บทที่ 4
การแทรกซึม
(INFILTRATION)

จุดมุ่งหมาย

เมื่อศึกษาบทนี้แล้ว นักศึกษาควรมีความเข้าใจและสามารถที่จะ

1. บอกความหมายของความจุของการแทรกซึมและอัตราการแทรกซึมได้
2. บอกเขตทั้งสามของความชื้นในดินได้
3. อธิบายถึงความจุความชื้นในสนามได้
4. บอกและอธิบายถึงตัวการที่มีอิทธิพลต่อความจุของการแทรกซึมได้อย่างน้อย 4 ตัวการ
5. คำนวณหาโค้งความจุของการแทรกซึมได้
6. คำนวณหาค่าความจุของการแทรกซึมได้

1. คำนำ

เมื่อฝนตกลงมาถึงพื้นดินจะมีการเคลื่อนไหวของน้ำ 2 ทางคือ ทางแรกกลายเป็นน้ำไหลผ่านหน้าดินหรือ*น้ำไหลบ่า (runoff)* และทางที่สองน้ำจะไหลลงไปข้างล่างโดยไหลจากผิวบนลงไปในดิน ซึ่งเรียกว่า *"การแทรกซึม" (infiltration)* โดยน้ำจะไหลผ่านช่องว่างในดิน รอยแตกและรูของรากพืชที่เน่าเปื่อย รวมทั้งโพรงที่เกิดจากการไถในดินหลายแห่ง การแทรกซึมของน้ำจะถูกจำกัดเนื่องจากการอุดตันที่ผิวดินหรือการแห้งจนดินอัดตัวเป็นแผ่นแข็ง และขึ้นอยู่กับสภาพความเข้มของฝนจะมีค่ามากกว่าความจุของการแทรกซึมหรือไม่ ซึ่งจะแทรกซึมลงไปในดินไปเพิ่มความชื้นในดินหรือกลายไปเป็นน้ำใต้ดินต่อไป

คุณลักษณะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำของแม่น้ำจะแตกต่างกันอย่างชัดเจนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพของแม่น้ำและสภาพของลุ่มน้ำนั้น ๆ ถ้าแหล่งกำเนิดที่ให้น้ำแก่แม่น้ำเป็นปริมาณน้ำไหลผ่านหน้าดินหรือน้ำไหลบ่าแล้ว แม่น้ำสายนั้นจะมีปริมาณน้ำท่วมมากและจะมีปริมาณน้ำไหลในฤดูที่มีน้ำน้อยต่ำ ถ้าลักษณะของลุ่มน้ำเป็นทรายจะมีส่วนที่แทรกซึมได้มาก ปริมาณน้ำไหลบ่าจะน้อย ถ้าลุ่มน้ำนี้มีชั้นที่น้ำจะซึมลงไปเป็นน้ำใต้ดินได้แล้วก็จะมีปริมาณน้ำคงที่และจะมีน้ำไหลตลอดทั้งปี

2. ความจุของการแทรกซึมและอัตราการแทรกซึม

เมื่อฝนตกลงมา การแทรกซึมของน้ำครั้งแรกจะถูกดูดซึมไปเพื่อทำให้ความชื้นในดินที่ยังขาดอยู่มีให้ชุ่มเสียก่อน จากนั้นส่วนที่เหลือจึงจะไหลผ่านผิวดินลงไปเป็นน้ำใต้ดินอย่างช้า ๆ และไหลไปทางข้าง ๆ ด้วย การแทรกซึมจะเปลี่ยนแปรขึ้นอยู่กับความเข้มของฝนในกรณีต่าง ๆ อย่างไรก็ดีอาจจะเกินขอบเขตหรือจะมีอัตราการดูดซึมสูงสุดต่อเนื่องกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะดินต่าง ๆ กัน

การสะสมของน้ำใต้ดินจากการแทรกซึมนั้นจะขึ้นอยู่กับช่องว่างที่ปรากฏอยู่ในดิน ไม่ได้ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคดิน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอนุภาคดิน ชนิดของดิน รูปร่างและความแน่นของดิน ดังนั้นดินต่างชนิดกันจะมีจำนวนช่องว่างแตกต่างกันออกไป ซึ่งทำให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่างกันไปด้วย *ในสภาวะที่กำหนดให้ อัตราสูงสุดที่ดินสามารถดูดซึมน้ำไว้ได้เรียกว่า* **"ความจุของการแทรกซึม" (infiltration capacity)** โดยทั่วไปมักใช้สัญลักษณ์แทนด้วยตัวอักษร f และมีหน่วยวัดเป็น *ซม./ช.ม.*

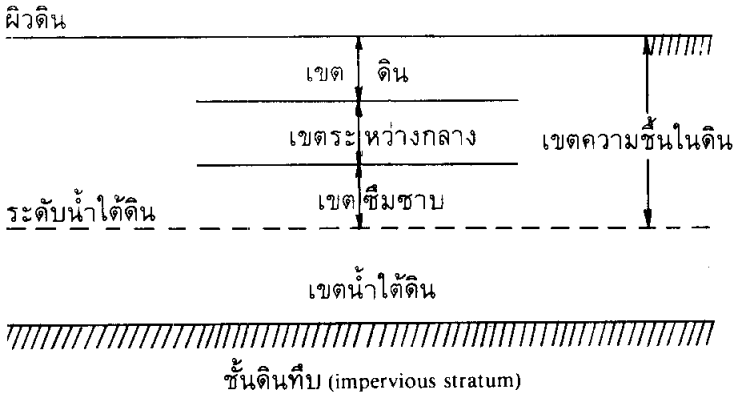
น้ำฝนจะเข้าไปในดินที่มีอัตราความจุ *(f)* เต็มที่ได้เฉพาะระหว่างช่วงเวลาเมื่ออัตราฝนตกมีจำนวนเกินความจุของการแทรกซึมเท่านั้น เมื่อความเข้มของฝนน้อยกว่าความจุของการแทรกซึม

แล้วอัตราการแทรกซึมที่มีมากกว่าจะเท่ากับอัตราฝนตกโดยประมาณ ด้วยเหตุนี้อัตราการแทรกซึมที่มีมากกว่าจริง ๆ อาจจะเท่ากับหรือน้อยกว่าความจุของการแทรกซึม อัตราที่มีมากกว่าจริง ๆ ซึ่งน้ำเข้าไปในดินที่กำหนดให้ในเวลาที่กำหนดให้นี้เรียกว่า **"อัตราการแทรกซึม"** (infiltration rate)

ถ้าความเข้มของฝน (p) มีมากกว่าความจุของการแทรกซึม *(f)* ความแตกต่างนี้จะเรียกว่า *อัตราส่วนเกินจากฝนตก (rainfall excess rate : p)* น้ำส่วนเกินนี้ครั้งแรกจะสะสมอยู่บนพื้นดินเป็น *การเก็บกักบนผิวดิน (surface detention : D)* ก่อน หลังจากนั้นก็จะไหลอยู่บนพื้นดินกลายเป็นน้ำไหลผ่านหน้าดินหรือน้ำไหลบ่า (runoff) ลงสู่แม่น้ำ

3. ความชื้นในดิน

น้ำที่อยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน (water table) เรียกว่า "น้ำใต้ดิน" (groundwater) และน้ำที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินเรียกว่า **"ความชื้นในดิน" (soil moisture)** บริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เขตคือ เขตซึมซาบ (capillary zone) เขตระหว่างกลาง (intermediate zone) และเขตดิน (soil zone) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงเขตต่าง ๆ ของเขตความชื้นในดิน (soil moisture zone) ซึ่งอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน-(water table)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Garg, 1979.

1. **เขตซึมซาบ (capillary zone)** ต่อเหนือขึ้นไปจากระดับน้ำใต้ดินประมาณ 0.3 ถึง 3 เมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับเนื้อดิน(soil texture) เป็นส่วนใหญ่ เป็นเขตที่เรียกว่า *"แนวซึมซาบ" (capillary fringe)* ตลอดทั้งเขตซึมซาบนี้ แรงดึงดูดจากอณูดินซึ่งดูดให้น้ำซึมซาบขึ้นไปชั้นบนโดยต้านแรงดึงดูดของโลก[1] นั้น จะคอยรักษาให้ความจุความชื้น (moisture content) มีอยู่คงที่อยู่ตลอดเวลา

2. **เขตดิน (soil zone)** ต่อลงมาจากผิวดินเป็นชั้นความลึกที่รากของพืชและต้นไม้ชอนไชลงไปมากมาย ซึ่งเรียกเขตนี้ว่า *"เขตดิน" (soil zone)* ตลอดทั้งเขตดินนี้ระดับความชื้นจะแตกต่างกันมาก ซึ่งจะอยู่ในช่วงจากสภาพอิ่มตัว (saturated state) บางส่วน ในช่วงทันทีที่ฝนตกหนักจนถึงระดับต่ำสุดหลังจากฝนแล้งติดต่อกันเป็นเวลานานระยะหนึ่ง

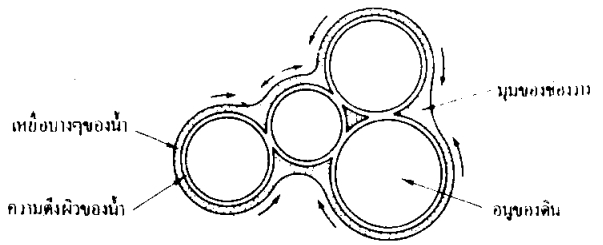
3. **เขตระหว่างกลาง (intermediate zone)** เป็นเขตที่อยู่ระหว่างเขตซึมซับและเขตดิน ตลอดทั้งเขตนี้จำนวนของน้ำที่อยู่ในช่องว่างในดินแทบจะคงที่ตลอดทั้งปี ยกเว้นในช่วงเวลาที่น้ำใต้ดินมีเพิ่มขึ้นมาจากฝนตก ในบางกรณีความลึกของแนวซึมซับ (หรือเขตซึมซับ) อาจจะเพิ่มมากขึ้นและอาจจะต่อขึ้นไปจนถึงเขตดิน ในกรณีนี้ชั้นระหว่างกลางจะไม่มี

