



การพัฒนาและการทดลองใช้อุปกรณ์วัดการแทรกซึมน้ำแบบมีแรงดึงกลับ

Development and Performance Test of a Tension Infiltrometer

วิสุทธิ์ วีรสาร¹ อาณัติ เฮงเจริญ¹ และ เกวลิน ศรีจันทร์¹

Visoot Verasan¹ Anut Hengcharoen¹ and Kavalin Srichan¹

บทคัดย่อ

อุปกรณ์วัดการแทรกซึมน้ำแบบมีแรงดึงกลับได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้งานที่ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก การเคลื่อนย้าย การติดตั้ง การใช้งาน และการดูแลรักษาง่าย สามารถใช้ศึกษาการแทรกซึมน้ำของดินที่แรงดึงกลับในช่วง 0-200 mm ซึ่งเป็นช่วงของ matric head ขณะที่มีการไหลส่วนใหญ่ของน้ำฝนหรือน้ำชลประทานผ่านดิน

อุปกรณ์นี้สามารถใช้ประโยชน์ในการศึกษาสมบัติ hydrodynamic characteristics ของดินชั้นผิว เช่น ประเมินค่าพารามิเตอร์ C_1 และ C_2 ตามสมการของ Vandervaere *et al.* (2000) โดยผู้ใช้ต้องทราบค่าสถานะขอบเขตของการทำงาน คือ matric head หรือความชื้นของดินชั้นผิวรวมทั้งความชื้นเดิมของดินก่อนการให้น้ำ

นอกจากนี้ยังอาจใช้วัดค่า saturated hydraulic conductivity (K_s) และ hydraulic conductivity function, $K(h)$ ตามรูปแบบของ Gardner (1958) ในช่วง matric head 0-200 mm ของน้ำได้ด้วย

คำสำคัญ : อัตราการแทรกซึมน้ำ, อุปกรณ์วัดการแทรกซึมน้ำแบบมีแรงดึงกลับ

Abstract

A tension infiltrometer was developed at the Department of Soil Science, Kasetsart University, KamphaengSan Campus. Designed as a small-scale device, it is convenient for transportation, easy to assemble and making measurements, and having few trouble shootings. It is handy for measurements of infiltration in the range of 0-200 mm of water tension which cover major flow of water from rain and irrigation through soil surface. The device can be used to examine the hydrodynamic characteristics of surface soils, for instance, to evaluate the parameters C_1 and C_2 of the infiltration equation proposed by Vandervaere *et al.* (2000), provided that the users can define the boundary condition (the matric head) and the initial soil moisture content pertinent to their applications. It can also be used to evaluate the saturated hydraulic conductivity, K_s and the hydraulic conductivity function, $K(h)$ according to the

Keywords : Tension disc infiltrometer, infiltration, soil hydrodynamic characteristics, saturated hydraulic conductivity, hydraulic conductivity function.

¹ ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

¹ Department of Soil Science, Faculty of Agriculture at KamphaengSan, Kasetsart University, Nakompatom. 73140

model proposed by Gardner (1958) in the range of 0-200 mm matric heads.

คำนำ

สมบัติทางชลศาสตร์ของดินซึ่งควบคุมการไหลของน้ำผ่านดินชั้นผิวมีความสำคัญสำหรับงานวิจัยทางด้านปฐพีวิทยา และสาขาอื่นๆ ดังนั้นจึงมีความต้องการอุปกรณ์สำหรับวัดค่าสมบัติทางชลศาสตร์ของดินที่ติดตั้งได้ง่าย มีวิธีการวัดที่สะดวก และได้ค่าที่ถูกต้อง อุปกรณ์ที่นิยมใช้กันคือ tension disc infiltrometer ซึ่งนำเสนอโดย Perroux and White (1988) มีความสามารถวัดสมบัติทางชลศาสตร์ของดินภาคสนามขณะไม่อิ่มตัวด้วยน้ำได้โดยไม่ต้องเก็บตัวอย่างมาประเมินในห้องปฏิบัติการ ค่าที่วัดได้จึงไม่มีความคลาดเคลื่อนสืบเนื่องจากการเก็บและการเคลื่อนย้ายตัวอย่างดิน การวัดสมบัติทางชลศาสตร์ของดินโดยใช้ tension disc infiltrometer ยังมีข้อได้เปรียบอื่นๆ อีกคืออุปกรณ์มีขนาดเล็ก เคลื่อนย้ายได้ง่าย ใช้น้ำปริมาณน้อยในการวัด ทำให้วัดได้หลายจุดในสนามโดยสะดวก เหมาะสมสำหรับใช้ศึกษาการผันแปรเชิงพื้นที่ (spatial variation) ของสมบัติทางชลศาสตร์ของดิน

เมื่อเร็วๆ นี้ Decagon Devices Inc. (2011) ได้ผลิต tension infiltrometer ชนิด Mini Disc ซึ่งมีการออกแบบที่รวมหอควบคุมแรงดึงน้ำ (bubbling tower) เข้าเป็นชิ้นเดียวกับแหล่งจ่ายน้ำ (water reservoir) ทำให้อุปกรณ์มีรูปร่างเล็กกะทัดรัด เคลื่อนย้ายได้สะดวก ติดตั้งง่ายและมีจุดวัดซึมน้อยมาก

อุปกรณ์วัดการแทรกซึมน้ำชนิดนี้มีแรงดึงกลับของภาควิชาปฐพีวิทยา อาศัยหลักการรวมหอควบคุมแรงดึงน้ำกับหลอดจ่ายน้ำแบบ Mini Disc ของ Decagon Devices Inc. และหลักการประเมิน

สมบัติทางชลศาสตร์ของ Hussen and Warrick (1993) และ Vandervaere *et al.* (2000) สามารถใช้ประเมินสมบัติทางชลศาสตร์ของดิน อาทิ สภาพน้ำน้ำขณะดินอิ่มตัว ฟังก์ชันสภาพน้ำของดิน (hydraulic conductivity function) รวมทั้งปริมาณแทรกซึมน้ำสะสม และอัตราการแทรกซึมน้ำได้อย่างสะดวกในช่วงแรงดึงกลับ 0-200 mm ของน้ำ

