.039 (\gamma_s - \gamma) d_i$$

$$q_c = C_s \cdot q$$

ในเมื่อ C_s = ความเข้มข้นอัตราการไหลของตะกอน (sediment discharge
concentration) มีหน่วยเป็นน้ำหนักตะกอนต่อหน่วยปริมาตรของการไหลของน้ำ
 d = ความลึกการไหล d_{50} = ความเค้นเฉือนท้องน้ำ เนื่องจากขนาดเม็ดวัสดุผิวท้องน้ำ



รูป 3-12 ความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ตะกอนของ Laursen ปรับปรุงโดย Madden [3]

ของ Laursen q_{ci} = ความเค้นเฉือนวิกฤติของตะกอนในแต่ละขนาดชั้น $d_i U_{ci} = g d_i s_i$
 = ความเร็วเฉือนรวมบนท้องน้ำ w_i = ความเร็วการตกตะกอนของแต่ละขนาดชั้นตะกอน
 และฟังก์ชัน $f(U_i/w_i)$ สามารถหาได้จากรูป 3-11 ซึ่งได้จากผลการทดลองของ Laursen
 และต่อมา Maddem ได้ปรับปรุงวิธีของ Laursen สำหรับการหาค่าฟังก์ชัน $f(U_i/w_i)$
 โดยมีผลดังแสดงในรูป 3-12

สูตร Yang

สูตร Yang ในที่นี้หมายถึงสูตร Yang's Stream Power สำหรับตะกอน
 ทราบ โดยมีสูตรการคำนวณความเข้มข้นของตะกอนรวม คือ

$$\text{Log } C_t = 5.435 - 0.286 \text{Log}(w_i d_i / v) - 0.457 \text{Log}(U_i / w_i) + [1.799 - 0.409 \text{Log}(w_i d_i / v) - 0.314 \text{Log}(U_i / w_i)] \text{Log}[(V S_i / w_i) - 2.05]$$

สูตร Colby

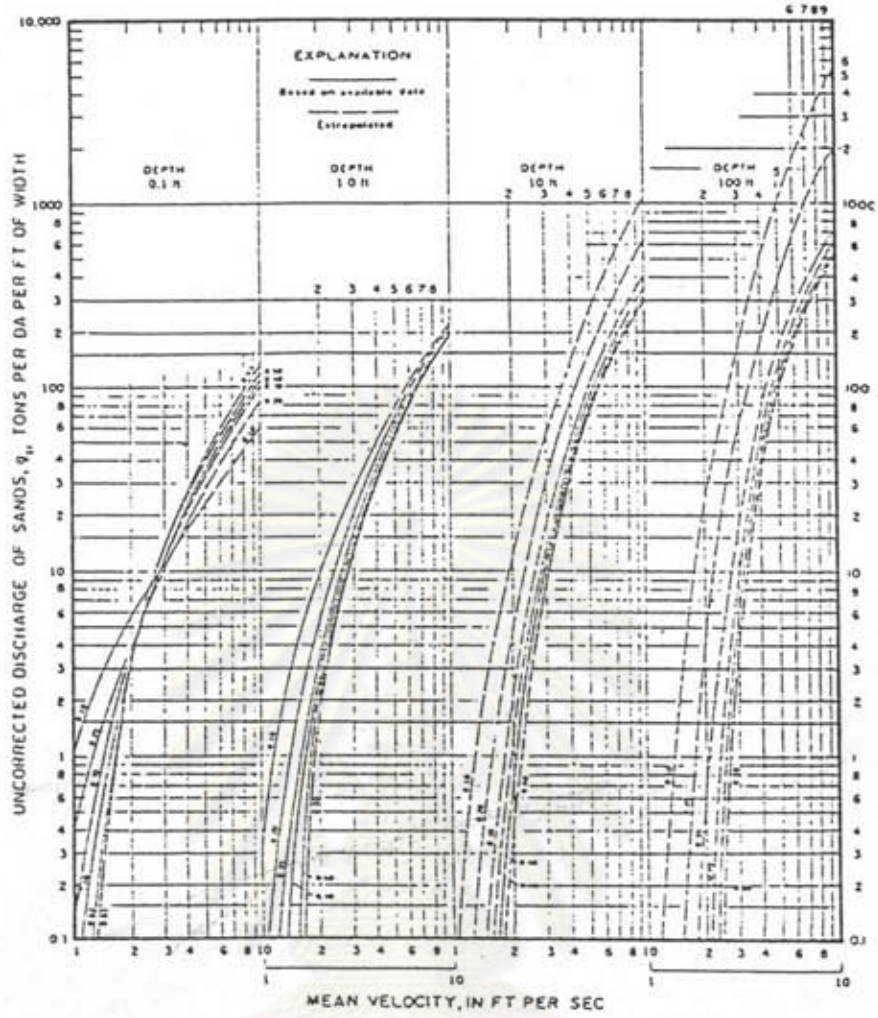
การคำนวณปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนวัสดุท้องน้ำ ตามวิธีของ Colby นี้
 เป็นวิธีการที่ได้จากการทดลองและเสนอผลในรูปของกราฟ ความสัมพันธ์ของอัตราการ
 ไหลของตะกอนรวมกับความเร็วเฉลี่ยการไหล ที่ความลึกการไหล 4 ค่า คือ 0.1
 1.0 10 และ 100 ฟุต และค่าเฉลี่ยของเม็ดตะกอน 6 ค่า คือ 0.1 0.2 0.3
 0.4 0.6 และ 0.8 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิของน้ำ 60 องศาฟาเรนไฮต์ ดังแสดงในรูป
 3-13 และกราฟสำหรับการปรับค่าอัตราการไหลของตะกอน เนื่องจากอุณหภูมิ k ความ
 เข้มข้น k_2 และค่าเฉลี่ยขนาดเม็ดตะกอน k_3 ดังแสดงในรูป 3-14 และค่าปริมาณ
 การเคลื่อนที่ของตะกอนรวมสามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$q_t = [1 + (k_1 k_2 - 1) 0.01 k_3] q_{ci}$$

