ภาคผนวก ข

ความสัมพันธ์ที่ใช้คำนวณการเคลื่อนตัวของตะกอน

1. Meyer-Peter and Muller Formula (1948)

Meyer-Peter and Muller ได้พัฒนาการเคลื่อนตัวของตะกอนขึ้นมาจากการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้รางน้ำขนาดต่างๆ ระหว่าง 15 เซนติเมตร 2 เมตร ความลึกของน้ำเปลี่ยนแปลงระหว่าง 1 เซนติเมตร ถึง 120 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลของตะกอนอยู่ระหว่าง 6.4 มิลลิเมตร ถึง 30 มิลลิเมตร และความถ่วงจำเพาะของตะกอนอยู่ระหว่า 1.25 จนถึงมากกว่า 4 ดังนั้น สูตรนี้จึงเหมาะที่จะใช้กับตะกอนหยาบและมีตะกอนแขวนลอยน้อย ซึ่งนิยมใช้อย่างกว้างขวางในยุโรป

สำหรับสมการของ Meyer-Peter and Muller (1948) แสดงอยู่ในรูปเทอมไร้หน่วย (Dimensionless Formula) ซึ่งความหมายทางกายภาพของเทอมต่าง ๆ ซึ่งติดอยู่ในรูปของ $(\gamma_s - \gamma)d_m$ ดังแสดงต่อไปนี้

Bed-Load Discharge Effective shear Criticak Shear ซึ่งในสมการพื้นฐานนี้ ปริมาณการไหลของตะกอนท้องน้ำ q_b เป็นน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยเวลาและต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของลำน้ำ

$$\underbrace{\left\langle \frac{q_b(\gamma_s-\gamma)}{\gamma_s} \right\rangle^{2/3} \left\langle \frac{\gamma}{g} \right\rangle^{1/3} \left\langle \frac{0.25}{(\gamma_s-\gamma)d_m} \right\rangle}_{\text{I}} = \underbrace{\frac{(k/k')^{3/2}\gamma RS}{(\gamma_s-\gamma)d_m}}_{\text{II}} \underbrace{- 0.047}_{\text{III}} \qquad \text{(ข-1)}$$

Bed-Load discharge — Effective shear — Critical shear

โดยที่ q_b = ปริมาณการไหลของตะกอนต่อหนึ่งหน่วยเวลาต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของการไหล

d_m = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของส่วนผสมของตะกอน

$$d_m = \sum_i p_i . d_i \qquad \text{(ข-2)}$$

i = ดัชนีบอกขนาดตะกอน

d_i = ขนาดเฉลี่ยของตะกอนขนาดที่ i

p_i = อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตะกอนขนาด d_i ต่อตะกอนทั้งหมด

k' และ k = เป็นสัมประสิทธิ์แทนความขรุขระของ Manning ในสมการต่อไปนี้

$$U = k R^{2/3} \sqrt{S} \qquad \text{(ข-3)}$$

$$U = k' R^{2/3} \sqrt{S'} \qquad \text{(ข-4)}$$

γ_s และ γ = แรงเฉื่อนซึ่งเกิดจากความขรุขระของเม็ดวัสดุและค่าแรงเฉื่อนวิกฤต

U = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลผ่านรูปตัดขวางลำน้ำ

R = รัศมีชลศาสตร์

S = ลาดความสูญเสียพลังงานทั้งหมด

S' = ลาดความสูญเสียพลังงานทั้งหมดเนื่องจากความขรุขระของเม็ดวัสดุ ซึ่งค่าของ k' อาจหาได้จากสมการของ Strickler ดังนี้

$$k' = \frac{26}{(d_{90})^{1/6}} \qquad \text{(ข-5)}$$

d = ขนาดของตะแกรงซึ่ง 90% ของวัสดุท้องน้ำมีขนาดเล็กกว่าในหน่วยเมตรซึ่งสูตรของ Strickler ใช้ได้เฉพาะกรณีที่ d เป็นเมตรและหน่วยเวลาเป็นวินาที