วัตถุประสงค์

1. พัฒนาอุปกรณ์วัดการแทรกซึมน้ำแบบมีแรงดึงกลับขึ้นสำหรับใช้งาน
2. ทดลองใช้อุปกรณ์ข้างต้นศึกษาการประเมินสมบัติทางชลศาสตร์ของดิน เช่น สภาพน้ำน้ำเมื่ออิ่มตัว (K_s) และฟังก์ชันสภาพน้ำ ($K(h)$) ตามวิธีของ Hussen and Warrick (1993) รวมทั้งพารามิเตอร์ C_1 และ C_2 ตามสมการแทรกซึมน้ำของ Vandervaere *et al.* (2000)

การตรวจเอกสาร

หลักการพื้นฐานของการใช้ tension infiltrometer วัดสภาพน้ำของดิน

สภาพน้ำของดินมี 2 ประเภท คือ สภาพน้ำน้ำขณะดินอิ่มตัว (saturated hydraulic conductivity, K_s) และสภาพน้ำน้ำขณะดินไม่อิ่มตัว (unsaturated hydraulic conductivity, $K(h)$) ซึ่งอาจเรียกว่า hydraulic conductivity function เนื่องจากเป็นสมบัติทางชลศาสตร์ของดินที่ผันแปรตามแรงขับวัสดุพื้น (matric head, h) หรือระดับความชื้นของดิน (θ) การใช้ tension infiltrometer ประเมิน hydraulic conductivity function อาศัยสมการพื้นฐานของ Wooding (1968) ซึ่งแสดงความ



สัมพันธ์ระหว่างอัตราการแทรกซึมน้ำที่สภาวะคงที่ (steady-state infiltration rate, i_∞) แบบ 3 มิติ ออกจากแหล่งจ่ายน้ำรูปจานกลมที่วางบนผิวดิน ซึ่งผันแปรตามสภาพน้ำในขณะนั้นและขนาดรัศมีของจานจ่ายน้ำตามสมการ

$$i_\infty = K(h_0) + \frac{4\phi}{\pi R} \quad (1)$$

เมื่อ $K(h_0)$ คือสภาพน้ำแบบไม่อิ่มตัวที่ matric head ซึ่งตั้งไว้เท่ากับ $h_0 < 0$, R คือรัศมีของจานจ่ายน้ำ โดย ϕ มีความสัมพันธ์กับ $K(h)$ ตามสมการ

$$\phi = \int_{h_n}^{h_0} K(h)dh \quad (2)$$

0 และ n แทนสภาวะตรงจุดให้น้ำและสภาวะเดิมของดิน ตามลำดับ Vandervaere *et al.* (2000) คำนวณค่า ϕ เมื่อใช้ hydraulic conductivity function, $K(h)$ ของ Gardner (1958) กล่าวคือ

$$K(h) = K_s e^{\alpha h} \quad (3)$$

เมื่อ K_s คือสภาพน้ำที่จุดอิ่มตัว (saturated hydraulic conductivity) และ α คือ shape parameter โดยตั้งสมมุติฐานว่า $K(h_n)$ มีค่าต่ำกว่า $K(h_0)$ มาก เขาพบว่าสมการ (1) จะเปลี่ยนรูปเป็น

$$i = K_s e^{\alpha h} \left[1 + \frac{4}{\pi R \alpha} \right] \quad (4)$$

ในที่นี้ใช้ i แทน i_∞ และใช้ h แทน h_0

สมการ (4) มีตัวไม่ทราบค่าที่ต้องประเมินอยู่ 2 ตัวคือ K_s และ α กรณีที่สามารถปรับค่าแรงดึงน้ำกลับ (tension) ของ infiltrometer ได้ ก็อาจใช้วิธีประเมินพารามิเตอร์ข้างต้นแบบ 2-head method ที่เสนอโดย Hussen and Warrick (1993) ได้ โดยการปฏิบัติดังนี้ กำหนดให้ใช้ head ต่างกัน 2 ค่าคือ h_1 และ h_2 (ซึ่งมีค่า $> h_1$) และวัดค่า steady-state infiltration rate ได้ i_1 และ i_2 ตามลำดับ การปฏิบัติ

ข้างต้นทำให้เขียนสมการ (4) ได้ 2 ครั้งเป็น

$$i_1 = K_s e^{\alpha h_1} \left[1 + \frac{4}{\pi R \alpha} \right] \quad (5)$$

และ

$$i_2 = K_s e^{\alpha h_2} \left[1 + \frac{4}{\pi R \alpha} \right] \quad (6)$$

จากสมการ (5) และ (6) สามารถคำนวณ α ได้ตามสมการ

$$\alpha = \frac{1n(i_2/i_1)}{(h_2-h_1)} \quad (7)$$

นำค่า α กลับไปแทนในสมการ (5) หรือ (6) เพื่อคำนวณ K_s เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ทั้งคู่แล้วก็สามารถสร้าง hydraulic conductivity function ได้ตามสมการ (3)

หลักการพื้นฐานของการใช้ tension infiltrometer ศึกษาการแทรกซึมน้ำของดิน

การแทรกซึมน้ำ (infiltration) หมายถึง การเคลื่อนที่ของน้ำจากภายนอกดินผ่านผิวดินเข้าไปภายใน ปริมาณที่ตรวจวัดได้มี 2 ประเภทคือปริมาณแทรกซึมน้ำสะสม (cumulative infiltration, I) และอัตราการแทรกซึมน้ำ (infiltration rate, i) ซึ่งเป็นปริมาณที่ผันแปรตามเวลา โดยทั่วไปการวัดการแทรกซึมน้ำมักกำหนดให้ pressure head ที่ผิวดินมีค่าเป็นศูนย์ หรือเป็นบวกเล็กน้อย ไม่เกิน 2 cm และกำหนดว่าการวัดกระทำในขณะที่ดินมีความชื้นเดิมค่อนข้างต่ำ

สมการที่ใช้ประเมินการแทรกซึมน้ำสะสมที่รู้จักกันดีคือที่เสนอโดย Philip (1957) เพื่อประเมิน cumulative infiltration, I ที่ผันแปรตามเวลา t สำหรับการไหลแบบ 1 มิติ (I_{1D}) ในแนวตั้ง

$$I_{1D} = S_1 \sqrt{t} + At \quad (8)$$

ในที่นี้ S คือ sorptivity ของดินและ A เป็นค่าคงที่สัมพันธ์กับสภาพน้ำ (hydraulic conductivity) ของดินขณะนั้น