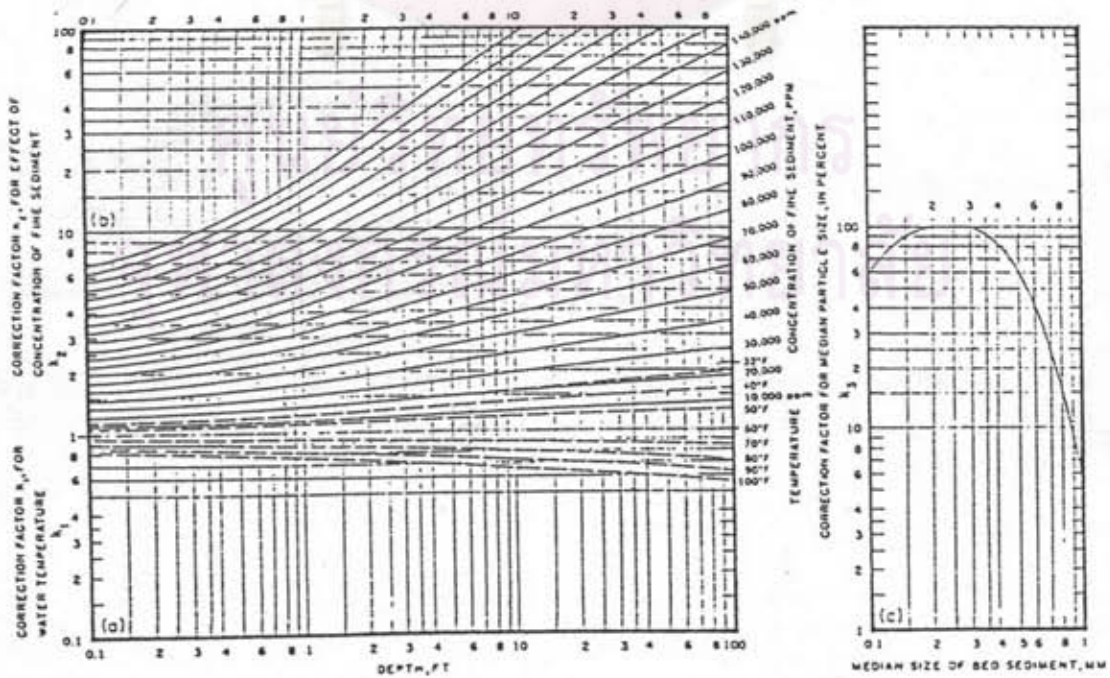
สูตร Ackers and White

Ackers, P. และ White, W.R.