4. ความจุความชื้นในสนาม

ทันทีหลังจากที่มีฝน เมื่อน้ำซึมหรือน้ำแรงดึงดูด (gravity water) ระบายลงสู่ระดับน้ำใต้ดิน น้ำจำนวนที่แน่นอนจะถูกยึดอยู่บนผิวของเม็ดดินด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (molecular attraction) และความตึงผิวของน้ำ (surface tension) ซึ่งเราเรียกว่า **ฟ้าน้ำ (pellicular water)** น้ำชนิดนี้จะถูกเคลื่อนย้ายได้ยาก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 พอหลังจากฝนหยุดตกแล้วระดับความชื้นจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยที่อัตราการลดลงจะมากในระยะแรก ๆ แล้วค่อย ๆ น้อยลงโดยลำดับจนกระทั่งแทบเท่ากับศูนย์ในที่สุด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 เมื่ออัตราลดระดับความชื้นน้อยมากจนแทบจะเรียกได้ว่าเท่ากับศูนย์นั้น โดยปกติเป็นขณะที่ความชื้นส่วนที่เกินอำนาจดูดยึดของดินในช่วงความลึกที่แรกทีเดียวอิ่มตัวด้วยน้ำ ได้เคลื่อนออกไปจากดินในช่วงความลึกนั้นจนหมดแล้ว และความเร็วของการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากช่วงความลึกนั้นน้อยมากจนวัดไม่ได้ ระดับความชื้นของดินในช่วงความลึกนั้นจึงมีแนวโน้มที่จะคงที่ตั้งแต่บัดนั้นไป ระดับความชื้นที่พอจะเรียกได้ว่าคงที่นี้เรียกว่า **"ความจุความชื้นในสนาม" (field capacity)** ของดินในช่วงความลึกนั้น ๆ ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงความลึกประมาณ 6 นิ้วแรก

---

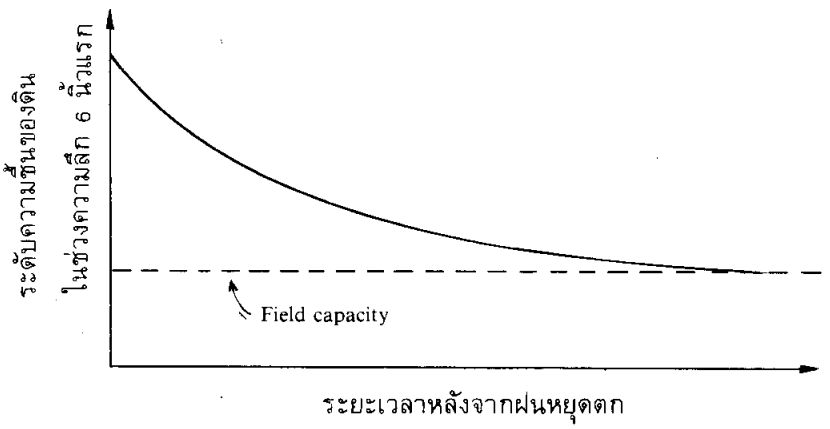
1. เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "การดูดซึมของน้ำ" (capillarity)



เหนื่อบางๆของน้ำและช่องว่างของน้ำซึ่ง
ทั้งหมดเรียกว่า การเกาะยึดของน้ำ

รูปที่ 4.2 ภาพวาดของการเกาะยึดของน้ำและความตึงผิวของน้ำ

ที่มา : สุเทพ และ เคนชากุ, 2521.



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นของดินในช่วงความลึกประมาณ 6 นิ้วแรกของหน้าตัดของดินกับระยะเวลาหลังจากที่ฝนหยุดตก

ที่มา : ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2519.

ฝ้าน้ำที่รากของพืชดูดไปจากดินได้ในอัตราที่เท่าเทียมกับอัตราการคายน้ำของพืช (transpiration rate) เราเรียกว่า **"ความชื้นที่เป็นประโยชน์" (available moisture)** สำหรับฝ้าน้ำที่เหลือนั้นจะถูกดูดยึดไว้ด้วยแรงดูดยึดระหว่างโมเลกุลของเม็ดดินซึ่งมีมากจนรากของพืชไม่สามารถดูดไปใช้ในอัตราที่เท่าเทียมกับอัตราการคายน้ำของพืชได้อันเป็น*ความชื้นที่ไม่มีประโยชน์* เราเรียกว่า **"น้ำเยื่อ" (hygroscopic water)** ความชื้นประเภทนี้อยู่ชิดกับผิวของอนุภาคของดินมากและอยู่ในลักษณะของเยื่อที่บางมากบนผิวของอนุภาคดิน (รูปที่ 4.2) แรงดูดยึดที่อนุภาคของดินมีต่อความชื้นประเภทนี้สูงมากทำให้ความชื้นประเภทนี้มีความตึงผิวหรือความเครียด (tension หรือ suction) ประมาณ 31-10,000 บรรยากาศ พืชสามารถดูดน้ำจากดินได้จนกระทั่งถึง*จุดเหี่ยว (wilting point)*[1] ดังนั้นความชื้นที่เป็นประโยชน์จึงเป็นความชื้นระหว่างความจุความชื้นในสนามซึ่งเป็นพิกัดบน (upper limit) และจุดเหี่ยวซึ่งเป็นพิกัดล่าง (lower limit) จุดเหี่ยวนั้นเป็นระดับความชื้นที่ซึ่งการเหี่ยวถาวร (permanent wilting) ของพืชเกิดขึ้น *ดังนั้นน้ำเยื่อจึงเป็นระดับความชื้นของดินหลังจากที่ดินเหี่ยวไปแล้ว*

ความลึกของน้ำที่ต้องการเพื่อนำเอาระดับความชื้นในดินของดินที่กำหนดให้ขึ้นสู่ความจุความชื้นในสนามเรียกว่า **"ความขาดแคลนความชื้นในสนาม" (field moisture deficiency)** หรือ **"ความขาดแคลนความชื้นในดิน" (soil moisture deficiency)**

เมื่อใดก็ตามที่ฝนตก แรกทีเดียวน้ำจะซึมลงไปเพื่อเพิ่มความชื้นที่ยังขาดอยู่ในดินให้เต็มเสียก่อน จากนั้นจึงซึมลงไปเพิ่มให้กับน้ำใต้ดิน อย่างไรก็ตามความขาดแคลนความชื้นในดินจะแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ด้วยเหตุนี้ในที่ลุ่มที่มีการระบายน้ำเดียวกัน เป็นไปได้อย่างมากที่การเพิ่มของน้ำใต้ดินจะเริ่มที่จุดหนึ่งในขณะที่ความขาดแคลนความชื้นในดินยังคงมีในบริเวณที่เหลือ

สำหรับความจุความชื้นในสนามนั้นก็คล้ายกับความชื้นสมมูลย์ (equivalent moisture) กล่าวคือความจุความชื้นในสนามเป็นน้ำที่ถูกดูดยึดไว้ด้วยดินที่อิ่มตัว (saturated soil) หลังจากการกระทำของแรงโน้มถ่วงของโลก ส่วนความชื้นสมมูลย์นั้นคือน้ำที่ถูกดูดยึดด้วยดินที่อิ่มตัวหลังจากการถูกเหวี่ยงจากศูนย์กลาง (centrifugal force) ถึง 1,000 เท่าของแรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้นความชื้นสมมูลย์ของดินชนิดหนึ่ง ๆ จึงใกล้เคียงกับความจุความชื้นในสนามของดินนั้น ๆ พอที่จะใช้แทนกันได้

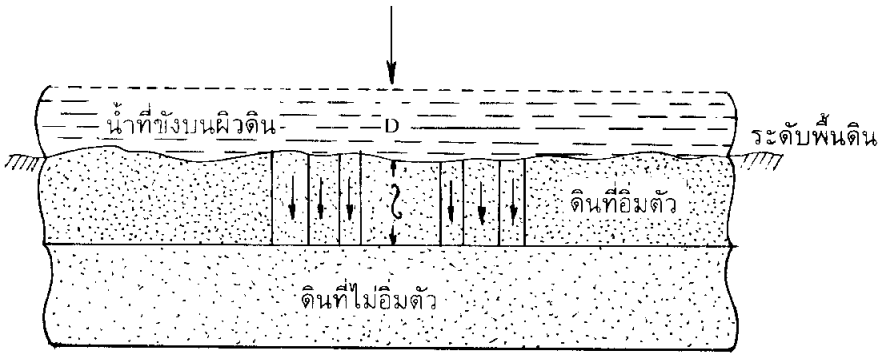
---

1. *จุดเหี่ยว (wilting point)* ของดินนั้น ๆ หมายถึง จุดที่ปริมาณความชื้นที่ยังเหลืออยู่ในดินลดน้อยลงเนื่องจากการดูดน้ำของพืชมีมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จึงทำให้แรงดูดยึดที่ดินมีต่อแต่ละหน่วยจำนวนของน้ำที่ยังเหลืออยู่ในดินมีสูงขึ้น ดังนั้นอัตราการดูดน้ำของพืชจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากพืชดูดน้ำจากดินได้ยากขึ้น จึงเป็นเหตุทำให้เซลล์ของพืชเหี่ยวลง

5. ตัวการที่มีอิทธิพลต่อความจุของการแทรกซึม

ความจุของการแทรกซึม *(f)* นั้นไม่เพียงแต่เปลี่ยนไปกับเวลาเท่านั้น แต่ยังเปลี่ยนไปกับตำแหน่งสถานที่ด้วย ค่าของ *f* ที่เวลาและตำแหน่งที่กำหนดให้จะเป็นผลที่กระทบต่อปฏิกิริยาร่วมกัน (interaction) ของตัวแปรอีกมากมาย ตัวการบางตัวจะเปลี่ยนค่าของ *f* พร้อมกับการเปลี่ยนของตำแหน่ง และตัวการอื่นจะเปลี่ยนมันจากเวลาต่อเวลา**ในส่วนที่กำหนดให้** ยังมีตัวการอื่น ๆ อีกเช่น พืชคลุมดิน ซึ่งอาจจะเปลี่ยนค่าของ *f* พร้อมกับทั้งของตำแหน่งและเวลาด้วย ตัวการที่มีอิทธิพลต่อความจุของการแทรกซึม (factor affecting infiltration capacity) ต่าง ๆ เหล่านี้คือ

1) ความหนาของชั้นที่อิ่มตัวและความลึกของการขังบนผิวดิน (thickness of the saturated layer and the depth of surface detention) น้ำจะซึมลงไปในดินภายใต้อิทธิพลของแรงดึงดูดของโลก และจะทำให้รูพรุนต่าง ๆ ของผิวหน้าของดินอิ่มตัวไปด้วยน้ำ ถ้าความหนาของดินที่อิ่มตัว (saturated soil) หนาเท่ากับ *l* แล้ว น้ำจะไหลผ่านลงไปตามหลอดเล็ก ๆ ของรูพรุนตามความยาวเท่ากับ *l* เช่นกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของความหนาของชั้นดินที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำและความลึกของการขังของน้ำบนผิวดินที่มีต่อการแทรกซึม

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Garg, 1979.