Smettem *et al.* (1994) ได้เสนอว่า กรณีการไหลแบบสมมาตรตามแนวแกนชนิด 3 มิติ (axisymmetric 3D flow) เช่น จาก disc infiltrometer สามารถคำนวณปริมาณแทรกซึมน้ำได้จาก

$$I_{3D} = S\sqrt{t} + \left[\frac{2-\beta}{3} K + \frac{\gamma S^2}{R(\theta_0-\theta_n)} \right] t \quad (9)$$

เมื่อ β คือค่าคงที่ ผันแปรในช่วง $0 < \beta < 1$, γ เป็นค่าคงที่ เท่ากับ 0.75

Vandervaere *et al.* (2000) เขียนสมการ (9) โดยย่อเป็น

$$I = C_1\sqrt{t} + C_2t \quad (10)$$

ในที่นี้ I หมายถึง cumulative 3D infiltration (I_{3D}) และ

$$C_1 = S \quad (11)$$

$$C_2 = \frac{2-\beta}{3} K + \frac{\gamma S^2}{R(\theta_0-\theta_n)} \quad (12)$$

อนึ่ง cumulative infiltration และ infiltration rate ที่ประเมินได้จากสมการนั้นเป็น axisymmetric 3-D flow (I_{3D}) ถ้าจะนำไปปรับใช้กับการแทรกซึมแบบ one-dimensional flow (I_{1D}) ซึ่งเป็นการให้น้ำแบบทั่วไป จำเป็นต้องแปลงค่า I_{3D} เป็น I_{1D} โดยใช้สมการ

$$I_{1D} = I_{3D} - \frac{\gamma S^2}{R(\theta_0-\theta_n)} t \quad (13)$$

โดย sorptivity, S คือ C_1 ในกรณีนี้ผู้ปฏิบัติต้องวัดค่าความชื้นดินก่อนทดลอง (θ_n) และความชื้นตรงผิวดินหลังการให้น้ำทันที (θ_0) แยกต่างหากด้วย

การประเมินพารามิเตอร์ C_1 และ C_2 อาจทำได้หลายวิธี (Vandervaere *et al.*, 2000) แต่ที่ยกมาเป็นตัวอย่างมี 2 วิธี คือการ fit กราฟ cumulative infiltration โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งจะคำนวณค่าพารามิเตอร์ทั้งคู่โดยวิธี least square optimization เรียกว่า cumulative infiltration method (CI) อีกวิธีหนึ่งคือการแปลงสมการ cumulative infiltration (สมการ 10) ให้เป็นรูปแบบเส้นตรง เรียกว่าวิธี cumulative linearization (CL)

อุปกรณ์และวิธีการ

ลักษณะและองค์ประกอบของเครื่องมือ

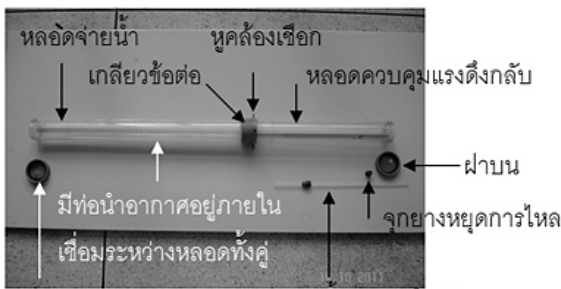
Tension infiltrometer ของภาควิชาปฐพีวิทยาทำขึ้นจากท่ออะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายใน 60.5 และ 50.4 mm ตามลำดับ ส่วนที่เป็นหลอดจ่ายน้ำยาว 600 mm และหลอดควบคุมแรงดึงน้ำยาว 400 mm หลอดทั้งคู่ต่อกันผ่านเกลียว PVC สองด้าน มีผนังกันไม่ให้น้ำที่บรรจุในหลอดทั้งสองต่อเนื่องกัน บนฝาแก้วเจาะรูสำหรับสอดจุกยางเสียบท่อนำอากาศซึ่งเป็นหลอดแก้วขนาด 5 mm ยาว 1000 mm เชื่อมต่อระหว่างช่องอากาศในหลอดควบคุมแรงดึงกลับกับผิวตะแกรงฝาบอนที่ใช้ปิดหลอดควบคุมแรงดึงน้ำเจาะรูสำหรับสอดจุกยางเสียบท่อนำปรับแรงดึงกลับซึ่งเป็นหลอดแก้วขนาด 5 mm ยาว 350 mm หรือสำหรับใช้สอดจุกยางหยุดการไหลในกรณีไม่ต้องการให้เครื่องมือจ่ายน้ำ ฝาล่างปิดปลายหลอดจ่ายน้ำมีช่องเปิดสำหรับวางตะแกรงจ่ายน้ำ ซึ่งมีขนาดช่องเปิด 150 μ m ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตะแกรง 50.2 mm ฝาบอนฝาล่างรวมทั้งเชื่อมต่อระหว่างหลอดใช้ระบบชั้นเกลียวมีปะเก็นผนึกแน่นกันการรั่วของน้ำและอากาศตรง



กลางเครื่องมือมีหลอดสำหรับผูกเชือกตริง infiltrometer ติดกับสมอกันการโยกคลอนของเครื่องมือขณะใช้งาน ลักษณะและองค์ประกอบของเครื่องมือแสดงในรูปที่ 1, 2, และ 3