ได้อาศัยหลักการพลังงานกระแสน้ำ



รูป 3-13 ความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ตะกอนของ Colby [5]



รูป 3-14 ค่าปรับแก้ของความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ตะกอนของ Colby [33]

(stream power) ศึกษาการเคลื่อนที่ของตะกอน และให้เสนอวิธีการคาดคะเนปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนรวม ในลักษณะของความเข้มข้นของตะกอนรวมในลำน้ำไว้คือ

$$C_t = c \cdot s(d/r)(V/U)^n (F_g/A-1)^m$$

$$F_g = U_g^3 / [gd(s-1)]^{1/2} [V/5.6569 \text{Log}(10r/d)]$$

$$d_g = d[g(s-1)/v]^{2/3}$$

เมื่อ c , n , A และ m คือสัมประสิทธิ์แปรผันกับค่าเส้นผ่าศูนย์กลางไว้หน่วยของตะกอน (dimensionless grain diameter) d_g ของตะกอน และ s = ความต่างจำเพาะของตะกอน R = รัศมีชลศาสตร์ของการไหล

สัมประสิทธิ์	$d_g > 60$	$60 \geq d_g > 1$
c	0.025	$\text{Log} c = 2.86 \text{Log} d_g - (\text{Log} d_g)^2 - 3.53$
n	0	$1 - 0.56 \text{Log} d_g$
A	0.170	$0.23 / (d_g)^{1/2} + 0.14$
m	1.500	$9.66 / d_g + 1.34$

สูตร Schoklitsch

สูตร Schoklitsch ได้พัฒนาโดยอาศัยผลการทดลองในรางน้ำขนาดเล็ก (small flume) โดยมีค่าเฉลี่ยของเม็ดตะกอนอยู่ระหว่าง 0.3-5.0 มม และให้เสนอสูตรคาดคะเนปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนรวมคือ

$$q_t = [25.3 p_1 (q_i - q_{ci})] / (d_i)^{3/2}$$

$$q_{ci} = 0.638 (d_i / S_r)^{4/3}$$

3.5 การประเมินผลวิธีการคำนวณปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอน

การวิเคราะห์ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแม่น้ำ (river morphology)

changing) นั้นจำเป็นต้องทราบปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอน ซึ่งเป็นขบวนการที่มีความสลับซับซ้อน การคำนวณปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอน ต้องอาศัยการคำนวณด้วยวิธีทฤษฎีผสมประสมการณ คือวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนกับคุณสมบัติเชิงกลศาสตร์การไหลของน้ำในลำน้ำ และคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุท้องน้ำ (bed material) ที่เกี่ยวข้องกับเคลื่อนที่ตะกอน แล้วทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบปรับค่าสัมประสิทธิ์บางอย่าง โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ และจากของจริงในสนาม จึงพบว่าแต่ละวิธีการนั้นจะมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาสมมุติฐานข้อจำกัด และความเหมาะสมของวิธีการที่จะนำมาใช้ หลักการพิจารณา โดยทั่วไปสามารถพิจารณาได้จาก 2 หลักการใหญ่ ๆ คือ

- 1) การพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุท้องน้ำ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ตะกอน ซึ่งนับเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการพิจารณาเลือกวิธีการคำนวณการเคลื่อนที่ตะกอนที่เหมาะสม มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนที่ตะกอนของแม่น้ำนั้น ๆ โดยทั่วไปจะพิจารณาจากขนาดมีชฐานของเม็ดวัสดุท้องน้ำ (D_s) ความถ่วงจำเพาะ (S_s) และขนาดโดยเฉลี่ยของเม็ดวัสดุท้องน้ำ (D_m) ดังแสดงในตาราง 3-1
- 2) การศึกษาประเมินผลวิธีการคำนวณปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนวิธีต่าง ๆ โดยอาศัย การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอนวิธีต่าง ๆ กับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ และสำรวจจริงในสนามนั้น เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยให้สามารถเลือก วิธีการคำนวณการเคลื่อนที่ตะกอนมาใช้ได้เหมาะสม กับแม่น้ำที่ต้องการศึกษาได้ดียิ่งขึ้น

White et al. (1973) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีของ Ackers-White, Engeland-Hondsen, Rotter และ Einstein กับข้อมูลที่ได้จากการทดลองวัดในห้องปฏิบัติการ (840 ชุด) ข้อมูลจากแม่น้ำธรรมชาติ (260 ชุด) และข้อมูลตะกอนที่เป็นวัสดุเบา (light-weight material) (180 ชุด) พบว่าวิธีของ Acker-white ให้ผลการคำนวณที่ดีที่สุด [4] ดังแสดงในตารางที่ 3-2 โดยมีค่าอัตราส่วนของค่าจากคำนวณ/ค่าจากการตรวจวัด อยู่ระหว่าง 0.5-2.0