ที่บนสุดของหลอดเล็ก ๆ แต่ละหลอดจะมีแรงกดลงมาเท่ากับน้ำหนักของน้ำที่ขังอยู่บนผิวหน้าของดินซึ่งให้เท่ากับ D และแรงกดทั้งหมดที่ทำให้น้ำไหลผ่านลงไป (ที่ปลายล่างสุดของหลอด) จะเท่ากับ D + I ในขณะที่อีกทางหนึ่งแรงต้านทานที่มีต่อการไหลของน้ำที่ผ่านไปตามหลอดเล็ก ๆ นั้นจะเป็นสัดส่วนกับ I ด้วยเหตุนี้แรงภายนอก (F) ที่ทำให้น้ำไหลผ่านลงไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ D + I และแรงต้านทานที่มีต่อการไหลของน้ำที่ผ่านไปตามหลอดเล็ก ๆ (R) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ I ดังแสดงไว้ในสมการข้างล่าง

$$F \alpha (D + I)$$

$$R \alpha I$$

ถ้า I มีค่ามากเมื่อเทียบกับค่าของ D แล้ว การเปลี่ยนแปรของ I จะมีอิทธิพลต่อ F และ R- และอัตราของการแทรกซึมเกือบจะคงที่

อย่างไรก็ตาม เมื่อเริ่มมีฝนตก และถ้า D และ I มีค่าเท่ากันแล้ว จะทำให้แรงภายนอก (F) มีมากกว่าแรงต้านทานภายใน (R) ซึ่งจะเป็นผลทำให้น้ำซึมผ่านลงไปในดินได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเวลาผ่านไป I จะเริ่มมีค่ามากกว่า D มาก และจะไม่แตกต่างไปมากระหว่างค่าของ F และ R ด้วยเหตุนี้จึงทำให้อัตราการแทรกซึมช้าลง นี่เป็นเหตุผลข้อหนึ่งที่ว่าทำไมความจุของการแทรกซึม *(f)* จึงมีค่าสูงมากเมื่อเริ่มมีฝนตก

2) **ความชื้นในดิน (soil moisture)** จำนวนความชื้นในดินจะมีอิทธิพลสำคัญต่อความจุของการแทรกซึมซึ่งมีอยู่ 2 ประการคือ

(1) ในตอนต้นฤดูหนาวหรือฤดูใบไม้ผลิ ระดับความชื้นของดินโดยทั่ว ๆ ไปจะสูงและค่าของ f จะต่ำ พอเข้าฤดูร้อนระดับความชื้นของดินจะต่ำและจะทำให้ค่าของ f เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อดินแห้งการแทรกซึมจะเพิ่มมากขึ้นอันเนื่องมาจากเหตุผลดังต่อไปนี้ :

เมื่อน้ำตกลงบนดินแห้ง ผิวหน้าดินชั้นบนจะเริ่มเปียกในขณะที่ชั้นล่างของดินยังคงแห้งมากอยู่ ดังนั้นจะมีความแตกต่างกันอย่างมากของศักยภาพในการซึมซับ (capillary potential) ระหว่างผิวบนสุดและชั้นล่างของดิน เนื่องจากความแตกต่างของศักยภาพในการซึมซับนี้เอง แรงภายนอกที่กดลงไปข้างล่างจะกระทำต่อน้ำที่ซึมลงไปในดินซึ่งเท่ากับเป็นการไปเพิ่มแรงดึงดูดของโลกที่กระทำต่อน้ำนั้นอีกแรงหนึ่ง ด้วยเหตุนี้น้ำนั้นจึงเคลื่อนที่ดิ่งลงข้างล่างด้วยแรงสองแรงอย่างรวดเร็ว

เมื่อเวลาผ่านไป ผิวดินชั้นล่างจะเริ่มเปียกและความแตกต่างของขีดความสามารถในการซึมซับจะลดลง และด้วยเหตุนี้การแทรกซึมจะลดลงเมื่อระดับความชื้นในดินเพิ่มขึ้น

(2) อิทธิพลที่สองของความชื้นในดินที่มีต่อ f คือด้านกลับกันกับข้อแรก เมื่อดินเปียกจะทำให้พวกตะกอนแขวนลอย (colloids) ต่าง ๆ ที่อยู่ในดินพองตัวขึ้นมาทันที ด้วยเหตุนี้จึงไปลดความจุของการแทรกซึม ในระหว่างตั้งแต่ช่วงแรกของฝนตกลง นี่เป็นเหตุผลหนึ่งที่ว่าทำไมจึงมีการลดลงอย่างรวดเร็วของความจุของการแทรกซึมในระหว่างฝนตก

3) แรงปะทะเนื่องจากฝน (compaction due to rain) เมื่อฝนตกลงมาเหนือดินเม็ดฝนจะปะทะผิวหน้าดินทำให้อนุภาคของดินกระจายออก แรงปะทะนี้จะไปลดช่องว่างในดินที่มีเนื้อละเอียดอย่างเช่น ดินเหนียว (clay) และด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไปลดความจุของการแทรกซึมลงด้วย มีปัจจัยหลายอย่างที่เกิดขึ้นจากการที่ดินเหนียวแตกกระจายออกเนื่องจากแรงปะทะของเม็ดฝนซึ่งอาจจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในสภาวะที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านลงไปได้ (impermeable condition) สำหรับดินทรายที่สะอาดนั้น แรงกระแทกของฝนจะมีผลกระทบต่อความจุของการแทรกซึมน้อยมาก

นี่คืออีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ความจุของการแทรกซึมลดลงอย่างรวดเร็วในระหว่างส่วนเริ่มแรกของพายุฝน

4) การชะล้างอนุภาคที่ละเอียด (washing of fine particles) เมื่อดินแห้งมากจะมีอนุภาคละเอียดต่าง ๆ ปนอยู่บนผิวดินมาก เมื่อฝนตกลงมาและการแทรกซึมเริ่มขึ้นอนุภาคละเอียดเหล่านี้จะถูกพาลงไปในดินและไปตกตะกอนอยู่ในช่องว่างต่าง ๆ ดังนั้นจึงเป็นการไปลดความจุของการแทรกซึมลง

5) การเหยียบย่ำเนื่องจากคนและสัตว์ (compaction due to men and animals) เมื่อมีคนหรือสัตว์เหยียบย่ำผ่านลงบนผิวหน้าดิน ดินจะถูกทำให้แน่นขึ้นและช่องว่างในดินก็จะถูกทำลายไปหมด จึงทำให้การแทรกซึมลดน้อยลง ตัวอย่างของดินประเภทนี้ได้แก่ สนามหญ้า สนามเด็กเล่น และอื่น ๆ

6) พืชปกคลุมดิน **(vegetative cover)** ปัจจัยนี้มีความสัมพันธ์กับอีกหลายปัจจัยดังที่ได้อธิบายไว้ข้างบน แต่ว่าเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุดและจำเป็นที่จะต้องอธิบายควบคู่กันไปกับปัจจัยอื่นด้วย

แรงกดของพืชปกคลุมดินที่ขึ้นอยู่หนาแน่นเหนือดินจะเพิ่มความจุของการแทรกซึมของดินนั้นเป็นส่วนมาก การมีพืชปกคลุมดินอยู่จะช่วยไม่ให้ดินถูกแรงปะทะจากเม็ดฝนและยังทำให้มีชั้นของซากอินทรีย์วัตถุซึ่งมีตัวแมลงและสัตว์คอยชอนไชและขุดคุ้ยทำให้โครงสร้างของดินมีคุณสมบัติยอมให้น้ำซึมผ่านได้ดี (permeable soil structure) เนื่องจากชั้นดินจะกลายเป็นชั้นดินที่ร่วนซุยและฟู ทั้งสองปัจจัยดังกล่าวนี้จะช่วยเพิ่มความจุของการแทรกซึมได้อย่างมากที่สุด ดังนั้นดินที่พืชปกคลุมอยู่จึงมีความจุของการแทรกซึมเพิ่มมากขึ้นหลายเท่ากว่าดินที่ปราศจากพืชปกคลุมดิน

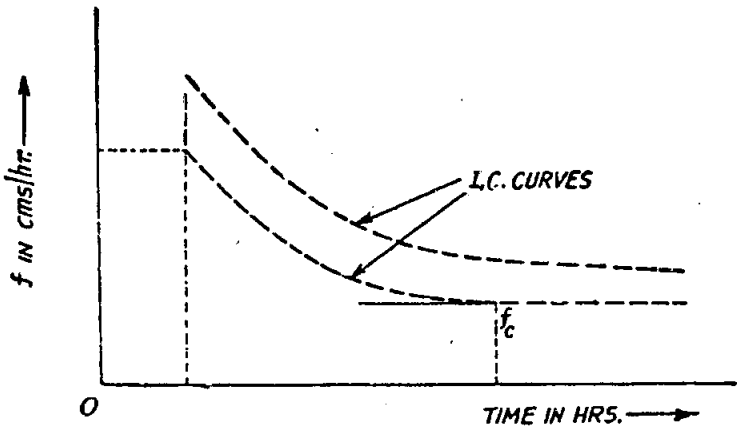
ยิ่งกว่านั้นการคายน้ำของพืช (transpiration) จะช่วยเคลื่อนย้ายหรือลดความชื้นในดินลง และดังนั้นจึงเป็นการช่วยเพิ่มความจุของการแทรกซึมในระหว่างช่วงเริ่มต้นที่มีฝนตก สำหรับพื้นที่ที่ปกคลุมไปด้วยพืชที่เปิดหน้าดิน (open crops) อย่างเช่น มันฝรั่งหรือข้าวโพดนั้น จะมีความจุของการแทรกซึมต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากว่าพืชประเภทดังกล่าวสามารถป้องกันดินจากแรงปะทะของเม็ดฝนได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้นและยังมีชั้นของอินทรีย์วัตถุ (organic matter) บนดินน้อยอีกด้วย