ในเทอมที่ I ของสมการ (ข-1) จะแทนปริมาณการไหลของตะกอนท้องน้ำ ต่อหน่วยความกว้างของลำน้ำซึ่งเป็นน้ำหนักใต้น้ำและอยู่ในรูปของ $(\gamma_s - \gamma)d_m$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแรงเฉื่อนซึ่งเกิดจากความขรุขระของเม็ดวัสดุ (เทอมที่ II) ลบด้วยค่าแรงเฉื่อนวิกฤต (เทอมที่ III) ซึ่งแรงเฉื่อนต่อเม็ดวัสดุจะมีผลโดยตรงต่อการเคลื่อนตัวของตะกอน อย่างไรก็ตามความขรุขระเนื่องจากรูปร่างของท้องน้ำ (Form Roughness) จะมีผลต่อค่าแรงเฉื่อนเช่นกันทั้งนี้เพราะจะมีผลกระทบต่อความลึกของน้ำ อัตราส่วนของ k/k' เป็นอัตราส่วนที่ใช้แสดงถึงส่วนของแรงเฉื่อนเม็ดตะกอนในรูปสัดส่วนของแรงเฉื่อนทั้งหมด (แรงเฉื่อนเม็ดตะกอนบวกแรงเฉื่อนเนื่องจากรูปร่างท้องน้ำ) ค่าของ k/k' จะเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0.5 ถึง 1.0 โดยค่า 0.5 สำหรับกรณีความขรุขระเนื่องจากรูปร่างของท้องน้ำมีผลมากและ 1.0 สำหรับกรณีไม่มีผลจากความขรุขระรูปร่างของท้องน้ำ ลักษณะรูปร่างของท้องน้ำได้แก่ Dunes และ Ripples มักจะมีผลต่อท้องน้ำที่เป็นทราย และจะเกิดขึ้นได้ยากกรณีที่ท้องน้ำเป็นวัสดุหยาบซึ่งปกติความขรุขระส่วนใหญ่จะมีผลเนื่องจากเม็ดตะกอน ในเทอมที่ III เป็นค่าแรงเฉื่อนวิกฤติคล้ายกับแรงเฉื่อนวิกฤติของ Shields

2. Yang's Stream Power (1973)

Yang (1972) ได้สร้างความสัมพันธ์ของปริมาณการไหลของวัสดุท้องน้ำ (ตะกอนแขวนลอยบวก ตะกอนท้องน้ำ) กับการสลายพลังงานของการไหล ให้เป็นตัวการในการเคลื่อนตัวของตะกอน สำหรับการไหลคงที่แบบสม่ำเสมอจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ ดังนั้นอัตราการสลายพลังงานจึงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์เพียงอย่างเดียว อัตราการสลายพลังงานศักย์ ต่อหน่วยน้ำหนักของน้ำในช่วงระยะการไหล X กับการลงระดับของท้องน้ำ Z แสดงได้ในรูปสมการดังนี้

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dx}{dt}\frac{dz}{dx} = US \qquad \text{(ข-6)}$$

ซึ่งผลคูณ ความเร็ว-ความลาด (Velocity-Slope Product) ในสมการ (ข-6) ถูกอ้างถึงในฐานะเป็นหน่วยกระแสกำลัง (Unit Stream power) เนื่องจากการเคลื่อนตัวของตะกอนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขการไหลแบบปั่นป่วน ความเข้มข้นของตะกอนทั้งหมดต้องมีความสัมพันธ์โดยตรงกับหน่วยกระแสกำลัง

Yang และ Molinas (1982) ได้ทำรายละเอียดเพื่อแสดงว่า ความสัมพันธ์โดยตรงนี้สามารถได้จากทฤษฎีพื้นฐานของการไหลปั่นป่วน

รูปแบบพื้นฐานของสมการหน่วยกระแสกำลังของ Yang เป็นดังนี้

$$\log C_s = M + N \log \frac{US}{W_s} \qquad \text{(ข-7)}$$

โดยที่ M และ N เป็นตัวแปรไร้หน่วย สัมพันธ์กับการไหลและคุณลักษณะของตะกอน และ W_s เป็นความเร็วของการตกตะกอน สัมประสิทธิ์ M และ N หาได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอยของข้อมูลในห้องปฏิบัติการหลาย ๆ ชุด จนในปี 1973 Yang ได้เสนอการสำหรับการเคลื่อนตัวของทราย ดังนี้

$$\log C_s = 5.435 - 0.286 \log \frac{W_s d}{\nu} - 0.457 \log \frac{U_*}{W_s}$$
$$+ \left(1.799 - 0.409 \log \frac{W_s d}{\nu} - 0.314 \log \frac{U_*}{W_s} \right) \log \left(\frac{US}{W_s} - \frac{U_s S}{W_s} \right) \qquad \text{(ข-8)}$$

โดยที่ C เป็นความเข้มข้นในหน่วยส่วนต่อล้านส่วน (PPM) โดยน้ำหนักและในปี 1984 Yang ได้พัฒนาสมการสำหรับคำนวณการเคลื่อนตัวของตะกอนที่เป็นกรวด ดังสมการต่อไปนี้

$$\log C_s = 6.681 - 0.633 \log \frac{W_s d}{\nu} - 4.816 \log \frac{U_*}{W_s}$$
$$+ \left(2.784 - 0.305 \log \frac{W_s d}{\nu} - 0.282 \log \frac{U_*}{W_s} \right) \log \left(\frac{US}{W_s} - \frac{U_s S}{W_s} \right) \qquad \text{(ข-9)}$$

ความเร็วเฉลี่ยสำหรับการเริ่มเคลื่อนตัวของตะกอน U ในสมการ (ข-8) และ (ข-9) แสดงในรูปของ ความเร็วในการตกตะกอน W อัตราส่วนของความเร็วสองค่าซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกัน ถูกสร้างเป็นความสัมพันธ์กับ Shear Reynolds Number โดย Yang (1973) สำหรับกรณีผิวเรียบในขอบเขตของการไหลเปลี่ยนแปลง (Transition Regions) ซึ่งมีค่า Shear Reynolds Number อยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 70 อัตราส่วนของความเร็วทั้งสองค่าอยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$\frac{U_c}{W_c} = \frac{2.5}{\log(U_* d / \nu) - 0.06} + 0.66, \quad 1.2 < \frac{U_* d}{\nu} < 70 \qquad \text{(ข-10)}$$

