

การเปรียบเทียบกระบวนการทางอุทกวิทยาของ
ชั้นดินกลบขยะตามหลักสมดุลของน้ำ
โดยใช้โปรแกรมแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ HYDRUS
กับข้อมูลสนามในพื้นที่ที่ไม่มีหิมะ
Compapison Between Water-Balance Predictions
Made with Hydrus and Field Data for Water
Balance Covers at Sites without Snow

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์ถึงความแม่นยำในการคำนวณค่าของกระบวนการทางอุทกวิทยาของชั้นดินปิดกลบหลุมขยะตามหลักสมดุลของน้ำจำนวน 5 แบบที่มีความแตกต่างทั้งความหนา องค์ประกอบ และสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ 4 เมืองที่ไม่มีหิมะในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้โปรแกรม HYDRUS และข้อมูลค่าเฉลี่ยรายวันที่วัดได้ทั้งจากสนามและในห้องปฏิบัติการให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ข้อมูลที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบได้แก่ ปริมาณน้ำท่า ปริมาณการคายระเหยน้ำ ปริมาณน้ำที่สะสมในชั้นดิน และปริมาณน้ำที่ไหลออกด้านล่างของชั้นดิน ปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้โดยรวมมีค่าสูงกว่าข้อมูลสนาม โดยมีค่าสูงสุดที่ 558.0 มม./ปี ซึ่งมีสาเหตุมาจากค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่าน (K_s) ของพื้นผิวดินและปริมาณน้ำฝน ขณะที่ผลการคำนวณปริมาณการคายระเหยน้ำอาจมีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้ถึง 234.3 มม./ปี หรือน้อยกว่าค่าที่วัดได้ถึง 581.2 มม./ปี ขึ้นอยู่กับผลการคำนวณปริมาณน้ำท่า ค่า K_s ผิวดิน และปริมาณน้ำที่ไหลผ่านพื้นผิวดิน ส่วนปริมาณน้ำที่ไหลออกด้านล่างที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าข้อมูลสนาม ทั้งจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ขอบเขตแบบ seepage face และ unit gradient โดยมีค่าน้อยกว่าข้อมูลสนามน้อยสุดที่ 218.3 มม./ปี นอกจากนี้โปรแกรม HYDRUS ไม่สามารถคำนวณปริมาณน้ำที่สะสมในชั้นดินและน้ำที่ไหลซึมออกทางด้านล่างของชั้นดินที่เกิดจากรอยแยกของดินได้ ดังนั้น การนำผลการคำนวณค่าของกระบวนการทางอุทกวิทยาของชั้นดินปิดกลบหลุมขยะจากโปรแกรม HYDRUS ไปประยุกต์ใช้จึงควรทำอย่างระมัดระวัง

Abstract

This study evaluates the accuracy of HYDRUS in numerically predicting hydrological processes of 5 water-balance landfill final covers varying in design, cover profiles, and climates at 4 field sites without snow in the United States. Measured surface runoff, evapotranspiration, soil-water storage, and percolation were compared with predictions obtained from HYDRUS using daily mean on-site and laboratory-measured data as model input to the greatest extent possible. Surface runoff generally was over-predicted by as much as 558.0 mm/yr. The accuracy in runoff predictions was attributed by the saturated hydraulic conductivity (K_s) of the surface layer and the amount of precipitation. Evapotranspiration could be over-predicted by as much as 234.3 mm/yr or under-predicted by as much as 581 mm/yr. Deviations of evapotranspiration were related to the over-predictions of runoff, the amount of water passing the surface, and the K_s of the surface layer. Percolation was generally underpredicted by as much as 218.3 mm/yr using seepage face or unit gradient. Moreover, measured soil water storage and percolation due to preferential flow was not captured by simulations using HYDRUS. Water balance predictions obtained from numerical models using HYDRUS should be interpreted with cautions.