7) **อุณหภูมิ (temperature)** ความหนาแน่นของน้ำจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ด้วยเหตุที่น้ำที่ไหลลงไปในช่องว่างของดินนั้นมักจะมีลักษณะเกือบเป็นแผ่นอยู่เสมอจึงทำให้อัตราการแทรกซึมเปลี่ยนไปตามความหนาแน่นของน้ำด้วย ด้วยเหตุนี้ความจุของการแทรกซึมจึงเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ปัจจัยนี้เองเป็นสาเหตุทำให้ค่าของ f ต่ำลงในฤดูหนาวและสูงขึ้นในฤดูร้อน

6. โค้งความจุของการแทรกซึม

โค้งความจุของการแทรกซึม (infiltration capacity curve) คือ *การแสดงเส้นกราฟของความจุของการแทรกซึมว่าเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรในระหว่างเวลาที่ฝนตกและหลังเวลาที่ฝนตกเล็กน้อย*

ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อก่อน ความจุของการแทรกซึมโดยทั่วไปจะสูงมากในตอนเริ่มมีพายุฝนซึ่งเกิดขึ้นหลังจากที่แห้งแล้งมานาน ในระหว่างที่มีพายุฝนนั้นความจุของการแทรกซึมจะลดลงอย่างมากเนื่องจากตัวการต่าง ๆ เช่น การขังของน้ำบนผิวดิน ความชื้นในดิน แรงกระแทกเนื่องจากฝน การชะล้างผงต่าง ๆ ที่ละเอียด และตัวการอื่น ๆ ตามที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อก่อน หลังจากช่วงเวลาที่แน่นอน (ปกติ 1 ถึง 3 ช.ม.) ความจุของการแทรกซึมก็จะเริ่มคงที่ ดังนั้นรูปแบบของโค้งความจุของการแทรกซึม (I.C. Curve) จึงมีลักษณะดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 ในหน้าถัดไป



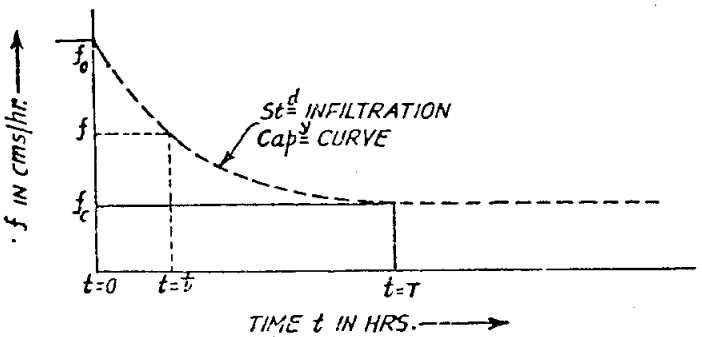
รูปที่ 4.5 โค้งความจุของการแทรกซึม (I.C. Curve)

ที่ซึ่ง : **O** = **จุดเริ่มต้น หรือเวลาที่เริ่มนับเมื่อฝนเริ่มตก**

t_i = **เวลาระหว่างที่ไม่มีการแทรกซึมและฝนทั้งหมดถูกใช้หมดไปในการที่เรือนยอดของต้นไม้บังหรือกั้นฝนเอาไว้ (interception) และการเก็บกักน้ำในที่ลุ่มต่ำ (depression storage)**

ที่มา : Garg, 1979.

บางครั้งค่าของ f ยังสามารถใช้ในการคำนวณปริมาณน้ำไหลผ่านหน้าดินหรือน้ำไหลบ่า (surface runoff) เนื่องจากพายุจากบริเวณลุ่มแม่น้ำที่มีการระบายน้ำ (drainage basin) ที่กำหนดให้ได้ ในกรณีเช่นนี้ ค่าของ f แรกทีเดียวจะต้องคำนวณจากสภาพของพายุอื่นซึ่งทราบค่าแล้วในบริเวณลุ่มแม่น้ำเดียวกันนั้น ค่าของ f นี้จะคำนวณโดยรวมเอาฝนที่ถูกเรือนยอดของต้นไม้สกัดกั้นไว้ (interception) และการเก็บกักน้ำในแอ่งน้ำ (depresstion storage) เอาไว้ด้วยแล้วซึ่งเป็นการปฏิบัติอย่างทั่ว ๆ ไป ดังนั้นโค้งจะเปลี่ยนไปดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 ซึ่งเราเรียกโค้งนี้ว่า **"โค้งความจุของการแทรกซึมมาตรฐาน" (Standard Infiltration Capacity Curve)**



รูปที่ 4.6 โค้งความจุของการแทรกซึมมาตรฐาน (Standard Infiltration Capacity Curve)

ที่มา : Garg, 1979.

ที่ซึ่ง :

f_o = ค่าของความจุของการแทรกซึมที่ t = 0

f_c = ค่าคงที่ของการแทรกซึมในตอนท้าย

ค่าของ f_o อาจจะเพิ่มเป็นสองเท่า สามเท่า หรือกี่เท่าก็ได้ของ f_c สำหรับบริเวณลุ่มน้ำที่ต่างออกไปนั้น ค่าของสัดส่วนนี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากมายทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนของฝนที่ถูกสกัดกั้นจากเรือนยอดของต้นไม้ การเก็บกักน้ำในที่ลุ่มต่ำ และขึ้นอยู่กับชนิด เนื้อ และสภาพของดินด้วย

โค้งความจุของการแทรกซึมนี้สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของคณิตศาสตร์ได้ซึ่งเราเรียกว่า **"สมการของโค้งความจุของการแทรกซึม" (Equation of I.C. Curve)** ดังแสดงให้ไว้ข้างล่างนี้

$$f = f_c + (f_o - f_c)\, e^{-Kt}$$

ที่ซึ่ง :

f_c = **ค่าของการแทรกซึมหลังจากที่มันถึงค่าคงที่แล้ว**

f_o = **ความจุของการแทรกซึมที่เวลาเมื่อฝนเริ่มตก**

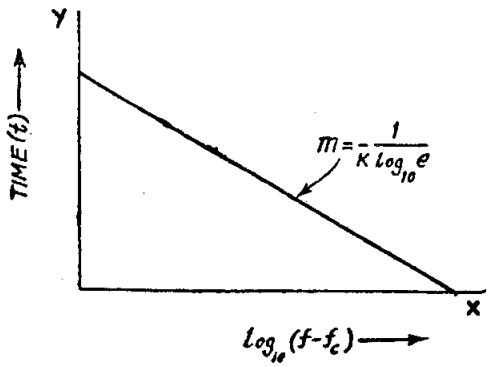
f = **ความจุของการแทรกซึมที่เวลา t ใด ๆ**

K = **ค่าคงที่**

t = **เวลาจากเมื่อฝนเริ่มตก**

e = **2.718**

ค่าของ K นั้นจะแตกต่างกันออกไปในแต่ละพื้นที่และแต่ละครั้งที่มีฝนตก และสามารถคำนวณหาค่า K ได้โดยอาศัยสมการเส้นตรง $\mathbf{Y = mX + C}$ ซึ่งความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 ข้างล่างนี้



รูปที่ 4.7 การหาค่า K โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรง

จะเห็นได้ว่าเส้นตรงนี้มีความลาด (slope) หรือ $m = \frac{-1}{K \log_{10} e}$ ซึ่งเครื่องหมายลบ (−) นี้แสดงว่าเมื่อ t เพิ่มขึ้น f จะลดลง ดังนั้นจึงทำให้ $(f - f_c)$ ลดลงด้วย อันเป็นสาเหตุให้ $\log_{10}(f - f_c)$ ลดลงตามไปด้วย

ถ้าเราทราบค่าของ f ในเวลา t ที่แน่นอนได้สองค่าแล้ว และทราบค่าของ f_c อีกด้วย ดังนั้นเราสามารถที่จะลากเส้นตรงผ่านจุดสองจุดนี้ได้ และสามารถที่จะคำนวณหาค่าความลาด (slope) หรือค่าของ m ได้อีกด้วย เมื่อทราบค่าของ m แล้ว เราก็นำไปแทนค่าในสมการ $m = \frac{-1}{K \log_{10} e}$ ก็จะสามารถคำนวณหาค่า K ได้ในที่สุด

สำหรับการคำนวณหาค่าของความลาด (slope) หรือค่าของ m นั้น เราสามารถคำนวณหาได้จากสมการข้างล่างนี้

$$m = \frac{\Sigma xy}{\Sigma x^2} = \frac{\Sigma X_i Y_i - \frac{(\Sigma X_i)(\Sigma Y_i)}{n}}{\Sigma x_i^2 - \frac{(\Sigma x_i)^2}{n}}$$

ตัวอย่างที่ 1 ความจุของการแทรกซึม *(f)* ของพื้นที่แห่งหนึ่งสามารถวัดได้ 10.4 ซม./ช.ม. ในเวลาเมื่อฝนเริ่มตก และ 3.2 ซม./ช.ม. ที่เวลา 30 นาทีหลังจากที่ฝนเริ่มตก และปรากฏว่าหลังจากที่ฝนตกไปแล้ว 1 ชม. 45 นาที ค่าของความจุของการแทรกซึมจะคงที่อยู่ที่ 1.0 ซม./ช.ม. จงหาค่าของ f ที่เวลา 1 ช.ม. 30 นาทีหลังจากที่ฝนเริ่มตก

วิธีทำ

ให้สูตรของสมการของ I.C. Curve เป็น

$$f = f_c + (f_o - f_c)e^{-Kt}$$

ที่ซึ่ง :

f_c = 1.0 ซม./ช.ม.

f_o = 10.4 ซม./ช.ม.

e = 2.718

t = 1.50 ช.ม.

จากนั้นแปลงค่า t ให้อยู่ในรูปของจุดทศนิยมมาตรฐาน

30 นาที = 0.50 ช.ม.