ในช่วงที่มีความขรุขระโดยสมบูรณ์ ที่ Reynolds Number มากกว่า 70 อัตราส่วนของความเร็วทั้งสองค่าจะมีค่าคงที่ คือ

$$\frac{U_c}{W_c} = 2.05, \qquad 70 \le \frac{U_* d}{\nu} \tag{ข-11}$$

ซึ่งหลักเกณฑ์ สำหรับความเร็วที่ทำให้ตะกอนเริ่มเคลื่อนที่นี้ ได้รับการพิสูจน์ด้วยผลการทดลองจากการศึกษาของ Talapatra และ Ghosh (1983)

สมการสำหรับทรายและกรวด สมการ (ข-8) และสมการ (ข-9) จะมีรูปแบบเดียวกันแต่แตกต่างกันในค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดเม็ดตะกอนที่แตกต่างกันของทรายและกรวด สมการสำหับทรายจะใช้เมื่อขนาดของเม็ดตะกอนเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร นอกจากนั้นให้ใช้สมการของกรวด อย่างไรก็ตามขนาดใหญ่ที่สุดไม่ควรเกิน 10 มิลลิเมตร ในกรณีของตะกอนคละกัน ความเข้มข้นทั้งหมดของวัสดุท้องน้ำหาได้จาก

$$C_s = \sum_{i=t}^{a} p_i C_{si} \tag{ข-12}$$

3. Ackers-White Formula (1973)

อาศัยหลักการกระแสกำลัง (Stream Power) ของ Bagnold, Ackers and White (1973) ได้สร้างความสัมพันธ์ความเข้มข้นของการไหลของวัสดุท้องน้ำ ในรูปฟังก์ชัน Mobility Number, F_g ดังนี้คือ

$$C_s = cs \frac{d}{R}\left(\frac{U}{U_*}\right)^n \left(\frac{F_g}{A} - 1\right)^m \tag{ข-13}$$

โดยที่ n, c, A และ m เป็นสัมประสิทธิ์ โดยที่ Mobility Number อยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$F_g = \frac{U_*^n}{\sqrt{gd(s-1)}}\left[\frac{U}{\sqrt{32}\log(10R/d)}\right]^{1-m} \tag{ข-14}$$

เขาได้กระจายขนาดของตะกอนในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลางไร้หน่วย d_g ดังสมการ

$$d_g = d\left[\frac{g(s-1)}{\nu^2}\right]^{1/3} \tag{ข-15}$$

โดยที่เป็นความหนืดพลศาสตร์ (Kinematics Viscosity) ของน้ำ ในการวิเคราะห์หาแฟคเตอร์ของการเคลื่อนที่ (Mobility Factor) สำหรับการเคลื่อนตัวของตะกอน พวกเขาได้แยกระหว่างตะกอนท้องน้ำและ

ตะกอนแขวนลอย การเคลื่อนตัวของตะกอนหยาบในรูปของตะกอนท้องน้ำ เนื่องมาจากกระแสกำลังซึ่งทำให้เกิดแรง แรงเฉือนต่อเม็ดตะกอน, U ซึ่งมีผลต่อส่วนที่สองของ F_g ในสมการ (ข-14) สำหรับตะกอนละเอียดซึ่งส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ไปแบบแขวนลอยความเข้มของการไหลแบบอลวน ซึ่งพยุงตะกอนแขวนลอยถูกสมมติให้เป็นฟังก์ชันของแรงเฉือนท้องน้ำทั้งหมด ดังนั้นกระแสกำลังจึงเป็น U ส่วนแรกของ F_g แสดงถึงกำลังที่มีความสอดคล้องกับความเข้มของการไหลแบบอลวน สัมประสิทธิ์ n เป็นกำลังในช่วงการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดตะกอน n จะมีค่าเมื่อมีการเคลื่อนตัวของตะกอนทั้ง 2 กลุ่ม และจะมีค่าเป็นศูนย์สำหรับตะกอนหยาบซึ่งเป็นตะกอนท้องน้ำเพียงอย่างเดียว ค่าสัมประสิทธิ์ A อาจจะแสดงถึงค่าวิกฤติสำหรับ F_g