Keyword : Landfills final covers, numerical model, HYDRUS, water balance predictions

1. บทนำ

แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มีความสำคัญในการออกแบบชั้นดินปิดกั้นหลุมขยะตามหลักสมมูลของน้ำในการตรวจสอบและปรับปรุงความหนาเบื้องต้นของชั้นดินกลบขยะที่คำนวณด้วยมือ (1-3) เพื่อให้ชั้นดินปิดกั้นหลุมขยะมีความหนาพอเพียงในการกักเก็บน้ำและสามารถปลดปล่อยน้ำกลับสู่ชั้นบรรยากาศโดยกระบวนการระเหยและการสังเคราะห์แสงของพืช โดยยอมให้น้ำไหลซึมออกด้านล่างของชั้นดินปิดกั้นหลุมขยะไม่เกินค่าที่กำหนดในการออกแบบ

ถึงแม้ว่ามีการวิจัยในอดีตที่ทำการศึกษเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์กับข้อมูลสนามของกระบวนการทางอุทกวิทยาสำหรับชั้นดินปิดกั้นหลุมขยะตามหลักสมมูลของน้ำ (4-11) แต่ในงานวิจัยส่วนใหญ่นี้ คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินและพืชถูกคาดคะเนหรือได้มาจากการปรับแก้ ทำให้การวิเคราะห์ความแม่นยำของผลที่ได้จากการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์อาจไม่สะท้อนสภาพความเป็นจริงในสนาม ซึ่งความแม่นยำของผลการคำนวณแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มีความสำคัญมากในการออกแบบ เนื่องจากค่าที่ยอมให้ของปริมาณน้ำที่ไหลออกด้านล่างของชั้นดินกลบขยะในบางกรณีอาจมีค่าต่ำถึง 1 มม./ปี (12)

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์ความแม่นยำของโปรแกรมแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ HYDRUS ในการคำนวณค่ากระบวนการทางอุทกวิทยาของชั้นดินกลบขยะตามหลักสมมูลของน้ำ ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณน้ำท่าผิวดิน ปริมาณการคายระเหยน้ำ ปริมาณน้ำสะสมในชั้นดิน และปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้านล่างของชั้นดิน เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้ในสนามจำลอง โดยใช้ข้อมูลที่วัดในสนามและในห้องปฏิบัติการเป็นข้อมูลให้ใกล้เคียงกับสภาพสนามจริงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

2. สนามจำลองชั้นดินปิดกั้นหลุมขยะ

สนามจำลองชั้นดินกลบขยะที่ศึกษาตั้งอยู่ในพื้นที่ 4 เมืองใน 2 มลรัฐของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้แก่ เมือง Albany มลรัฐจอร์เจีย เมือง Altamont เมือง Marina และเมือง Sacramento มลรัฐแคลิฟอร์เนีย โดยมีค่าทางสภาพภูมิอากาศโดยเฉลี่ยของพื้นที่ศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 1 ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยในพื้นที่ศึกษามีค่าตั้งแต่ 358-1263 มม./ปี และมีสภาพภูมิอากาศแบบกึ่งแห้งแล้งและชุ่มชื้น โดยพื้นที่ทั้งหมดไม่มีหิมะตกหรือมีปริมาณหิมะตกน้อยกว่า 2 มม./ปี

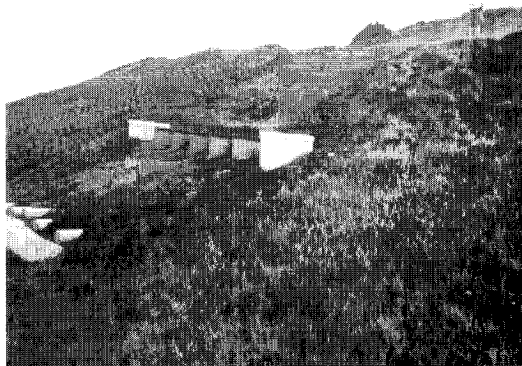
ตารางที่ 1 สภาพภูมิอากาศในพื้นที่ศึกษาและความหนาชั้นดินกลบขยะ

ที่ตั้งสนาม จำลองชั้นดิน กลบขยะ	ปริมาณ น้ำฝนเฉลี่ย (มม./ปี)	สภาพ ภูมิอากาศ (ม.)	ความหนา ชั้นดินกลบขยะ
Albany, GA	1263	ชุ่มชื้น	1.45
Altamont, CA	358	กึ่งแห้งแล้ง	1.36
Marina, CA	466	กึ่งแห้งแล้ง	1.52
Sacramento, CA	434	กึ่งแห้งแล้ง	1.53, 2.91

สนามจำลองชั้นดินกลบขยะตามหลักสมมูลของน้ำที่ทำการศึกษามีจำนวน 5 สนาม มีความหนาตั้งแต่ 1.36-2.91 ม. (ตารางที่ 1) โดยแต่ละสนามกระจายอยู่ในแต่ละเมือง ยกเว้นที่เมือง Sacramento มี 2 สนามจำลองที่มีความหนาแตกต่างกัน สนามจำลองชั้นดินกลบขยะประกอบด้วยชั้นผิวดิน ชั้นดินสะสมน้ำ และชั้นดินฐานรอง โดยใช้ดินที่มีอยู่ในพื้นที่ก่อสร้างและปลูกหญ้าปกคลุม และมีการปลูกไม้ยืนต้นเพิ่มเติมที่เมือง Albany รายละเอียดชนิดของพืชที่ปลูกคลุมชั้นดินกลบขยะสรุปไว้ใน (7)