1 ชม. 30 นาที = 1.50 ช.ม.

1 ชม. 45 นาที = 1.75 ช.ม.

จากนั้นจึงหาค่าของ $(f - f_c)$ และ $\log_{10}(f - f_c)$ จากค่าต่าง ๆ ของ

t hours.	0	0.50	1.75
f cm/hr.	10.4	3.2	1.0
$f-f_c$	9.4	2.2	0.0
$\log_{10}(f-f_c)$	+0.973	+0.342	–

และหาค่าความลาด (slope) หรือค่าของ m จากสมการ

$$m = \frac{\Sigma xy}{\Sigma x^2} = \frac{\Sigma X_i Y_i - \frac{(\Sigma X_i)(\Sigma Y_i)}{n}}{\Sigma X_i^2 - \frac{(\Sigma X_i)^2}{n}}$$

ซึ่งในที่นี้ : $Y = t$

และ $X = \log_{10}(f-f_c)$

เราสามารถหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการข้างบนนี้ได้โดยการคำนวณดังนี้

X_i	Y_i	X_iY_i	X_i^2
0.973	0	0	0.947
0.342	0.5	0.171	0.177
$\Sigma X_i = 1.315$	$\Sigma Y_i = 0.5$	$\Sigma X_iY_i = 0.171$	$\Sigma X_i^2 = 1.064$

ในที่นี้เราได้ $n = 2$

แทนค่าในสมการของ m จะได้

$$m = \frac{0.171 - \frac{(1.315)(0.5)}{2}}{1.064 - \frac{(1.315)^2}{2}}$$

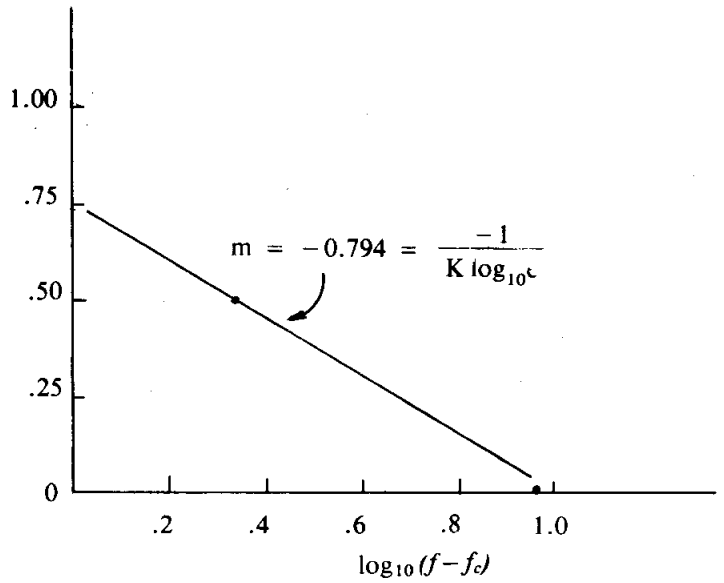
$$m = \frac{0.171 - 0.329}{1.064 - 0.865}$$

$$m = \frac{-0.158}{0.199}$$

$$\therefore \quad m = -0.794$$

ดังนั้นเราได้ค่าของความลาด (slope) เป็น – 0.794

จากนี้เราจึง plot กราฟระหว่าง t และ $\log_{10}(f-f_c)$ และลากเส้นตรงผ่านจุดที่ plot ไว้แล้ว จะได้เส้นกราฟออกมาดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง t และ $\log_{10}(f - f_c)$ ซึ่งมีค่าความลาด (slope) หรือค่า m = − 0.794

คราวนี้จึงสามารถหาค่า K ได้จากสมการต่อไปนี้

$$m = \frac{-1}{K \log_{10} e}$$

แทนค่า $$-0.794 = \frac{-1}{K \log_{10} e}$$

ย้ายข้าง $$K \log_{10} e = \frac{1}{0.794} = 1.2594$$

$$K \log_{10} 2.718 = 1.2594$$

$$K \times 0.4343 = 1.2594$$

$$\therefore \quad K = \frac{1.2594}{0.4343} = 2.9$$

เมื่อทราบค่าของ K แล้วจึงแทนค่าในสมการของ I.C. Curve

$$f = f_c + (f_o - f_c)\, e^{-Kt}$$

แทนค่าสมการ $$f = 1.0 + (10.4 - 1.0)e^{-2.9 \times 1.5}$$

$$f = 1.0 + 9.4 \times 2.718^{-4.35}$$

$$f = 1.0 + 9.4 \times 0.013$$

$$f = 1.0 + 0.12 = 1.12$$

ดังนั้นค่าของ f ที่เวลา 1 ช.ม. 30 นาที หลังจากฝนเริ่มตกคือ 1.1 ซม./ช.ม. **ตอบ**

7. วิธีการคำนวณความจุของการแทรกซึม

วิธีการคำนวณความจุของการแทรกซึม (method of computing infiltration capacity) โดยทั่วไปมีอยู่ 2 วิธีคือ

1) วิธีทางการทดลองโดยใช้เครื่องวัดการแทรกซึม (infiltrometers) และเครื่องทำฝนเทียม (rain-simulators)

2) โดยการวิเคราะห์รูปแบบของฝน (rainfall pattern) และลิขิตระดับน้ำ (hydrograph)[1]

วิธีแรกทำโดยการโปรยน้ำให้คล้ายกับสภาพฝนตกจริง ๆ ลงไปบนดินที่ต้องการหาความจุของการแทรกซึม จากนั้นจึงสังเกตและวิเคราะห์การแทรกซึมที่เกิดขึ้นจริง ๆ ค่าความจุของการแทรกซึมที่หาได้ด้วยวิธีนี้ไม่ค่อยมีความสำคัญมากเท่าใดนักเนื่องจากค่าที่ได้นี้ไม่สามารถนำไปคำนวณหาปริมาณน้ำไหลผ่านหน้าดินหรือน้ำไหลบ่า (runoff) ได้อย่างแน่นอนอีกครั้งหนึ่งได้ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าค่าความจุของการแทรกซึมที่หาได้โดยการใช้เครื่องวัดการแทรกซึม (infiltrometers) นี้ไม่ใช่ค่าในทางปริมาณแต่เป็นค่าในทางคุณภาพ วิธีนี้จะมีประโยชน์ในการหาผลกระทบที่มีความสัมพันธ์กันของการเปลี่ยนแปลงในการใช้ที่ดิน (land use) ความลาดชัน (slope) พืชคลุมดิน (vegetative cover) ฯลฯ อาจจะมีการผิดพลาดอย่างมากถ้านำค่าที่ได้จากวิธีนี้ไปหาปริมาณน้ำไหลบ่า ดังนั้นการหาค่าความจุของการแทรกซึมด้วยวิธีที่สองนั้นนับว่าเหมาะที่สุด เพราะว่าค่าที่ได้จากวิธีที่สองนี้เป็นค่าที่แม่นยำและแน่นอนมากกว่า ดังนั้นจึงสามารถนำค่านี้ไปคำนวณหาปริมาณน้ำไหลบ่าได้ถูกต้องมากกว่า

ในการคำนวณหาความจุของการแทรกซึมทั้ง 2 วิธีนี้จะเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบ 2 อย่าง ซึ่งมีความสำคัญต่อการคำนวณมากนั่นคือ (1) ลุ่มน้ำขนาดเล็ก และ (2) ลุ่มน้ำขนาดใหญ่

(1) **ลุ่มน้ำขนาดเล็ก (small watersheds)** ลุ่มน้ำขนาดเล็กเป็นบริเวณที่ลุ่มระบายน้ำ (drainage basin) ซึ่งมีขนาดเล็ก ความเข้มของฝนที่ตกลงมาจะสม่ำเสมอ (uniform) ทั่วทั้งลุ่มน้ำ ลุ่มน้ำขนาดเล็กนี้อาจจะมีเนื้อที่ตั้งแต่ 1 เฮกตาร์ (6.25 ไร่) จนถึง 2,500 เฮกตาร์ (15,625 ไร่) ลุ่มน้ำเช่นนี้จะรับน้ำได้อย่างรวดเร็ว และด้วยเหตุนี้ในแต่ละช่วงของน้ำฝนที่เพิ่มขึ้น (ตกรุนแรง) จะทำให้เกิดยอดกร๊าฟพุ่งขึ้นมาอย่างเด่นชัดในลิขิตระดับน้ำของน้ำไหลบ่า (runoff hydrograph) ลุ่มน้ำแบบนี้โดยทั่วไปแล้วมักจะพบว่าสามารถนำไปใช้ในการออกแบบท่อระบายน้ำ ท่อระบายสิ่งโสโครก สะพานเล็ก ๆ เป็นต้น

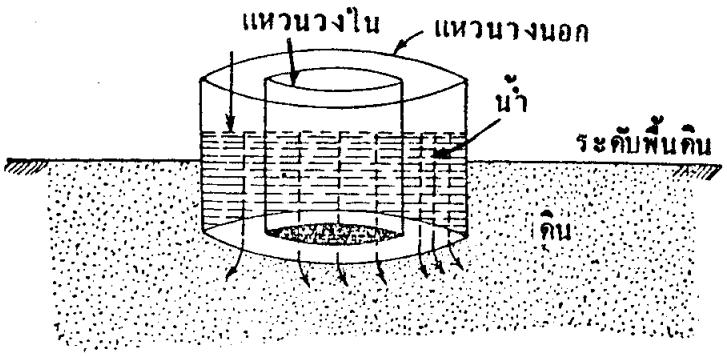
---

1. ลิขิตระดับน้ำ (hydrograph) หมายถึง กราฟแสดงระดับน้ำและอัตราการไหลของน้ำที่เปรียบเทียบกับเวลา

(2) ลุ่มน้ำขนาดใหญ่ (large watersheds) ลุ่มน้ำขนาดใหญ่เป็นบริเวณที่ลุ่มระบายน้ำที่มีขนาดยาวกว่า และมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่ความเข้มของฝนที่ตกลงมาจะสม่ำเสมอทั่วทั้งลุ่มน้ำ ลุ่มน้ำแบบนี้โดยทั่วไปสามารถนำไปใช้ในการก่อสร้างการป้องกันน้ำท่วม (เช่น เขื่อน) การชลประทาน การจ่ายน้ำ เป็นต้น

7.1 การหาค่าของความจุของการแทรกซึมโดยการใช้เครื่องวัดการแทรกซึม (infiltrometers) และเครื่องทำฝนเทียม (rain simulators)

เครื่องมือที่ใช้วัดความจุของการแทรกซึมเรียกว่า **"เครื่องวัดการแทรกซึม" (infiltrometer)** ซึ่งมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แบบธรรมดาที่สุดนั้นประกอบด้วยแผ่นโลหะรูปวงแหวนซึ่งซ้อนกันอย่างตื้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เครื่องวัดนี้จะถูกวางลงบนพื้นดินโดยให้ส่วนบนยื่นออกมาเหนือผิวดิน และส่วนล่างวางอยู่ใต้ดิน เติมน้ำลงไปในช่องทั้งสองระหว่างแผ่นโลหะรูปวงแหวนนั้นโดยให้น้ำในทั้งสองช่องนั้นมีระดับเท่ากัน



รูปที่ 4.9 ส่วนประกอบของเครื่องวัดการแทรกซึม (infiltrometer) แบบทั่ว ๆ ไป
ที่มา : Garg, 1979.