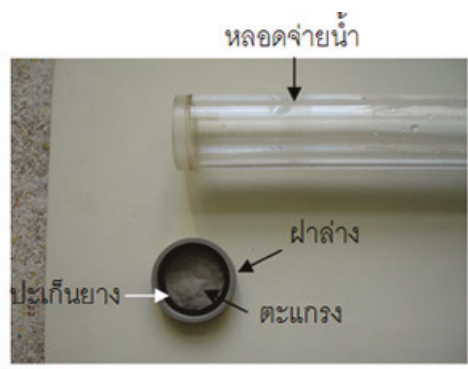
การเตรียมอุปกรณ์ก่อนการใช้งาน

ก่อนการใช้งานต้องเติมน้ำในอุปกรณ์ส่วนหลอดให้น้ำและหลอดจ่ายน้ำดังนี้ เติมน้ำในหลอดควบคุมแรงดึงกลับจนเกือบเต็มโดยระวังไม่ให้เกินระดับปลายบนของท่อนำอากาศ ทาวาสลินบางๆ ที่ขอบของหลอดแล้วขันเกลียวปิดฝาบนให้สนิท ใช้จุกยางปิดรูที่ฝาบนเพื่อหยุดการไหลของน้ำ จากนั้นกลับด้าน infiltrometer เติมน้ำในหลอดให้น้ำจนเกือบเต็ม ทาวาสลินบางๆ ตรงขอบของหลอด ปิดฝาล่างให้สนิท แล้วกลับด้านให้หลอดให้น้ำอยู่ข้างล่างเหมือนเดิม

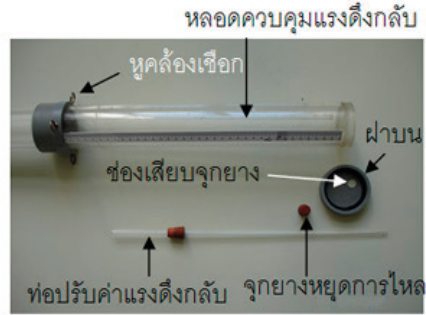


รูปที่ 1 ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์วัดการแทรกซึมน้ำแบบมีแรงดึงกลับ (tension infiltrometer) ของภาควิชาปฐพีวิทยา

รูปที่ 1 ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์วัดการแทรกซึมน้ำแบบมีแรงดึงกลับ (tension infiltrometer) ของภาควิชาปฐพีวิทยา



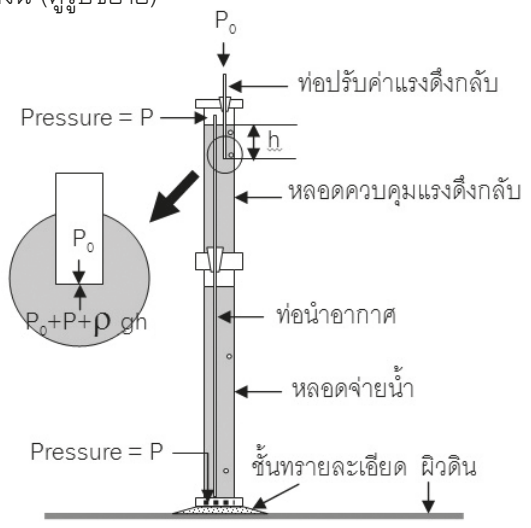
รูปที่ 2 องค์ประกอบส่วนล่างของ tension infiltrometer แสดงชุดฝาและตะแกรง



รูปที่ 3 องค์ประกอบส่วนบนของ tension infiltrometer แสดงชุดควบคุมแรงดึงกลับ

หลักการประเมินค่าแรงดึงกลับ

หลักการประเมินค่าแรงดึงกลับในหน่วยความสูงของน้ำสำหรับ tension infiltrometer ของภาควิชาปฐพีวิทยา แสดงในรูปที่ 4 ในรูปนี้สมมุติว่าปลายท่อปรับแรงดึงกลับจมใต้ผิวน้ำเป็นความลึก h โดยขณะนั้นดินกำลังดูดน้ำจากอุปกรณ์ ทำให้มีฟองอากาศหลุดที่ปลายล่างของท่อนำอากาศและที่ปลายล่างของท่อปรับแรงดึงเป็นจังหวะ กำหนดให้ความดันบรรยากาศเท่ากับ P_0 และความดันมาตรของอากาศเหนือผิวน้ำของหลอดควบคุมแรงดึงกลับเท่ากับ $P < 0$ เราคำนวณความดันที่ปลายล่างของท่อปรับค่าแรงดึงดังนี้ (ดูรูปขยาย)



รูปที่ 4 การติดตั้ง tension infiltrometer เพื่อตรวจวัดปริมาณสะสม (cumulative infiltration) อัตราการแทรกซึมน้ำ (infiltration rate) ของดิน

downward pressure = P_0

และ

upward pressure = $P_0 + P + \rho_w gh$

เมื่อ ρ_w และ g คือความหนาแน่นของน้ำ และ gravity ตามลำดับ ณ จุดสมดุล ความดันเหนือผิวน้ำ (P_0) และความดันใต้ผิวน้ำ ($P_0 + P + \rho_w gh$) มีค่าเท่ากัน กล่าวคือ

$$P_0 = -\rho_w gh$$

แสดงว่าความดันมาตรงเหนือผิวน้ำในหลอดควบคุมแรงดึงกลับมีค่าเป็นลบและผันแปรตามความลึกใต้ผิวน้ำ (h) เนื่องจากช่องอากาศมีความต่อเนื่องถึงกันระหว่างเหนือผิวน้ำในหลอดจ่ายน้ำจนถึงผิวน้ำที่กระจายน้ำ ดังนั้นความดันมาตรงที่ผิวน้ำที่กระจายน้ำซึ่งกำลังจ่ายน้ำให้กับดินจะมีค่าเท่ากับ $-\rho_w gh$ ด้วย ในหน่วยความดัน หรืออาจกล่าวว่า matric head ตรงผิวน้ำที่กระจายน้ำในหน่วยความสูง มีค่าเท่ากับ $-h$ หรืออีกนัยหนึ่ง เครื่องมือจ่ายน้ำให้กับดินโดยมีแรงดึงกลับเท่ากับ h ในหน่วยความสูง

การปฏิบัติเพื่อวัดการแทรกซึมน้ำ

จุดที่จะใช้อุปกรณ์วัดการแทรกซึมน้ำควรมีผิวดินเรียบเป็นแนวระดับหรือใกล้เคียง กวาดเศษพืชออกจากผิวดินให้เหลือน้อย หากมีวัชพืชก็ควรใช้กรรไกรขลิบให้เหลือสั้นที่สุด โดยไม่ควรใช้จอบถากเปิดผิวดินเนื่องจากจะทำให้สภาพผิวดินเปลี่ยนไปจากเดิม tension infiltrometer ของภาควิชาปฐพีวิทยามีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 cm ดังนั้นจึงสามารถเลือกจุดที่ต้องการระหว่างต้นพืชได้ง่าย เมื่อเลือกจุดที่ใช้วัดและแต่งผิวดินเสร็จแล้ว ให้ปฏิบัติดังนี้