ตาราง 3-1 ตัวอย่างวิธีการคำนวณปริมาณการเคลื่อนตะกอน

สูตร (ค.ศ.)	ขนาดวัสดุท้องน้ำที่เหมาะสม	
	d_{min} (มม.)	d_{max} (มม.)
Du Boys (1879)		
Schoklitsch (1935)	0.30	5.00
Shields (1936)	1.56	2.50
Kalinske (1947)	0.50	
<u>Meyer-Peter, Muller (1948)</u>	<u>0.40</u>	<u>30.00</u>
Einstein, Brown (1950)	0.30	28.60
Laursen (1958)	0.10	4.08
Rottner (1959)		
Shinohara, Tsubaki (1959)	0.40	30.00
Colby (1964)	0.10	1.00
Bagnold (1966)	0.79	30.00
Blench regime (1966)	0.30	7.00
Engelund, Hansen (1967)	0.19	0.93
Toffaletti (1969)	0.12	0.93
Ackers, White (1972)	0.04	4.00
Yang (1973)	0.06	2.00
Parker et al. (1982)	18.00	28.00
Yang (1984)	2.00	10.00

ตาราง 3-2 คุณสมบัติของ แม่น้ำ Colorado และ แม่น้ำ Niobrara

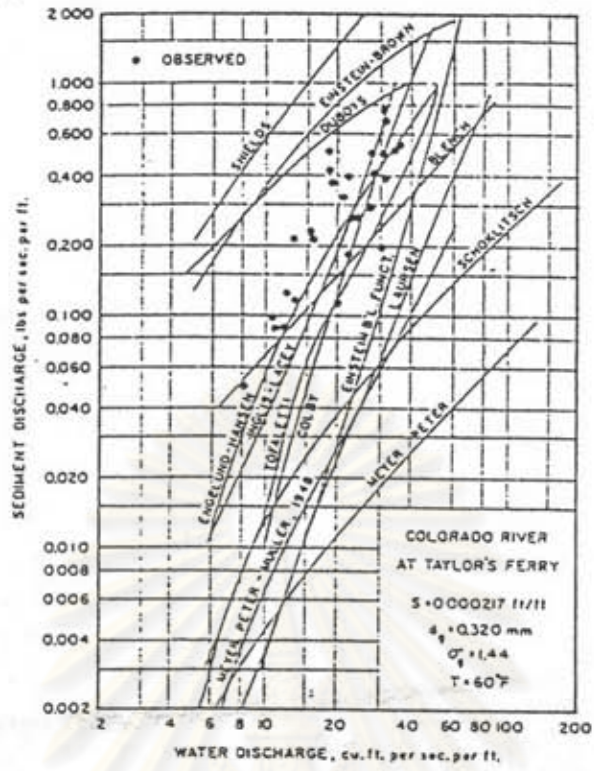
ข้อมูล	แม่น้ำ	
	Colorado	Niobrara
ความลึก (ฟุต)	4-12	0.7-1.3
อัตราการไหลต่อหน่วยความกว้าง(ฟุต ³ /วินาที/ฟุต)	8-35	1.7-5.0
ความกว้างเฉลี่ย (ฟุต)	350	110
ความลาดชันต่อน้ำต่ำสุด (ฟุต/ฟุต)	0.000147	0.000116
ความลาดชันต่อน้ำสูงสุด (ฟุต/ฟุต)	0.000333	0.000126
ความลาดชันต่อน้ำที่ใช้ในการคำนวณ (ฟุต/ฟุต)	0.000217	0.000129
อุณหภูมิของน้ำต่ำสุด (° F)	48	33
อุณหภูมิของน้ำสูงสุด (° F)	81	86
อุณหภูมิของน้ำที่ใช้ในการคำนวณ (° F)	60	60
ค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของขนาดเม็ดวัสดุต่อน้ำ (มม.)	0.320	0.283
d ₃₅ (มม.)	0.287	0.233
d ₅₀ (มม.)	0.330	0.277
d ₆₅ (มม.)	0.378	0.335
d ₁₀₀ (มม.)	0.530	0.530
ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของขนาดเม็ดวัสดุต่อน้ำ (มม.)	0.396	0.342