แหวนวงนอกจะป้องกันไม่ให้น้ำในแหวนวงในกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้างหลังจากที่ซึมลงไปยังก้นของแหวนวงในแล้ว อัตราที่น้ำจะต้องเติมลงไปในแหวนวงในเพื่อรักษาระดับของน้ำให้อยู่คงที่นั้นจะบอกให้เราทราบถึงความจุของการแทรกซึมโดยตรง

เพื่อที่จะให้ใกล้สภาพความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น บางครั้งต้องใช้ฝนเทียมเข้าช่วย เครื่องมือที่ใช้สำหรับทำฝนเทียมนั้นเรียกว่า **"เครื่องทำฝนเทียม" (rain simulator)** เครื่องทำฝนเทียมจะช่วยทำให้น้ำโปรยลงมาในอัตราที่สม่ำเสมอในส่วนเกินของความจุของการแทรกซึมเหนือพื้นที่ที่ทำการทดลอง จากนั้นจึงสังเกตน้ำไหลบ่าที่เกิดขึ้นมาซึ่งจะทำให้เราได้ความสัมพันธ์ของโค้งความจุของการแทรกซึม (f curve) โค้งความจุของการแทรกซึมนี้สามารถนำไปใช้หาค่าของน้ำไหลบ่าจากลุ่มน้ำที่ทำการทดลองได้

7.2 การหาค่าของโค้ง f ในพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดเล็ก

ฮอร์เนอร์ (Horner) และลอยด์ (Llyod) ได้แนะนำวิธีการหาค่าของโค้ง f ในพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดเล็กไว้ซึ่งเรียกกันว่า **"วิธีของฮอร์เนอร์และลอยด์" (Horner and Llyod's method)** วิธีนี้กระทำโดยการวิเคราะห์รูปแบบความเข้มของฝน (rain intensity pattern) และลิขิตระดับน้ำของน้ำไหลบ่า (runoff hydrograph) ที่เกิดขึ้น พื้นที่ลุ่มน้ำขนาดเล็กจะเร็วต่อการรับความเข้มของฝน ดังนั้นแต่ละช่วงเวลาของน้ำฝนที่ตกลงมาอย่างรุนแรงจะทำให้เกิดยอดกราฟพุ่งขึ้นอย่างเด่นชัดในลิขิตระดับน้ำของน้ำไหลบ่า ความแตกต่างระหว่างน้ำฝนในช่วงเวลาที่แน่นอนและน้ำไหลบ่าที่เกิดขึ้นภายหลังจะทำให้เราทราบถึงจำนวนของการแทรกซึม (F) ในช่วงเวลานั้น ปริมาณของ F นี้ถ้าถูกหารด้วยเวลาในระหว่างที่การรั่วซึมเกิดขึ้นจะให้ค่าของ f ในระหว่างช่วงเวลานั้น

สำหรับในทางคณิตศาสตร์ เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$F = P - Q$$

$$\therefore \quad f = \frac{F}{t} = \frac{P - Q}{t}$$

ที่ซึ่ง :

P = ฝนทั้งหมด

Q = น้ำไหลบ่าทั้งหมด

t = เวลาในระหว่างที่การแทรกซึมเกิดขึ้น

เราทราบดีอยู่แล้วว่าปริมาณฝนส่วนที่เกินมา (excess rainfall) นั้นจะกลายเป็นน้ำไหลบ่าหน้าดินและจะหยุดลงหลังจากที่ฝนหยุดตกร่วงเลยไปแล้วชั่วขณะหนึ่ง ดังนั้นการแทรกซึมจะเริ่มเมื่อฝนส่วนที่เกินเริ่มขึ้นและจะยังคงซึมติดต่อกันไปจนกระทั่งฝนหยุดตกร่วงเลยไปแล้วชั่วขณะหนึ่งเช่นกัน ในขณะที่ฝนส่วนเกินหยุดลงนั้น การแทรกซึมกำลังเกิดขึ้นไปทั่วทั้งบริเวณ แต่พอภายหลังจากนั้นการแทรกซึมบริเวณนั้นจะเริ่มลดลงเรื่อย ๆ อย่างคงที่ สำหรับลุ่มน้ำขนาดเล็กนั้น ฮอร์ตัน (Horton) ได้สันนิษฐานว่าการแทรกซึมซึ่งเกิดขึ้นระหว่างช่วงเวลาหลังนี้ (ช่วงเวลาหลังจากที่ฝนหยุดตกไปแล้วจนกระทั่งถึงเวลาที่น้ำไหลบนพื้นดินหยุดลง) หรือเรียกว่า **"ช่วงเวลาของการแทรกซึมตกค้าง"** จะเท่ากับจำนวนของการแทรกซึมที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ทั้งหมดในบริเวณนั้นเกิดขึ้นเป็นเวลา 1 ใน 3 ของช่วงเวลาของการแทรกซึมตกค้างนี้ ฮอร์ตันยังสันนิษฐานอีกว่าการไหลของน้ำบนพื้นดินนี้จะหยุดที่จุดโค้ง (จุดที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง) ของลิขิตระดับน้ำ (hydrograph)

จากรูปแบบความเข้มของฝน เราสามารถทราบเวลาเมื่อฝนส่วนเกินหยุด และจากจุดโค้ง (จุดที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง) ของลิขิตระดับน้ำ (hydrograph) เราก็สามารถทราบเวลาเมื่อการไหลของน้ำบนพื้นดินหยุด ความแตกต่างระหว่างสองเวลานี้จะทำให้ทราบช่วงเวลาของการแทรกซึมตกค้างนี้ และเมื่อนำ 1/3 ของเวลาของการแทรกซึมตกค้างนี้ไปเพิ่มเข้ากับช่วงเวลาของฝนส่วนเกิน

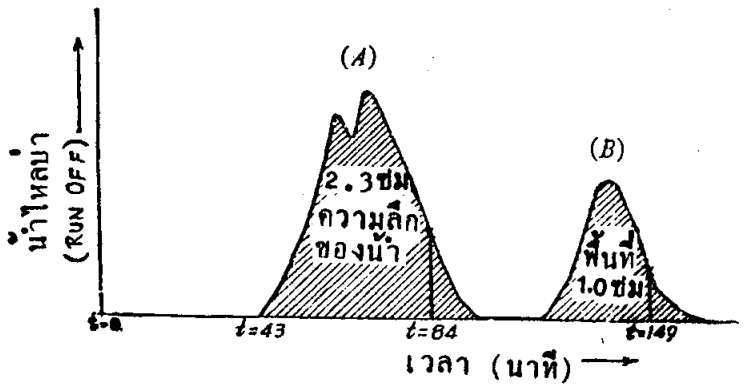
(excess rainfall period) จะทำให้ทราบเวลาทั้งหมดของการแทรกซึม (t) ซึ่งจะถูกใช้ในสมการข้างบนเมื่อคำนวณ

ค่าของ f จะถูกคำนวณในวิธีการนี้สำหรับช่วงต่าง ๆ ที่ฝนตกรุนแรง และจะถูกกำหนดจุด (plotted) ที่ระยะทาง t/2 หลังจากที่ช่วงเวลาของฝนส่วนเกินเริ่มต้น จากนั้นเมื่อลากเส้นโค้งผ่านจุดเหล่านี้จะได้โค้งความจุของการแทรกซึม (I.C. Curve) วิธีที่ได้กล่าวมานี้จะกระจ่างยิ่งขึ้นถ้าพิจารณาจากตัวอย่างการคำนวณข้างล่างนี้

ตัวอย่างที่ 2 บนลุ่มน้ำขนาดเล็กแห่งหนึ่งเกิดพายุฝนเป็นเวลานาน 145 นาที และสามารถวัดอัตราฝนตกได้ตามตารางที่แสดงไว้ข้างล่างนี้

เวลาเมื่อฝนเริ่มตก (นาที)	20	40	60	80	100	120	140	145
อัตราฝนตก (ซ.ม./ซ.ม.)	2.0	10.0	7.5	1.5	1.5	5.0	1.0	0.0

น้ำไหลบ่าซึ่งเกิดขึ้นที่ทางระบาย (outlet) ของลุ่มน้ำนี้นั้นสามารถสังเกตได้ และสามารถกำหนดจุด (plot) ของลิขิตระดับน้ำ (hydrograph) ได้ ลิขิตระดับน้ำไหลบ่านี้พบว่ามียอดแหลม (peak) พุ่งขึ้นมาสองยอด ดังได้แสดงไว้ในรูปข้างล่างนี้



ทั้งยอด (A) และยอด (B) ของลิขิตระดับน้ำนั้นพบว่าบรรจุน้ำฝนอยู่ลึก 2.3 ซ.ม. และ 1.0 ซ.ม. ตามลำดับ จุดยอดโค้งของทั้งสองยอดเกิดขึ้นที่เวลา t = 84 นาที และ t = 149 นาที ตามลำดับ

จากข้อมูลของน้ำไหลบ่าที่สังเกตได้นี้ จงคำนวณโค้งความจุของการแทรกซึมและกำหนดจุด (plot) ลงในรูปแบบของความเข้มของฝน