1. โรยทรายละเอียดขนาด 1-2 mm เป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 cm ให้มีความหนาประมาณ 1 cm เกลี่ยผิวดินให้เรียบ

2. วาง infiltrometer ที่เตรียมเติมน้ำไว้เรียบร้อยจากข้างต้นลงตรงกลางชั้นทราย กดเครื่องมือเบาๆ พร้อมกับหมุนไปมาเล็กน้อย เพื่อให้ตะแกรงสัมผัสกับทรายอย่างทั่วถึง พยายามให้เครื่องมือตั้งฉากกับพื้นและวางนิ่ง ไม่โยกไปมา

3. ใช้เชือกโยงหูที่ตัว infiltrometer ไปยังสมอที่ตอกแน่นกับพื้นดิน 3 จุด ปรับเครื่องมือให้ตั้งฉากกับพื้น มัดเชือกกับสมอให้แน่น

4. กำหนดค่าแรงดึงกลับ (tension) เป็นหน่วยความสูงน้ำเป็นมิลลิเมตรจากระดับปลายล่างของหลอดปรับค่าแรงดึงกลับ (head tube) กับผิวน้ำในหลอดควบคุมแรงดึงกลับ (bubbling tower) ปรับให้ได้ค่าที่ต้องการโดยอ่านสเกลบนหลอดร่วมกับการเลื่อนจุกยางไปมา

5. หลังจากปรับค่าแรงดึงกลับได้เท่ากับที่ต้องการแล้ว ดึงจุกยางหยุดการไหลของน้ำออก เสียบหลอดตั้งแรงดึงกลับเข้าแทนที่ ปล่อยให้ให้น้ำซึมลงสู่ดิน เริ่มจับเวลา $t = 0$ เมื่อฟองอากาศฟองแรกเริ่มผุดออกจาก head tube พร้อมกับอ่านปริมาตรน้ำเมื่อเริ่มต้นจากสเกล บนหลอดจ่ายน้ำ

6. บันทึกปริมาตรน้ำในหลอดจ่ายน้ำเป็นความสูงจากสเกลตามเวลา ที่ความถี่เหมาะสม โดยทั่วไปช่วงแรกต้องอ่านค่าบ่อย เนื่องจากน้ำจะแทรกซึมเร็ว และสำหรับดินเนื้อหยาบต้องอ่านค่าบ่อยกว่าดินเนื้อละเอียด การตรวจวัดควรปฏิบัติต่อเนื่องจนพบว่าอัตราการแทรกซึมน้ำ (คำนวณจากอัตราการลดความสูงของน้ำต่อหน่วยเวลา) มีค่าคงที่ (steady-state infiltration rate, i_{∞}) ข้อมูลที่ได้จากการปฏิบัติในสนามคือชุดความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทรกซึมน้ำสะสม (cumulative infiltration, I) กับเวลา (t) ซึ่งจะได้นำไปวิเคราะห์เพื่อประเมินค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามต้องการต่อไป



ผลการทดลองและวิจารณ์

การประเมินค่า α และ K_s เพื่อสร้าง hydraulic conductivity function

ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างจากการปฏิบัติจริง ในสนามที่ทำกับดิน loamy sand ในแปลงปลูกดำ ภาควิชาปฐพีวิทยา กำแพงแสน ข้อมูลยกมาเพียง 2 ชุด เพื่อแสดงขั้นตอนการคำนวณค่าพารามิเตอร์

ต่อจากนั้นจะแสดงส่วนสรุปของข้อมูลทั้งหมดเพื่อ ประเมินค่าพารามิเตอร์ที่แม่นยำกว่าเดิม ด้วยวิธี fit กราฟด้วยโปรแกรม least square optimization

ผลการใช้ tension infiltrometer วัดการแทรกซึมน้ำที่แรงดึงกลับ 2 ค่า คือ $H_1 = 20.6$ cm และ $H_2 = 15.6$ cm (matric head, $h_1 = -20.6$ cm และ $h_2 = -15.6$ cm ตามลำดับ) แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างผลการใช้ tension infiltrometer วัดการแทรกซึมน้ำที่แปลงปลูกดำ เนื้อดิน loamy sand

t (min)	H1 = 20.6 cm			H2 = 15.6 cm		
	read (cm)	Q (cm ³)	I (cm)	read (cm)	Q (cm ³)	I (cm)
0	53.0	0	0	47.1	0	0
1	52.9	1.995	0.101	47.0	1.995	0.101
2	52.8	3.990	0.202	46.9	3.990	0.202
3	52.7	5.985	0.302	46.8	5.985	0.302
4	52.6	7.980	0.403	46.8	6.983	0.353
5	52.5	9.975	0.504	46.7	7.980	0.403
6	52.5	9.975	0.504	46.6	9.975	0.504
7	52.4	11.970	0.605	46.5	11.970	0.605
8	52.3	13.965	0.706	46.4	13.965	0.706
9	52.3	13.965	0.706	46.3	15.960	0.806
10	52.2	15.960	0.806	46.2	17.955	0.907
15	51.9	22.943	1.159	45.9	23.940	1.210
20	51.5	29.926	1.512	45.4	33.916	1.714
25	51.2	35.911	1.814	45.0	41.896	2.117
30	50.9	41.896	2.117	44.7	47.881	2.419
40	50.3	53.866	2.722	44.0	61.846	3.125
50	49.8	63.841	3.226	43.3	75.811	3.830
60	49.2	75.811	3.830	42.6	89.777	4.536
70	48.8	83.792	4.234			
80	48.4	91.772	4.637			
90	48.0	99.752	5.040			