Vanoni, V.A (1975) ได้เสนอผลการศึกษาเปรียบเทียบผลการคำนวณ ปริมาณการเคลื่อนที่ตะกอน 13 วิธี กับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในแม่น้ำ Colorado และ Niobrara ซึ่งมีรายละเอียดของแม่น้ำทั้งสองดังแสดงในตาราง 3-2 และมีผลการ ศึกษาเปรียบเทียบดังแสดงในรูป 3-15 และรูป 3-16 พบว่าวิธีการของ Colby, Toffaleti และ Engelund-Hansen ให้ผลการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือที่สุด [33]

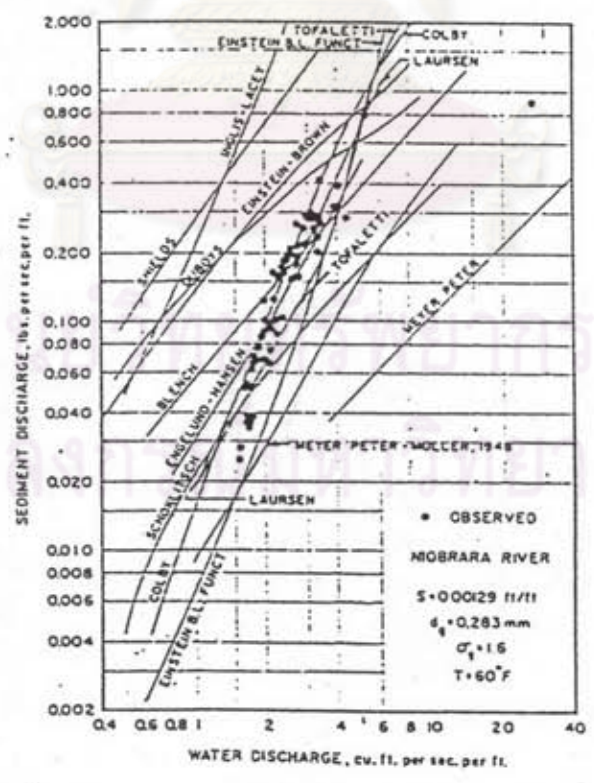
Alonso, G.V. (1980) ได้ทำการทดสอบวิธีการต่าง ๆ จำนวน 8 วิธี มี รายละเอียดผลการทดสอบดังแสดงในตาราง 3-3 [5] โดยวิธีการ MPME หมายถึงวิธี ของ Meyer-Peter-Muller

Brownlie, W.A. (1981) ได้ทำการทดสอบวิธีการต่าง ๆ จำนวน 14 วิธี และมีผลการทดสอบดังแสดงในรูป 3-17 ซึ่งวิธีของ Brownlie จะให้ผลที่ดีที่สุด แต่ อย่างไรก็ตาม Brownlie ได้ใช้ค่า ส.ป.ส.ต่าง ๆ จากการตรวจวัดในครั้งนี้ [5]

จากการศึกษาเปรียบเทียบจะพบว่า มีวิธีการคำนวณที่น่าเชื่อถืออยู่หลายวิธี คือวิธีของ Engelund-Hansen, Colby, Brownlie, Yang และ Acker-White ดังกล่าวแล้ว แต่อย่างไรก็ตามวิธีของ Engelund-Hansen และ Colby จะมีความ เหมาะสมกับตะกอนทรายที่มีลักษณะเป็นทรายขนาดปานกลาง (medium sand) ดังแสดง ในตาราง 3-3 วิธีการของ Brownlie มีผลการทดสอบกับข้อมูลเฉพาะที่ทำการทดสอบ โดย Brownlie เท่านั้น [5] สำหรับวิธีของ Yang นั้นจะมีข้อจำกัดคือ จะเหมาะ สำหรับตะกอนทรายที่มีความต่างจำเพาะประมาณ 2.65 เท่านั้น [26, 27] สำหรับวิธี ของ Acker-White (1973) นั้น เป็นวิธีซึ่งได้รับการทดสอบอย่างกว้างขวางกับข้อมูล จากการทดลองในห้องปฏิบัติการและของจริงในสนาม ให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าเชื่อถือประกอบด้วย มีความเหมาะสมกับตะกอนท้องน้ำ ที่มีลักษณะเป็นทรายละเอียดถึงกรวดละเอียด (0.04 มม.-4.00 มม.) ดังแสดงในตาราง 3-2 รวมทั้งมีความเหมาะสมทั้งตะกอน ท้องน้ำ ที่มีลักษณะเป็นทรายและวัสดุน้ำหนักเบา (lightweight material)