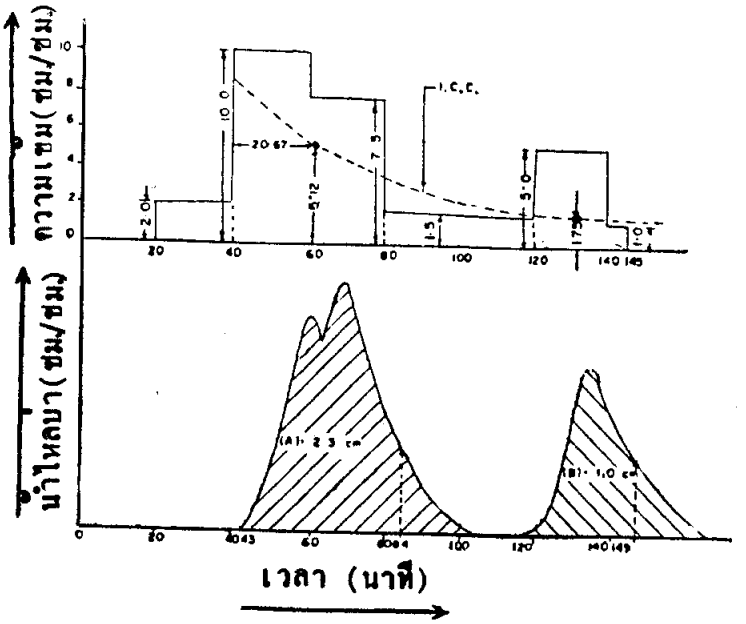
วิธีทำ :

แรกสุดนั้นเราต้องกำหนดจุดของความเข้มของฝนจากอัตราฝนตกที่สังเกตได้ก่อนดังแสดงในรูป (a) ข้างล่างนี้

จากนั้นจึงกำหนดจุดของลิขิตระดับน้ำที่สังเกตได้ของน้ำไหลบ่าลงด้านล่างของรูป (a) ดังแสดงในรูป (b) ข้างล่างนี้

(a)

(b)



จากความเข้มของฝนจะเห็นได้ชัดว่ามีฝนตกหนักอยู่สองช่วง (จาก t = 40 ถึง t = 80 และจาก t = 120 ถึง t = 140 นาที) ซึ่งสามารถกำหนดให้เป็นช่วงเวลาของฝนส่วนเกินได้ ช่วงเวลาของฝนส่วนเกินทั้งสองช่วงนี้กำหนดให้เป็นช่วง a (จาก t = 40 ถึง t = 80 นาที) และช่วง b (จาก t = 120 ถึง t = 140 นาที)

จำนวนน้ำฝนในระหว่างช่วง a(P_a)

P_a = (ปริมาณน้ำฝนระหว่างช่วง t = 40 ถึง t = 60 นาที
+ ปริมาณน้ำฝนระหว่างช่วง t = 60 ถึง t = 80 นาที)

$$P_a = 10.0 \times \frac{20}{60} + 7.5 \times \frac{20}{60}$$

$$P_a = \frac{17.5}{3} = 5.83 \text{ ซม.}$$

จำนวนน้ำฝนในระหว่างช่วง b (P_b)

P_b = (ปริมาณน้ำฝนระหว่างช่วง t = 120 ถึง t = 140 นาที)

$P_b = 5.0 \times \frac{20}{60}$

$P_b = 5.0 \times \frac{1}{3} = 1.67$ ซ.ม.

Q_a = น้ำไหลบ่าระหว่างช่วง a

= พื้นที่ภายใต้กราฟ A

= 2.3 ซ.ม. (โจทย์กำหนดให้)

Q_b = น้ำไหลบ่าระหว่างช่วง b

= พื้นที่ภายใต้กราฟB

= 1.0 ซ.ม. (โจทย์กำหนดให้)

F_a = การแทรกซึมระหว่างช่วง a

= $P_a - Q_a = 5.83 - 2.30$

= 3.53 ซ.ม.

F_b = การแทรกซึมระหว่างช่วง b

= $P_b - Q_b$

= 1.67 – 1.0

= 0.67 ซ.ม.

ดราวนี้เราจึงคำนวณเวลาของการแทรกซึมสำหรับสองช่วงนี้

t_a = ช่วงเวลาของฝนส่วนเกิน + $\frac{\text{ช่วงเวลาของการแทรกซึมตกค้าง}}{3}$

= 40 นาที + $\frac{84 - 80}{3}$ นาที

t = *84 เป็นเวลาของจุดโค้งของกราฟ*

t = *80 เป็นเวลาที่สิ้นสุดของช่วงเวลาของฝนส่วนเกิน*

= $40 + \frac{4}{3} = 40 + 1.33$

= 41.33 นาที

$t_a = \frac{41.33}{60}$ ซ.ม.

∴ ในทำนองเดียวกัน

$t_b = 20 + \frac{149 - 140}{3}$

$= 20 + \frac{9}{3} = 20 + 3$

= 23 นาที

∴ $t_b = \frac{23}{60}$ ซ.ม.

คราวนี้จึงมาคำนวณหาความจุของการแทรกซึมในช่วง a (f_a) และช่วง b (f_b)

$$f_a = \frac{F_a}{t_a} = \frac{3.53}{\frac{41.33}{60}} = \frac{3.53 \times 60}{41.33} = 5.12 \text{ ซม./ชม.}$$

และ $$f_b = \frac{F_b}{t_b} = \frac{0.67}{\frac{23}{60}} = \frac{0.67 \times 60}{23} = 1.75 \text{ ซ.ม./ช.ม.}$$

จากนั้นจึงกำหนดจุด (plot) f_a และ f_b ที่ระยะทาง $\frac{t_a}{2}$ (ซึ่งเท่ากับ $\frac{41.33}{2} = 20.67$ นาที) และ $\frac{t_b}{2}$ (ซึ่งเท่ากับ $\frac{23}{2} = 11.5$ นาที) ตามลำดับจากช่วงเวลาของฝนส่วนเกินบนกราฟของความเข้มของฝน เสร็จแล้วจึงลากเส้นโค้งผ่านจุด a $\left[40 + \frac{t_a}{2}, f_a\right]$ และจุด b $\left[120 + \frac{t_b}{2}, f_b\right]$ ก็จะได้โค้งความจุของการแทรกซึม (I.C. Curve) ตามต้องการ ดังแสดงด้วยเส้นปะในรูป (a) หน้า 90

7.3 ความจุของการแทรกซึมของพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่

สำหรับลุ่มน้ำขนาดใหญ่นั้น ความเข้มของฝนไม่สามารถพิจารณาอย่างสม่ำเสมอได้ทั่วทั้งบริเวณและน้ำไหลบ่าจะไม่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อฝนตกลงมา ดังนั้นวิธีแรกที่ใช้หาโค้งความจุของการแทรกซึม (I.C. Curve) สำหรับลุ่มน้ำขนาดเล็กนั้นจึงไม่สามารถนำมาใช้ได้กับลุ่มน้ำขนาดใหญ่ ฮอร์ตัน (Horton) ได้พัฒนาวิธีการหาความจุของการแทรกซึมสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่ได้สำเร็จและเรียกวิธีนี้ว่า **"วิธีของฮอร์ตัน" (Horton's Methods)** มันเป็นไปไม่ได้ที่จะหาโค้งความจุของการแทรกซึมหรือค่าที่เกิดขึ้นทันทีทันใดของความจุของการแทรกซึมสำหรับลุ่มน้ำขนาดใหญ่ สิ่งที่สามารถหาได้คือค่าเฉลี่ยของความจุของการแทรกซึมที่เกิดขึ้นเท่านั้น

ข้อสมมุติฐาน (Assumptions)

ข้อสมมุติฐานที่ผ่านมาเมื่อครู่นี้ ฮอร์ตันได้ทำไว้ในการคำนวณความจุของการแทรกซึมสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่ และสามารถยกขึ้นมากล่าวได้ว่า :

(1) ในกรณีที่มีพายุฝนตกหนักจนทำให้เกิดเป็นอุทกภัย ปริมาณฝนที่ตกหรือความเข้มของฝนที่สถานีต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้เคียงจะคล้ายกันมาก

(2) น้ำไหลบ่าผิวดินจะเท่ากับผลต่างระหว่างฝนที่ตกลงมาและการแทรกซึมที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงเวลาของฝนส่วนเกิน นั่นหมายความว่าฝนที่ตกอยู่ระหว่างช่วงเวลาของฝนส่วนเกินและ

ที่ตกต่อเนื่องจากช่วงเวลาของฝนส่วนเกินนั้นจะไม่สนใจและตัดออกไป (ยกเว้นฝนที่ซึมลงในระหว่างช่วงเวลาหลังของการไหลของน้ำบนพื้นดิน) ยิ่งกว่านั้นหลังจากการตั้งข้อสมมุติฐานสองข้อนี้แล้ว ผลต่างระหว่างปริมาณน้ำฝนที่ตกทั้งหมด (P) กับปริมาณน้ำไหลบ่าทั้งหมด (Q) ก็ไม่สามารถนำมาหารด้วยช่วงเวลาของฝนส่วนเกินที่แสดงไว้ที่เครื่องจดบันทึกได้ (recording gauge) ทั้งนี้เนื่องจากจะต้องไม่ลืมว่าช่วงเวลาที่ฝนส่วนเกินนี้จะเปลี่ยนแปลงและไม่เท่ากันในทุกจุดของลุ่มน้ำตลอดจนจะแตกต่างกันในแต่ละสถานีด้วย

วิธีการปฏิบัติ (Procedure)

จากนี้ไปเราจะได้อธิบายถึงวิธีทำ ค่าความจุของการแทรกซึม (Ø index) ที่เคยหามาแล้วนั้น เมื่อคูณด้วยช่วงเวลาที่มีฝนส่วนเกิน (T_e) จะได้ความแตกต่างของปริมาณฝนตกและน้ำไหลบ่าในระหว่างช่วงเวลานั้น