สนามจำลองชั้นดินกลบขยะมีการติดตั้งสถานีตรวจวัดสภาพภูมิอากาศและระบบ pan lysimeter เพื่อใช้วัดค่าข้อมูลสนามของปริมาณน้ำท่าผิวดินและน้ำที่ไหลออกด้านล่างของชั้นดิน นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งระบบวัดปริมาณความชื้นในดินและค่าความดันของน้ำในดินที่มีความลึกต่าง ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการหาค่าปริมาณน้ำที่สะสมในชั้นดินกลบขยะ (13-14) ปริมาณการคายระเหยน้ำที่แท้จริงคำนวณจากผลต่างระหว่างปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำท่า ปริมาณน้ำที่ไหลออกด้านล่าง และปริมาณการเปลี่ยนแปลงของน้ำที่สะสมในชั้นดิน

สนามจำลองทั้งหมดถูกสร้างขึ้นที่ความลาดชัน 5% ยกเว้นที่เมือง Marina ที่ถูกสร้างขึ้นที่ความลาดชัน 25% โดยสนามจำลองทั้งหมดสร้างเสร็จในปี พ.ศ. 2543 ตัวอย่างสนามจำลองชั้นดินกลบขยะที่เมือง Marina แสดงไว้ในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สนามจำลองชั้นดินกลบขยะที่เมือง Marina มลรัฐแคลิฟอร์เนีย

3. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของชั้นดินกลบขยะ

แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของชั้นดินปิดกลบขยะถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม HYDRUS v.2.1 (15) ซึ่งเป็นโปรแกรมไฟไนต์อีลิเมนต์อนุภาคสามเหลี่ยมที่จำลองการไหลของน้ำผ่านดินที่ไม่อิ่มตัวโดยใช้สมการริชาร์ดส์

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A) \right] - S \quad (1)$$

โดยที่ θ คือปริมาณความชื้นในดิน t คือเวลา x_i คือแกนแสดงทิศทางการไหลของน้ำในดิน K คือค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านของดิน K_{ij}^A และ K_{iz}^A คือความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านของดินในแกนที่ต่างกัน และ S คือปริมาณการดูดน้ำของพืชผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง

ข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ประกอบด้วยสภาพภูมิอากาศ คุณสมบัติของดิน และคุณสมบัติของพืช ข้อมูลสภาพภูมิอากาศที่ใช้ในแบบจำลอง ได้แก่ ปริมาณน้ำฝนและค่าศักยภาพการระเหยน้ำ (Potential evaporation: PE) ซึ่งค่าศักยภาพการระเหยน้ำคำนวณจากสัดส่วนของค่าศักยภาพการคายระเหยน้ำ (Potential evapotranspiration: PET) โดยคำนวณจากข้อมูลสภาพภูมิอากาศอื่น เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วและทิศทางของลม และปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (16)

คุณสมบัติของดินที่ใช้ในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ได้แก่ ค่าเฉลี่ยของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านของดิน (Saturated hydraulic conductivity: K_s) และตัวแปรแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและความดูดของน้ำในดินที่ไม่อิ่มตัว (Soil water characteristic curves: SWCC) ซึ่งได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างดินขนาดใหญ่ (Block samples) ที่เก็บมาจากแต่ละชั้นดินหลังการก่อสร้างแล้วเสร็จและจากชั้นพื้นผิวดินในช่วงการตรวจเยี่ยมสนามรายปีหลังการก่อสร้าง โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของ SWCC แสดงด้วยสมการ van Genuchten (17)

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

โดยที่ θ_s คือ ความชื้นของดินที่อิ่มตัว θ_r คือ ความชื้นของดินหลังจากที่สูญเสียไอน้ำไปมากที่สุด h คือ ค่าศักย์ของน้ำในดิน ส่วนค่า α , n , และ m คือ ค่าคงที่ในการเชื่อมข้อมูล โดยที่ $m = 1 - 1/n$ ขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านดินที่ไม่อิ่มตัว ($K(h)$) กับตัวแปรของ SWCC ในสมการที่ 2 ถูกสร้างขึ้นโดยใช้รูปแบบการกระจายขนาดคละของช่องว่างในดิน (18) ดังแสดงในสมการที่ 3

$$K(h) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (3)$$

ค่า l คือ ค่าคงที่ในการเชื่อมต่อกันระหว่างช่องว่างในดินและเท่ากับ 0.5 สำหรับดินทั่วไป (18) โดยกำหนดให้ค่าคุณสมบัติของดินมีค่าเท่ากันทุกทิศทางในแต่ละชั้นดิน