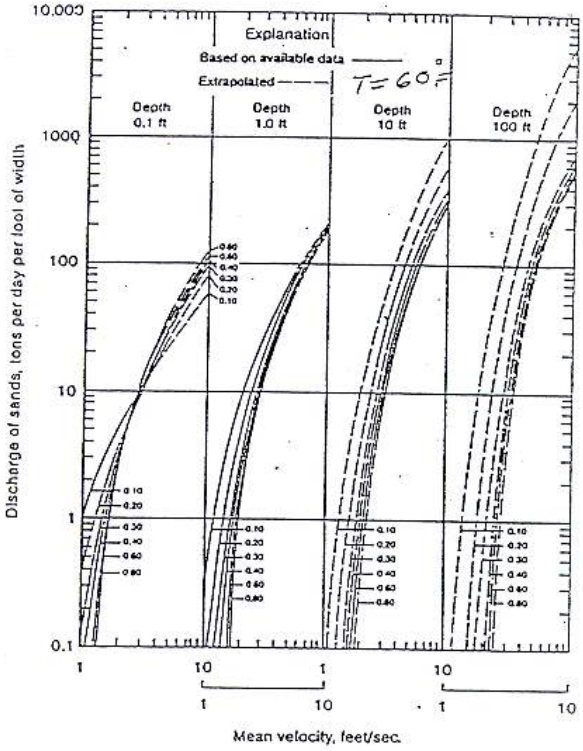
ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ หาได้จากการเลือกโค้งที่ดีที่สุดจากกราฟ ของข้อมูลจากการทดลอง 1000 ชุด ซึ่งขนาดของตะกอนใหญ่กว่า 0.04 มม. และ Froude Number น้อยกว่า 0.8 ค่าสัมประสิทพธิ์ต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง ข-1

ตาราง ข-1 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในฟังก์ชันการเคลื่อนตัวของตะกอนของ Ackers-White

สัมประสิทธิ์	$d_g > 60$	$60 \quad d_g > 1$
C	0.025	Log C = 2.861 log d_g – (log d_g)^2 – 3.53
n	0.00	1 - 0.56 log d_g
A	0.17	0.23 / (d_g) ½ + 0.14
m	1.50	9.66 / d_g + 1.34

4. The Colby Relations (1964)

อัตราการไหลของวัสดุท้องน้ำ (ตะกอนท้องน้ำ + ตะกอนแขวนลอย) ต่อหน่วยความกว้างของลำน้ำที่เสนอโดย Colby (1964) เป็นฟังก์ชันของความเร็วเฉลี่ย, ความลึก, ขนาดเฉลี่ยของตะกอน, อุณหภูมิและความ

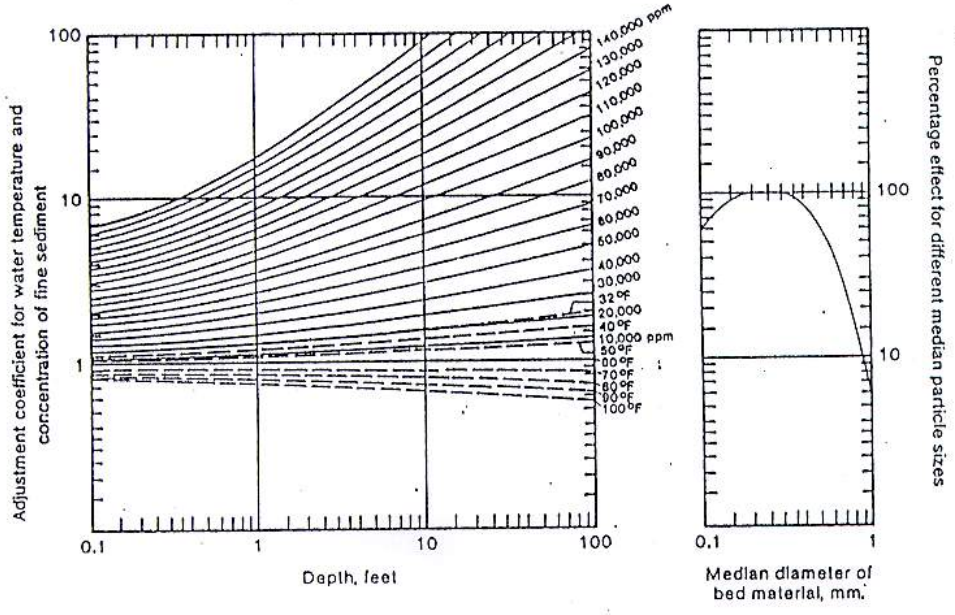


ภาพประกอบ ข-1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของทรายกับความเร็วเฉลี่ยของการไหล (Colby, 1964) สำหรับเม็ดตะกอน 6 ขนาด, ความลึกของการไหล 4 ค่า และอุณหภูมิของน้ำ 60° ฟาเรนไฮท์

เข้มข้นของตะกอนละเอียด (Silt and Clay) ตัวแปรเหล่านี้จะมีผลครอบคลุมต่อการเคลื่อนตัวของตะกอน เนื่องจากกระแสกำลังและแรงเฉือน