การคำนวณทางคณิตศาสตร์ :

$$P - Q = T_e \, \emptyset_{\text{index}}$$

หรือ

$$Q = P - T_e \, \emptyset_{\text{index}}$$

ที่ซึ่ง

P = **ปริมาณฝนตกทั้งหมดในช่วงเวลา T_e**

Q = **ปริมาณน้ำไหลบ่าทั้งหมดในช่วงเวลาเดียวกัน**

$\emptyset_{\text{index}}$ = **ค่าเฉลี่ยของความจุของการแทรกซึม**

ดังนั้นสำหรับลุ่มน้ำขนาดใหญ่นั้น ค่าเฉลี่ยของความจุของการแทรกซึม ($\emptyset_{\text{index}}$) เท่านั้นที่สามารถทำได้

ในพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่นั้นจะถูกแบ่งเขตออกเป็นจำนวนของสถานี หนึ่งในจำนวนสถานีเหล่านี้จะต้องมีเครื่องจดบันทึกน้ำฝนอัตโนมัติที่สมบูรณ์แบบเพื่อที่จะได้ทราบค่าปริมาณน้ำฝนเป็นรายชั่วโมงได้ สถานีที่กล่าวนี้จะกำหนดให้เป็นสถานีหลัก การจดบันทึกน้ำฝนเป็นรายวันที่สถานีอื่นนั้น (ในช่วงเวลาเดียวกัน) จะถูกรวบรวมมาและนำมาปรับค่าให้เป็นช่วงเวลา 24 ชั่วโมงทั่ว ๆ ไป

คราวนี้ให้เราแบ่งลุ่มน้ำแห่งหนึ่งออกเป็น 6 สถานีด้วยกันและสถิติการวัดน้ำฝนราย 24 ชั่วโมงได้กำหนดไว้ตามข้างล่างนี้

สถานี	สถิติน้ำฝนราย 24 ช.ม.(ซ.ม.)
A	15.0
B	9.0
C	8.5
D	10.5

สถานี	สถิติน้ำฝนราย 24 ช.ม. (ซ.ม.)
E	10.7
F	15.9
	เฉลี่ย = 11.6 ซ.ม.

น้ำฝนที่บันทึกไว้เป็นรายชั่วโมงที่สถานีหลักนั้น แรกสุดจะเปลี่ยนกลับเป็นเปอร์เซ็นต์ของทั้งหมดก่อน จากนั้นจึงสมมุติปริมาณน้ำฝนทั้งหมดให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยมีหน่วยเป็น ซ.ม. (ประมาณเท่ากับความลึกเฉลี่ยของพายุฝนที่กำหนดให้) ด้วยเหตุที่เราสมมุติให้ปริมาณน้ำฝนนั้นมีตัวเลขเป็นจำนวนเต็ม (เช่น 10 ซ.ม.) เราจึงสามารถวัดน้ำฝนรายชั่วโมงที่สถานีหลักได้ ค่าต่าง ๆ ของความจุของการแทรกซึมจะถูกสมมุติขึ้นและปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมงที่เกินมาก็จะสามารถหาได้ ผลรวมของมันจะทำให้เราทราบปริมาณน้ำฝนทั้งหมดที่เกินมาสำหรับค่าที่สมมุติของความจุของการแทรกซึม ดังนั้นจากปริมาณน้ำฝนที่กำหนดให้ (10 ซ.ม.) เราจึงสามารถหาค่านั้น ๆ สำหรับค่าต่าง ๆ ของความจุของการแทรกซึม

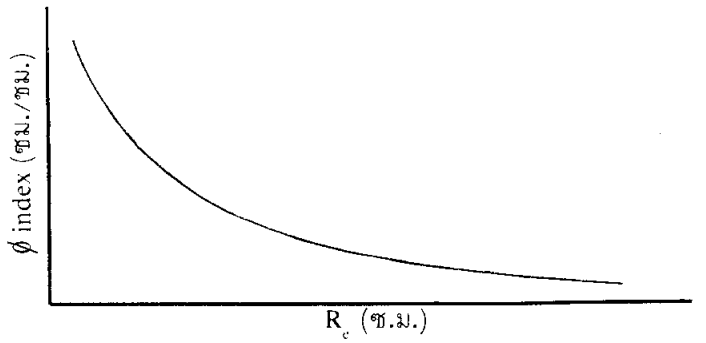
ค่าเลขจำนวนเต็มอื่น ๆ ของปริมาณน้ำฝนทั้งหมดเช่น 6, 8, 12, 14, 16 ซ.ม. ก็จะถูกสมมุติขึ้นเช่นกันและดำเนินการซ้ำเหมือนที่ทำผ่านมา จากนั้นจึงสามารถเขียนเป็นตารางได้

จากนั้นกราฟก็จะถูกกำหนดจุดขึ้นระหว่างค่าปริมาณน้ำฝนทั้งหมด (เช่น 6, 8, 12, 14, 16 ซ.ม. ฯลฯ) บนแกน X และค่าของฝนส่วนเกินบนแกน Y สำหรับค่าที่แตกต่างกันของความจุของการแทรกซึม ดังนั้นจึงทำให้มีเส้นโค้งของความจุของการแทรกซึมต่าง ๆ กันหลายเส้น

เส้นโค้งเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ สถิติปริมาณน้ำฝนทั้งหมดที่สถานีย่อยต่าง ๆ ก็จะถูกนำมาใช้ และปริมาณฝนส่วนเกินสำหรับความจุของการแทรกซึมก็สามารถหาได้ ค่าเฉลี่ยของสถานีทั้งหมดจะทำให้เราทราบถึงค่าเฉลี่ยสำหรับลุ่มน้ำ ดังนั้นค่าของฝนส่วนเกินสำหรับลุ่มน้ำสำหรับค่าต่าง ๆ ของความจุของการแทรกซึมจะสามารถแสดงเป็นตารางได้ในที่สุด จากนั้นจึงสามารถกำหนดจุดเส้นกราฟระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ ดังแสดงไว้ในรูปข้างล่างนี้

Øindex : ค่าเฉลี่ยความจุของการแทรกซึม

R_e : ปริมาณฝนส่วนเกิน



สรุป

การแทรกซึม (infiltration) หมายถึงการที่น้ำไหลจากผิวดินลงไปข้างล่างโดยผ่านช่องว่างในดิน รอยแตกและรูของรากที่เน่าเปื่อย รวมทั้งโพรงที่เกิดจากการไถในดินหลายแห่งหากในสภาวะที่กำหนดให้ อัตราที่ดินสามารถดูดซึมน้ำไว้ได้สูงสุดเรียกว่า **ความจุของการแทรกซึม (infiltration capacity)** และถ้ากำหนดให้อยู่ในช่วงเวลาที่กำหนดให้เรียกว่า อัตราการแทรกซึม (infiltration rate)

ความชื้นในดิน (soil moisture) คือน้ำที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดินซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เขตคือ เขตซึมซาบ เขตระหว่างกลาง และเขตดิน สำหรับระดับความชื้นที่ค่อนข้างจะคงที่ของดินในช่วงความลึกประมาณ 6 นิ้วแรกเรียกว่า **ความจุความชื้นในสนาม (field capacity)**

ความจุของการแทรกซึมในแต่ละพื้นที่จะมากหรือน้อยย่อมขึ้นอยู่กับตัวการต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อมันซึ่งได้แก่ ความหนาของชั้นที่อิ่มตัวและความลึกของการขังบนผิวดิน ความชื้นในดิน แรงปะทะเนื่องจากฝน การชะล้างอนุภาคที่ละเอียด การเหยียบย่ำเนื่องจากคนและสัตว์ พืชปกคลุมดิน และอุณหภูมิ เครื่องมือที่ใช้วัดความจุของการแทรกซึมเรียกว่า **เครื่องวัดการแทรกซึม (infiltrometer)** นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าความจุของการแทรกซึมได้โดยการใช้สมการของโค้งความจุของการแทรกซึม ในพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดเล็กนั้นจะใช้วิธีของฮอร์เนอร์และลอยด์ในการหาค่าของโค้งความจุของการแทรกซึม สำหรับในการหาค่าของความจุของการแทรกซึมของพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่นั้นจะใช้วิธีของฮอร์ตัน

คำถามท้ายบท

1. การแทรกซึมหมายถึงอะไร เปลี่ยนแปลงไปอย่างไรตามฤดูกาล และมีวิธีใดบ้างที่ใช้วัดการแทรกซึม?
2. จงอธิบายถึงความแตกต่างระหว่าง "ความจุของการแทรกซึม" และ "อัตราการแทรกซึม"
3. จงอธิบายถึงตัวการที่มีอิทธิพลต่อความจุของการแทรกซึมมาอย่างคร่าว ๆ
4. จงให้คำจำกัดความและอธิบายคำต่อไปนี้ :
   (1) ความชื้นในดิน
   (2) ความจุของความชื้นในสนาม
   (3) อัตราส่วนเกินจากฝนตก
   (4) ฝนส่วนเหลือ (residual rain)
   (5) ความชื้นสมมูลย์
5. จงเขียนรูปแบบของสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุของการแทรกซึมและเวลาตามที่ฮอร์ตันได้กล่าวไว้
6. พื้นที่แห่งหนึ่งได้มีการบันทึกความจุของการแทรกซึมที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ไว้ดังตารางข้างล่างนี้ จงหาความจุของการแทรกซึมโดยเขียนเป็นสมการในรูปของเลขยกกำลัง

เวลา (ชม.)	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
ความจุของการแทรกซึม (ซม./ชม)	10.4	5.6	3.2	2.1	1.5	1.2	1.1	1.0	1.0

7. จงวาดโค้งความจุของการแทรกซึมมาตรฐานและเขียนสมการของโค้งความจุของการแทรกซึมซึ่งสัมพันธ์กับโค้งนั้นด้วย
8. จงอธิบายอย่างคร่าว ๆ ถึงคำต่อไปนี้โดยให้สัมพันธ์กับน้ำไหลบ่าผิวดินของพายุฝน
   (1) ความจุของการแทรกซึม
   (2) การเก็บกักน้ำในที่ลุ่ม
   (3) การแทรกซึมถดถอย (recession infiltration)
9. จงอธิบายถึงวิธีการหาความจุของการแทรกซึมของพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดเล็กมาอย่างคร่าว ๆ
10. จงอธิบายถึงวิธีการหาความจุของการแทรกซึมของพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่ของฮอร์ตันมาอย่างคร่าว ๆ และจงกล่าวถึงข้อสมมุติฐานในวิธีนี้มาด้วย