ข้อมูลประกอบที่จำเป็นต้องใช้มีดังนี้

พื้นที่หน้าตัดหลอดให้น้ำ (A) = 19.950 cm²

พื้นที่หน้าตัดตะแกรงจ่ายน้ำ (a) = 19.792 cm²

รัศมีตะแกรงจ่ายน้ำ (R) = 2.51 cm

จากข้อมูลความสูงของน้ำในหลอดจ่ายน้ำที่เวลาต่างๆ (read, cm) ในตารางที่ 1 ดำเนินการต่อไปนี้

1. คำนวณปริมาตรสะสมของน้ำที่แทรกซึมเข้าสู่ดิน (Q) จากผลต่างระหว่างความสูงน้ำเมื่อเริ่มต้น Z กับ ความสูงที่อ่าน ณ เวลา t ใดๆ (Z_i) คูณกับพื้นที่หน้าตัดหลอดให้น้ำ (A) ตัวอย่างเช่น สำหรับ H_1 เมื่อครบนาทีที่ 5 ปริมาตรสะสมของน้ำที่แทรกซึมเข้าสู่ดิน (Q_5) คำนวณจาก

$$Q_5 = (Z - Z_5)A = (53.0 - 52.5) \text{ cm} \times 19.950 \text{ cm}^2 = 9.975 \text{ cm}^3$$

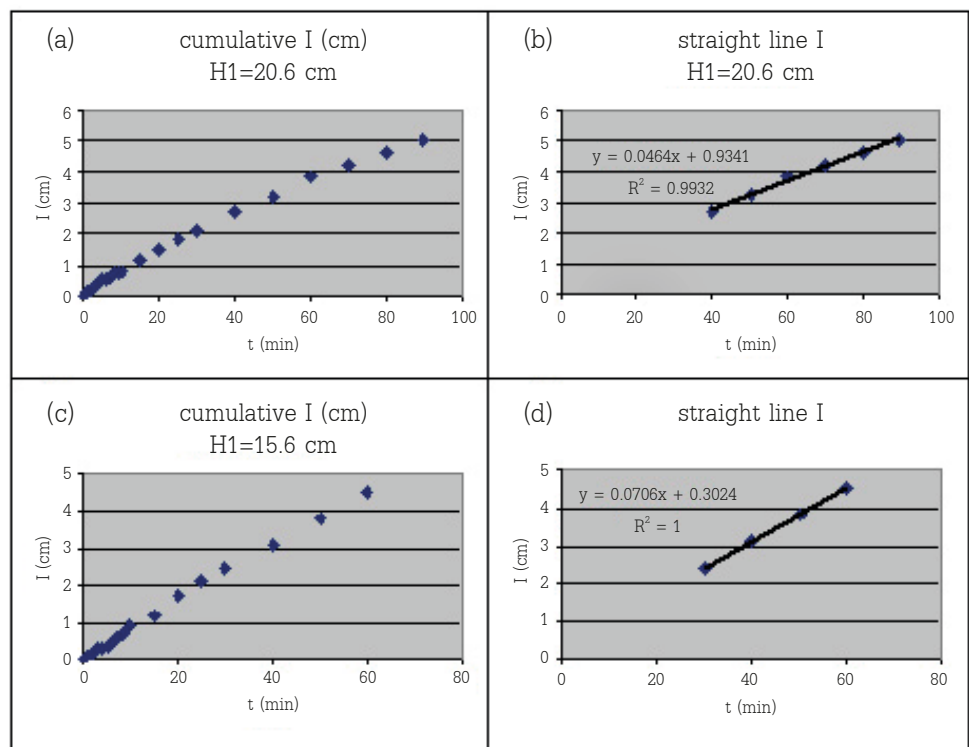
2. จากนั้นคำนวณปริมาณแทรกซึมน้ำสะสม (I) โดยใช้พื้นที่หน้าตัดของตะแกรงจ่ายน้ำ (a) ไปหาร ปริมาตรซึมน้ำสะสม (Q) เช่นสำหรับ H₁ นาทีที่ 5

$$I_5 = \frac{Q_5}{a} = \frac{9.975 \text{ cm}^3}{19.792 \text{ cm}^2} = 0.504 \text{ cm}$$

3. เขียนกราฟระหว่างปริมาณแทรกซึมน้ำสะสม

(I) กับเวลา (t) ที่แรงดึงกลับทั้ง 2 ค่า เลือกส่วนท้ายของกราฟที่เป็นเส้นตรงออกมาประเมิน steady-state infiltration rate (i_∞) ดังแสดงในรูปที่ 5

สรุปข้อมูลตรงส่วนนี้ได้ว่า ที่ matric head เท่ากับ -20.6 และ -15.6 cm ประเมิน steady-state infiltration rate (i_∞) ได้ 0.0464 และ 0.0706 cm/min ตามลำดับ



รูปที่ 5 การเขียนกราฟ cumulative infiltration เพื่อประเมินค่า steady-state infiltration rate (i_∞) (a) และ (c) cumulative infiltration ที่ matric head (h) -20.6 และ -15.6 cm; (b) และ (d) ส่วนที่ cumulative infiltration เป็นกราฟเส้นตรง หรือ infiltration rate มีค่าคงที่ (i_∞) เท่ากับความชันของกราฟทั้ง 2 เส้น ตามลำดับ loamy sand

4. อ้างอิงการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมิน hydraulic conductivity function ข้างต้น เราประเมิน α จากสมการ (7) ดังนี้

$$\alpha = \frac{\ln(0.0706/0.0464)}{(-15.5+20.6)\text{cm}} = 0.0839 \frac{1}{\text{cm}}$$

5. นำค่า α รวมทั้งค่าที่เกี่ยวข้องอื่นๆ กลับไปใช้ในสมการ (5) เพื่อคำนวณค่า K_s ดังนี้

$$K_s = \frac{0.0464 \text{ cm/min}}{e^{0.084(-20.6)} \left[1 + \frac{4}{\pi \times 2.51 \times 0.084} \right]} = 0.0371 \frac{\text{cm}}{\text{min}}$$

การแทนค่าข้างต้นหากทำกับสมการ (6) ก็จะได้ผลลัพธ์เท่ากัน

6. ความสัมพันธ์ระหว่าง K(h) ที่คำนวณได้จริงกับค่าเฉลี่ยของ h ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2