ตัวแปรเหล่านี้ถูกรวมไว้ในความสัมพันธ์ของกราฟ 4 ชุด ดังแสดงในภาพประกอบ ข-1 , ข-2 และ ข-3 ช่วงที่สามารถใช้กราฟเหล่านี้ได้จะถูกจำกัดด้วยตัวแปรแต่ละตัวที่มีอยู่ในกราฟรูปแรกจะให้ค่าอัตราการไหลของวัสดุท้องน้ำที่ยังไม่ได้แก้ไข q_{s1} ในเทอมของความเร็วเฉลี่ยสำหรับค่าเฉลี่ยปานกลางของวัสดุท้องน้ำ 6 ค่า ความลึกของการไหล 4 ค่าและอุณหภูมิของน้ำ 60° F ในการใช้กราฟความสัมพันธ์รูปนี้ ถ้าความลึกที่แท้จริงต่างไปจากความลึก 4 ค่าที่ให้ การหาค่า q_{s1} สามารถทำได้โดยการอ่านค่า q_{s1} สำหรับความเร็วที่แท้จริงจากกราฟที่ความลึกสองค่าที่คร่อมความลึกที่แท้จริง จากนั้นก็ทำการเทียบหาค่า (Interpolation) โดยกระทำบนกราฟล็อกระหว่าง q_{s1} กับ D เพื่อหาค่า q_{s1} สำหรับค่าความลึก (D) และความเร็วเฉลี่ย (U) ที่แท้จริง

อัตราการไหลของตะกอนที่ยังไม่ถูกต้องที่ได้จะเป็นค่าที่ถูกต้อง เฉพาะสำหรับขนาดเฉลี่ยปานกลางของตะกอนอยู่ระหว่าง 0.2 และ 0.3 มม. อุณหภูมิ 60°F และตัดความเข้มข้นของตะกอนละเอียดออกไป แต่ถ้าเงื่อนไขจริง ๆ แตกต่างไปจากนี้ก็จะต้องแก้ไขค่าที่ได้โดยใช้แฟกเตอร κ_1 สำหรับแก้ไขเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิและ k_2 สำหรับแก้ไขเนื่องจากผลของความเข้มข้นของตะกอนเม็ดละเอียด ซึ่งได้ดูจากภาพประกอบ ข-2 สำหรับการแก้ไขผลเนื่องจากขนาด



ภาพประกอบ ข-2 ผลของอุณหภูมิของน้ำและความเข้มข้นของตะกอนละเอียดต่อความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของทรายกับความเร็วเฉลี่ย (Colby, 1964)

เฉลี่ยปานกลางของเม็ดวัสดุท้องน้ำใช้ค่า k_3 ซึ่งให้ไว้ในกราฟภาพประกอบ ข-2 เช่นกัน ดังนั้นค่าอัตราการไหลของตะกอนที่ถูกต้อง q_s คำนวณได้ดังนี้

$$q_s = \left[1 + \left(k_1 k_2 - 1\right) 0.01 k_3\right] q_{s1} \qquad \text{(ข-16)}$$

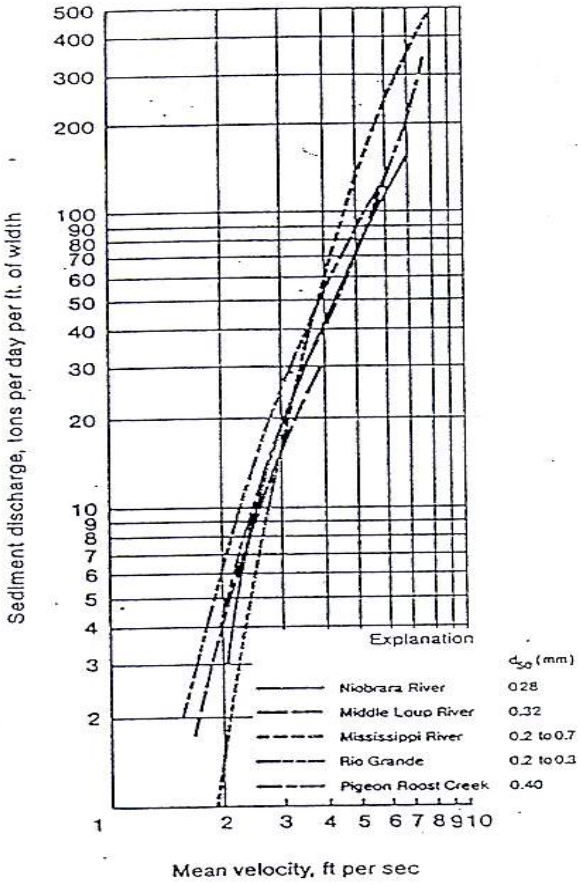
โดยที่ k_1 = สัมประสิทธิ์ปรับแก้เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ

k_2 = สัมประสิทธิ์ปรับแก้เนื่องจากผลของความเข้มข้นของตะกอนเม็ดละเอียด

k_3 = สัมประสิทธิ์ปรับแก้เนื่องจากผลของขนาดเฉลี่ยปานกลางของเม็ดวัสดุท้องน้ำ

q_{s1} = ค่าอัตราการไหลของวัสดุท้องน้ำที่ยังไม่ได้แก้ไข

Colby ยังได้เสนอกราฟความสัมพันธ์แบบง่ายดังแสดงในภาพประกอบ ข-3 โดยให้ค่าอัตราการไหลของทรายต่อหน่วยความกว้างในรูปฟังก์ชันของความเร็วเฉลี่ยสำหรับท้องน้ำที่เป็นทราย 5 ขนาดและอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 60° F ซึ่งกราฟรูปนี้ Colby แนะนำให้ใช้เพื่อเช็คการคำนวณทั้งหมด