รูป 3-15 ผลการทดสอบความเหมาะสมวิธีการคำนวณการเคลื่อนที่ตะกอนในแม่น้ำ Colorado [33]

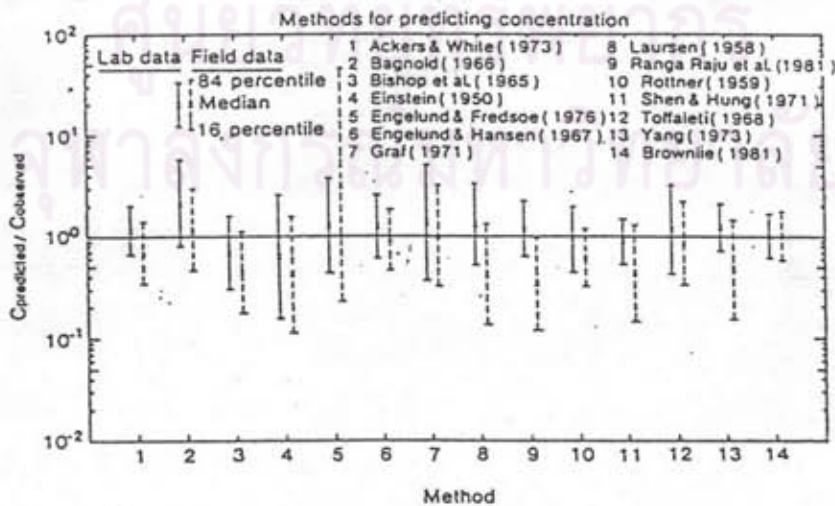


รูป 3-16 ผลการทดสอบความเหมาะสมวิธีการคำนวณการเคลื่อนที่ตะกอนในแม่น้ำ Niobrara [33]

ตาราง 3-3 การทดสอบความเหมาะสมวิธีการคำนวณการเคลื่อนที่ของตะกอน [5]

Analysis of Discrepancy Ratio Distribution of Different Transport Formulas (Alonso, 1980)

Formula	Number of Tests	Ratio Between Predicted and Measured Load			Standard Deviation	Percentage of Tests with Ratio Between $\frac{1}{2}$ and 2
		Mean	95% Confidence Limits of the Mean			
<i>Field Data</i>						
Ackers-White	40	1.27	1.05	1.48	0.68	87.8
Engelund-Hansen	40	1.46	1.28	1.64	0.56	82.9
Laursen	40	0.65	0.49	0.80	0.48	56.1
MPME	40	0.83	0.50	1.15	1.02	58.5
Yang	40	1.01	0.89	1.13	0.39	92.7
Bagnold	40	0.39	0.31	0.47	0.26	32.0
Meyer-Peter-Muller	40	0.24	0.22	0.27	0.09	0
Yalin	40	2.59	2.08	3.11	1.62	46.3
<i>Flume Data with D/d ≥ 70</i>						
Ackers-White	177	1.34	1.24	1.54	1.29	73.0
Engelund-Hansen	177	0.73	0.63	0.83	0.68	51.1
Laursen	177	0.81	0.73	0.88	0.51	71.4
MPME	177	3.11	2.95	3.52	2.75	42.1
Yang	177	0.99	0.93	1.08	0.60	79.8
Bagnold	177	0.85	0.81	1.22	2.50	20.8
Meyer-Peter-Muller	177	0.40	0.39	0.47	0.49	18.5
Yalin	177	1.62	1.38	2.23	4.08	32.6
<i>Flume Data with D/d < 70</i>						
Ackers-White	48	1.12	0.93	1.28	0.52	89.6
Engelund-Hansen	48	0.75	0.59	0.90	0.50	66.7
Laursen	48	1.04	0.76	1.32	0.99	79.2
MPME	48	1.34	1.04	1.64	1.04	66.7
Yang	48	0.90	0.79	1.05	0.51	85.4
Bagnold	48	1.53	1.46	1.87	1.14	45.8
Meyer-Peter-Muller	48	1.03	1.00	1.27	0.83	72.9
Yalin	48	1.92	1.45	2.41	1.65	64.6



รูป 3-17 การทดสอบความเหมาะสมวิธีการคำนวณการเคลื่อนที่ของตะกอน [5]