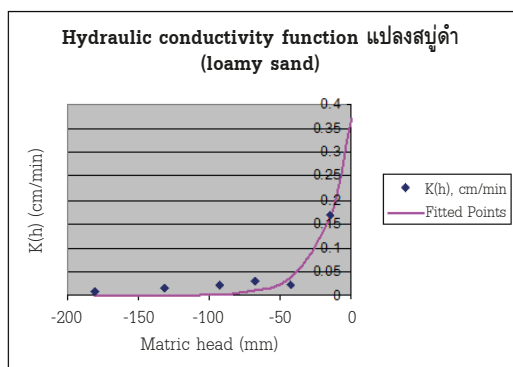
สำหรับการทดลองใช้ matric head 7 ค่า สำหรับคอลัมน์ fitted points ได้จากการใช้โปรแกรม FitOO¹ ทำการประเมินค่าพารามิเตอร์ α และ K_s โดยวิธี least square optimization technique ในที่นี้ได้ผลลัพธ์เท่ากับ 0.531 1/cm และ 0.369 cm/min ตามลำดับ ซึ่งทำให้สามารถสร้าง hydraulic conductivity function ตามแบบจำลองในสมการ (3) ได้ดังนี้

$$K(h) = 0.369^{0.531} e^h$$

ตารางที่ 2 สรุปผลการทดลองวัดการแทรกซึมน้ำที่ matric head 7 ค่า ตั้งแต่ 0 ถึง -20.6 cm แสดงค่า $K(h)$ ที่คำนวณได้ และ fitted point ของ $K(h)$ ที่ประเมินโดยโปรแกรม FitOO

h (cm)	α (1/cm)	K_s (cm/min)	$K(h)$, (cm/min)	Fitted Points
-18.1	0.084	0.037	0.008	2.476E-05
-13.15	0.108	0.067	0.016	3.429E-04
-9.3	0.101	0.059	0.023	2.648E-03
-6.75	0.102	0.060	0.030	1.025E-02
-4.3	0.060	0.030	0.023	3.765E-02
-1.5	0.361	0.289	0.168	1.665E-01
0				3.692E-01

เมื่อทดลองเปรียบเทียบค่า $K(h)$ ที่คำนวณได้จากการทดลองกับ $K(h)$ ในคอลัมน์ fitted points ดังรูปที่ 6 พบว่ามีค่าสอดคล้องกันดี



รูปที่ 6 เปรียบเทียบ $K(h)$ ที่คำนวณได้จากการทดลองจริงกับค่าที่ทำนายโดยใช้โปรแกรม FitOO

การประเมินค่า C_1 และ C_2 เพื่อสร้างฟังก์ชันการแทรกซึมน้ำ

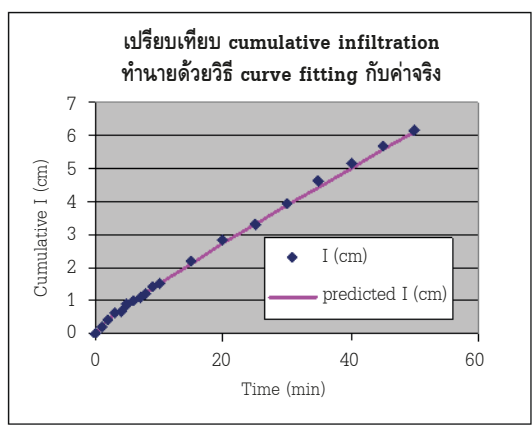
ข้อมูลที่น่ามาใช้เป็นตัวอย่างเป็นผลการทดลองบนดินเนื้อ loamy sand บริเวณเดียวกับข้างต้น เมื่อใช้แรงดึงกลับ 9.9 cm แสดงในตารางที่ 3 ข้อมูลนี้สามารถใช้ประเมินค่าพารามิเตอร์ C_1 และ C_2 ได้หลายวิธี

ตารางที่ 3 ตัวอย่างผลการใช้ tension infiltrometer วัดการแทรกซึมน้ำในดิน loamy sand ที่แรงดึงกลับ 9.9 cm แสดงค่าที่ประเมินได้จริงกับค่าที่ทำนายโดยใช้โปรแกรม FitOO

Time (min)	measured I (cm)	predicted I (cm)
0	0	0
1	0.202	0.260
2	0.405	0.462
3	0.607	0.577
4	0.708	0.720
5	0.911	0.858
6	1.012	0.992
7	1.113	1.123
8	1.214	1.253
9	1.417	1.380
10	1.518	1.506
15	2.226	2.120
20	2.834	2.716
25	3.340	3.300
30	3.947	3.876
35	4.655	4.447
40	5.161	5.012
45	5.667	5.573
50	6.173	6.131

¹ http://oooconv.free.fr/fitoo/fitoo_en.html (18 ต.ค.54) FitOO เป็นโปรแกรม free online curve fitting

ขอยกตัวอย่างที่ทำได้ง่าย 2 วิธี คือใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำ curve fitting โดยใช้รูปแบบสมการ (10) ในที่นี้ใช้โปรแกรม FitOO ผลที่ได้พบว่า $C_1 = 0.16 \text{ cm} / \sqrt{\text{min}}$ และ $C_2 = 0.1 \text{ cm/min}$ ค่า cumulative infiltration (I) ที่คำนวณได้โดยใช้พารามิเตอร์ข้างต้นตามสมการ (10) แสดงในคอลัมน์ที่ 3 (predicted I) เทียบกับ I ที่ตรวจวัดได้ สำหรับกราฟเปรียบเทียบผลการทำนายกับค่าที่วัดได้จริง แสดงในรูปที่ 7



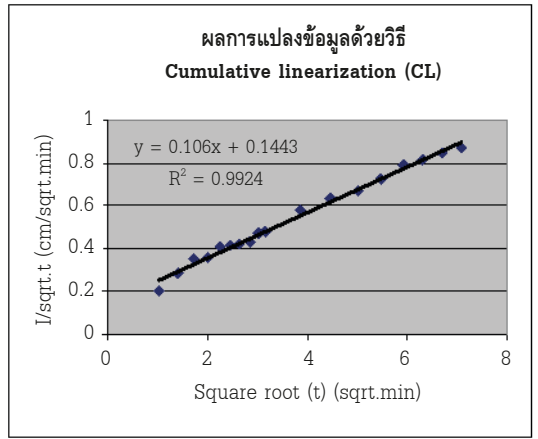
รูปที่ 7 เปรียบเทียบ cumulative infiltration ระหว่างค่าตรวจวัด (I) กับค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรม FitOO ทำนายพารามิเตอร์ C1 และ C2 ตามรูปแบบสมการ (16)