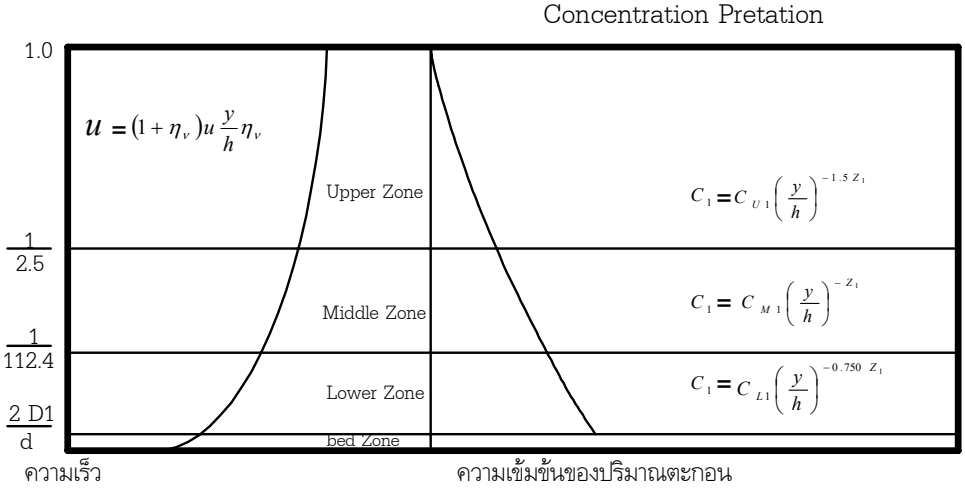
ภาพประกอบ ข-3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของทรายกับความเร็วเฉลี่ยของการไหล
สำหรับทรายของท้องน้ำ 5 ลำน้ำ ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 60° ฟาเรนไฮท์ (Colby, 1964)

แบบหยาบ ๆ ในการพัฒนาความสัมพันธ์ของกราฟเหล่านี้ Colby ได้รับแนวทางจาก Einstein Bed-Load Function และใช้ข้อมูลจำนวนมากจากลำน้ำจริงและรางน้ำทดลองและรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้โดย Guy et al. (1966) และ Brooks (1958) ในกรณีข้อมูลตะกอนจากแม่น้ำใหญ่ เช่น แม่น้ำโคโลราโดและแม่น้ำมิสซิสซปปี้ ใช้เพียงข้อมูลตะกอนแขวนลอย และใช้การประมาณอัตราการไหลและบวกเพิ่มเป็นอัตราการไหลของตะกอนทั้งหมด

5. Toffaleti 's formula (1969)

จากการใช้แนวความคิดที่คล้ายกันกับการพัฒนาความสัมพันธ์โดย Einstein ตะกอนท้องน้ำได้ถูกแบ่งออกเป็นสัดส่วนตามขนาดมาตรฐานและสมการต่าง ๆ สำหรับการแผ่กระจายความเข้มข้นตะกอนต่อสัดส่วนขนาดตะกอน จะแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนตอนบน (upper zone) ส่วนตอนกลาง (middle zone) ส่วนตอนล่าง (lower zone) และส่วนท้องน้ำ (bed zone) ดังแสดงในภาพประกอบ ข-4 การหาปริมาณการเคลื่อนย้ายตะกอนต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของลำน้ำต้องทำการคำนวณการแผ่กระจายของความเข้มข้น

ตะกอน สำหรับขนาดแต่ละส่วนของตะกอนและนำเอาผลการคำนวณที่ได้ในแต่ละส่วนมารวมกันเป็นค่าการเคลื่อนย้ายของตะกอนรวมทั้งหมด



ภาพประกอบ ข-4 ความสัมพันธ์ของความเร็วความเข้มข้นของปริมาณตะกอนและปริมาณตะกอน

สำหรับสูตรของ Toffaleti (1969)

จากภาพประกอบ ข-4 ระดับเส้นระดับความเร็ว (Velocity Profile) จะแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานดังนี้

$$u = (1+\eta_v)u\frac{y}{h}\eta_v \qquad \text{(ข-17)}$$

โดยที่ค่า η_v คำนวณจากสมการ

$$\eta_v = 0.1198 + 0.00048\ T \qquad \text{(ข-18)}$$

เมื่อ T = อุณหภูมิของน้ำ มีหน่วยเป็นองศาฟาเรนไฮท์

การแพร่กระจายความเข้มข้นตะกอนของสัดส่วนแต่ละขนาดตะกอนกำหนดโดยความสัมพันธ์พลังงานสำหรับแต่ละส่วนของ 3 ส่วนตอนบนตามลำดับ ดังนี้คือ

$$C_1 = C_{L1}\left(\frac{y}{h}\right)^{-0.750Z_1} \qquad \text{(ข-19)}$$

$$C_1 = C_{M1}\left(\frac{y}{h}\right)^{-Z_1} \quad \text{(ข-20)}$$

$$C_1 = C_{U1}\left(\frac{y}{h}\right)^{-1.5Z_1} \quad \text{(ข-21)}$$

เมื่อ C_{L1}, C_{m1}, C_{U1} = ความเข้มข้นตะกอนที่ส่วนตอนล่าง ส่วนตอนกลางและส่วนตอนบน ตามลำดับ

ค่าของ Z_1 ในสมการ (ข-19) และสมการ (ข-21) กำหนดโดย

$$Z_1 = \frac{W_1 u}{C_Z hS} \quad \text{(ข-22)}$$

เมื่อ W_1 = ความเร็วการตกตะกอนของตะกอนขนาด D_1

S = ความลาดเทท้องน้ำ

และ C_Z กำหนดโดยสมการต่อไปนี้ คือ

$$C_Z = 260.67 - 0.667\ T \quad \text{(ข-23)}$$

ปริมาณการไหลของตะกอนแขวนลอยต่อหนึ่งหน่วยความกว้างของลำน้ำ q_s สำหรับการไหล 2 มิติ กำหนดตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$q_s = \int u.\overline{C}.dy \quad \text{(ข-24)}$$

โดยการอินทิเกรทสมการ ข-19 ถึงสมการ ข-21 โดยเทียบกับ y ในสมการ ข-24 ปริมาณตะกอนแขวนลอยต่อหนึ่งหน่วยความกว้าง ในส่วนตอนล่าง ส่วนตอนกลางและส่วนตอนบน สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G_A = M\left(YA^{F4} - DD^{F4}\right)F4 \quad \text{(ข-25)}$$

$$G_B = MYA^{F4-F5}\left(YB^{F5} - YA^{F5}\right)/\ F5 \quad \text{(ข-26)}$$

$$G_C = MYA^{F4-F5}YB^{F5-F6}\left(h^{F6} - YB^{F6}\right)/\ F6 \quad \text{(ข-27)}$$

โดยที่

$$M = 43.2\ P_1.C_{L1}\left(1+\eta_v\right) uh^{0.756\ Z_1} - \eta_v \qquad \text{(ข-28)}$$

เมื่อ

G_A, G_B และ G_C =ปริมาณตะกอนแขวนลอยต่อหนึ่งหน่วยความกว้างในส่วนตอนล่าง ตอนกลางและตอนบน

P_1 = สัดส่วนโดยน้ำหนักของตะกอนวัสดุท้องน้ำ

DD = ความหนาแน่นของตะกอนวัสดุท้องน้ำ (= $2D_1$)

$F4 = 1 + \eta_v - 0.756 z_1$

$F5 = 1 + \eta_v - z_1$

$F6 = 1 + \eta_v - 1.5 z_i$

$YA\ \ YB =$ระยะจากท้องน้ำถึงขอบเขตตอนบนของส่วนตอนล่างและส่วนตอนกลาง ซึ่งก็คือ $h/11.24$ และ $h/2.5$ ตามลำดับ

สำหรับส่วนท้องน้ำ ปริมาณตะกอนท้องน้ำ q_b จะให้เป็นผลคูณของ P_1 ความเข้มข้นตะกอนและความเร็วตะกอนที่ระยะ $u =$ $2D_1$, และที่ระยะ $2D_1$ นี้จะได้ค่า

$$q_b = M\ .\ DD^{F4} \qquad \text{(ข-29)}$$

ปริมาณตะกอนทั้งหมดสำหรับสัดส่วนแต่ละขนาดรวมกันจะได้

$$G = q_b + G_A + G_B + G_C \qquad \text{(ข-30)}$$

ในสมการ (ข-28) ตัวไม่ทราบค่า C_{L1} ในที่นี้ปริมาณตะกอนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$q_{sL1} = \frac{0.600\, P_1}{\left(\frac{T_T.A_C.K}{u^2}\right)^{5/3}\left(\frac{D_1}{0.00058}\right)^{5/3}} \qquad \text{(ข-31)}$$

สมการ ข-29 สำหรับ $D_1 < 0.00029$ ฟุต สมการ 81 จะลดรูปเป็น

$$q_{sL1} = \frac{1.095}{\left(\frac{T_T.A_C.K}{u^2}\right)^{5/3}} \qquad \text{(ข-32)}$$