วิธีที่ 2 ทำโดยการดัดแปลงสมการ (10) ให้เป็นสมการเส้นตรง (linearization) เช่นการใช้ \sqrt{t} ทหารทั้ง 2 ข้างได้ผลว่า

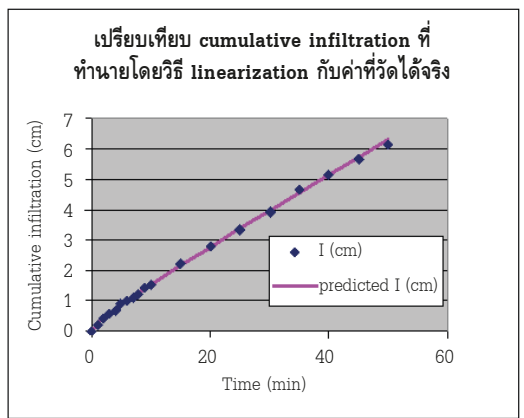
$$\frac{I}{\sqrt{t}} = C_1 + C_2 \sqrt{t}$$

จากนั้นเขียนกราฟระหว่าง I/\sqrt{t} กับ \sqrt{t} และสร้างกราฟเส้นตรงผ่านจุดในกราฟ จะพบว่า y-intercept คือ C_1 และ slope คือ C_2 ผลการปฏิบัติแสดงในรูปที่ 8 เห็นว่าพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่า $0.1443 \text{ cm}/\sqrt{\text{min}}$ และ 0.106 cm/min ตามลำดับ เมื่อนำค่าข้างต้นไปแทนในสมการ (10) เพื่อประเมิน cumulative

infiltration (I) และแสดงผลเปรียบเทียบกับค่า I ที่วัดได้จริงในรูปที่ 9 เห็นได้ว่าวิธีทั้งสองประเมินค่า C_1 , C_2 , และทำนายค่า cumulative infiltration ได้ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 8 ผลการแปลงข้อมูล cumulative infiltration เพื่อประเมิน C1 และ C2 ด้วยวิธีแปลงสมการ (10) ให้เป็นเส้นตรง



รูปที่ 9 ผลการเปรียบเทียบ cumulative infiltration ที่ทำนายค่าพารามิเตอร์โดยวิธี linearization กับค่าที่วัดได้จริง

ในการใช้ tension infiltrometer ศึกษาการแทรกซึม น้ำ ข้อมูลที่ได้คือความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแทรกซึมน้ำสะสม (I) ตามเวลา (t) เมื่อปรับค่าแรงดึงกลับ (tension) ไว้เท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันว่า sorptivity (S) เปลี่ยนแปลงตามอัตราการจ่ายน้ำและความชื้นเดิมก่อนการให้น้ำ รวมทั้ง



hydraulic conductivity (K) ผันแปรตามค่าแรงดึงกลับของ infiltrometer ดังนั้น C_1 และ C_2 จึงเป็นค่าที่ผันแปรได้ตามขนาดแรงดึงกลับและความชื้นเดิมของดิน และเนื่องจาก tension infiltrometer ของภาควิชาปฐพีวิทยา สามารถรับค่าแรงดึงกลับได้ในช่วง 0-200 mm ของน้ำ จึงอาจใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ S, K รวมทั้ง C_1 และ C_2 ตามอิทธิพลของ matric head ในช่วงดังกล่าว หรืออิทธิพลของความชื้นเดิมของดินได้

สรุป

อุปกรณ์วัดการแทรกซึมแบบมีแรงดึงกลับที่พัฒนาขึ้นที่ภาควิชาปฐพีวิทยา สามารถใช้ประโยชน์

ในการประเมินค่าพารามิเตอร์ C_1 และ C_2 ตามสมการแทรกซึมแบบ 3 มิติของ Vandervaere *et al.* (2000) ซึ่งสามารถแปลงค่าเป็นการแทรกซึมแบบ 1 มิติของ Philip (1957) ได้ ถ้าทราบค่าระดับความชื้นเดิมของดินและระดับความชื้นดินตรงจุดให้น้ำ อุปกรณ์นี้สามารถดัดแปลงใช้วัดค่าพารามิเตอร์ α และสภาพน้ำน้ำขณะอิ่มตัว (K_s) เพื่อใช้ทำนาย hydraulic conductivity function, $K(h)$ ตามแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ Gardner (1958) โดยใช้วิธี 2-head method ของ Hussien and Warrick (1993) ได้อย่างง่าย

อุปกรณ์นี้ถูกออกแบบให้มีขนาดเล็ก นำติดตัวได้สะดวก ติดตั้งและใช้งานง่าย รวมทั้งมีปัญหการรั่วซึมน้อยมาก

เอกสารอ้างอิง

- Gardner, W.R. 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil Sci.** 85 : 228-232.
- Decagon Devices Inc. 2011. <http://www.decagon.com/products/lysimeters-and-infiltrometers/mini-disk-tension-infiltrometer/> Oct. 20, 2011.
- Hussen, A.A. and A.W. Warrick. 1993. Alternative analysis of hydraulic data from disc tension infiltrometers. **Water Resour. Res.** 29(12) : 4103-4108.
- Perroux, K.M. and I. White. 1988. Design for disc infiltrometers. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 52 : 1205-1215.
- Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration:4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. **Soil Sci.** 84 : 257-264.
- Smettem, K.R.J., J.Y. Parlange, P.J. Ross and R. Haverkamp. 1994. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 1. A capillary-based theory. **Water Resour. Res.** 30 : 2925-2929.
- Vandervaere, Jean-Pierre., M. Vauclin and D.E. Elrick. 2000. Transient flow from tension infiltrometer I. The two-parameter equation. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 64 : 1263-1272.
- Wooding, R.A. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. **Water Resour. Res.** 4 : 1259-1273