เมื่อ

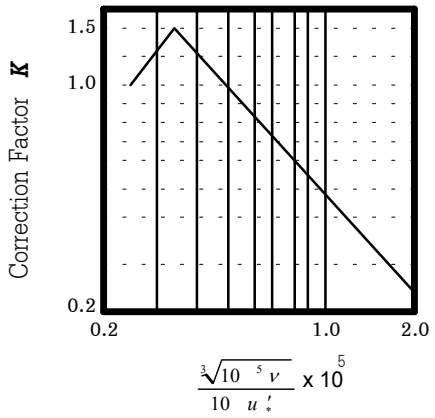
T_T = 1.1 (0.051 + 0.009 T)

u' = ความเร็วเฉือนเนื่องจากความขรุขระของอนุภาคตะกอน (ดูภาพประกอบ ข-6)

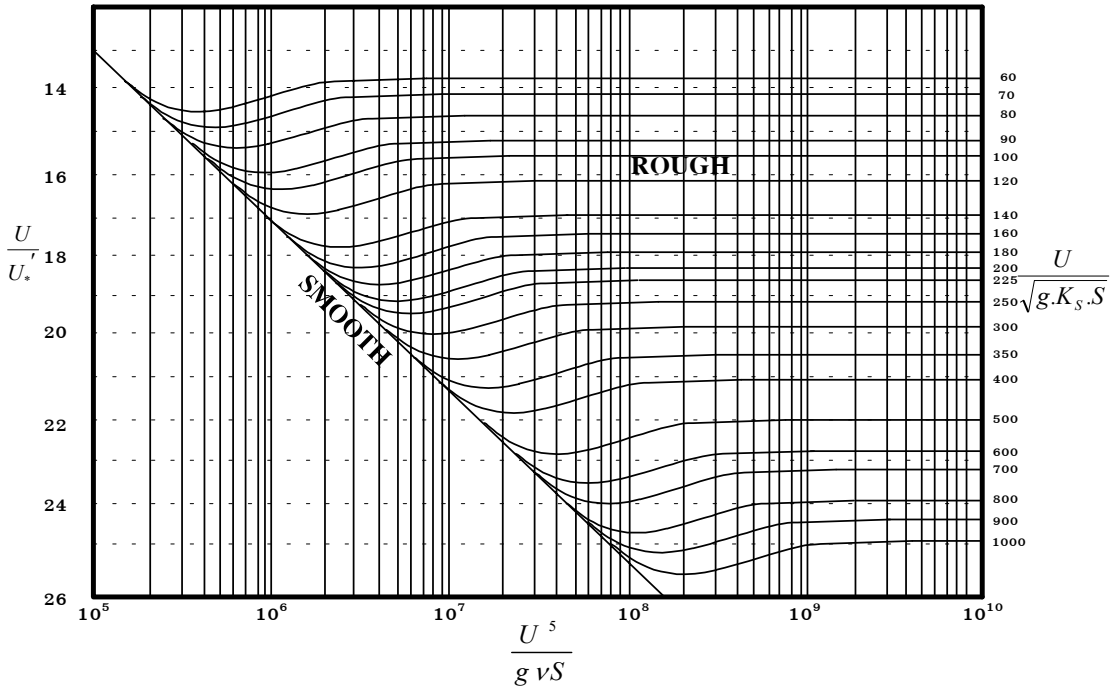
A_C = ฟังก์ชันขึ้นอยู่กับ $\dfrac{\sqrt[3]{10^5 \nu}}{10 u_*'}$ (ดูภาพประกอบ ข-7)

K = แฟกเตอร์ปรับแก้ (ดูภาพประกอบ ข-5)

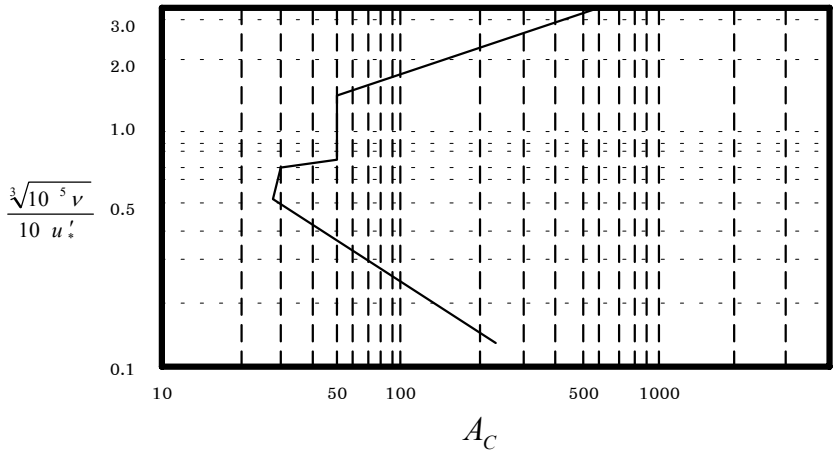
<u>หมายเหตุ</u> ค่าต่าง ๆ เป็นหน่วยอังกฤษ



ภาพประกอบ ข-5 เฟกเตอร์ปรับแก้ ในสูตรของ Toffaleti (1969)



ภาพประกอบ ข-6 กราฟสำหรับของ U_* ในสูตรของ Einstein-Barbarossa



ภาพประกอบ ข-7 ค่าเฟกเตอร์ของ A_C ในสูตรของ Toffaleti (1969)