คุณสมบัติของพืชที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ประกอบด้วยความยาวของราก ความหนาแน่นของราก พื้นที่ปกคลุมของใบไม้ ค่าศักยภาพการสังเคราะห์แสงและคายน้ำของพืช (Potential transpiration: PT) และปริมาณน้ำในดินบริเวณรากของพืช โดยความยาวสูงสุดของรากของพืชถูกกำหนดไว้ที่แผ่นกั้นการขยายตัวของรากของพืช (Root barrier) ที่ติดตั้งในชั้นดินกลบขยะและมีอัตราการขยายตัวที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ ความหนาแน่นของดิน ระยะเวลาในการเจริญเติบโตของพืช และปริมาณแร่ธาตุในดิน (7) ขณะที่ความหนาแน่นของรากของพืชได้มาจากการทดสอบตัวอย่างพืชที่เก็บระหว่างก่อสร้างและการตรวจเยี่ยมสถานที่ก่อสร้างรายปี (19) ส่วนพื้นที่ปกคลุมของใบไม้แสดงโดยใช้ฟังก์ชันสำหรับค่าดัชนีพื้นที่ปกคลุมของพืช (Leaf area index: LAI) ซึ่งสร้างจากค่า LAI ที่ทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและในสนามแบบจำลอง จากตัวอย่างพืชที่เก็บระหว่างก่อสร้างและการตรวจเยี่ยมสถานที่ก่อสร้างรายปีในช่วงที่พืชมีค่า LAI สูงสุด (7)

ค่าศักยภาพการสังเคราะห์แสงและการคายน้ำของพืช (PT) คำนวณจากสัดส่วนของค่าศักยภาพการคายระเหยน้ำ (PET) และค่า LAI โดยใช้สมการของ Ankeny-Ritchie and Burnett (20) และค่าปรับแก้ สำหรับการเติบโตของรากของพืชตามสมการที่ 4

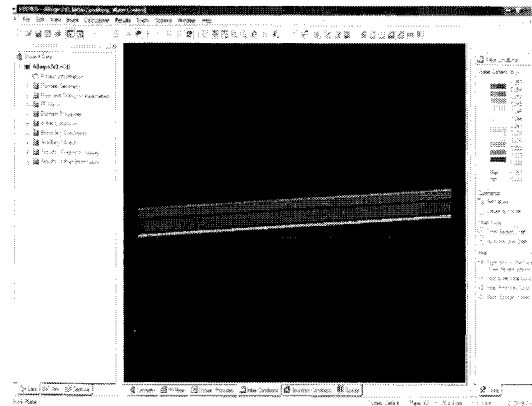
$$PT = PET(0.52\sqrt{LAI}) \left(\frac{z_t \int_{z_t}^{z_{max}} RLDdz}{0} \right) \quad (4)$$

โดยค่า LAI คือค่าดัชนีพื้นที่ปกคลุมของพืช RLD คือความหนาแน่นของรากของพืช z_t คือ ความลึกของรากของพืชที่เวลา t โด และ z_{max} คือความยาวสูงสุดของรากพืชในชั้นดินกลบขยะ

ปริมาณน้ำในดินบริเวณรากของพืชที่ใช้ในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์อยู่ในรูปแบบการตอบสนองของพืชผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงซึ่งขึ้นอยู่กับค่า PET และค่าศักย์ของน้ำในดิน (21) ค่าศักย์ของน้ำในดินประกอบด้วยค่าศักย์ของน้ำในดินที่จุดที่ไม่มีออกซิเจนในดิน (anaerobiosis point) ค่าศักย์ของน้ำในดินที่จุดสูงสุด (optimal point) ค่าศักย์ของน้ำในดินที่ทำให้พืชเริ่มเหี่ยวเฉา (wilting point) และค่าศักย์ของน้ำในดินที่การสังเคราะห์แสงของพืชเริ่มลดลง (limiting point) โดยที่ค่าanaerobiosis point และค่า optimal point ถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 85% ของค่าศักย์ที่อิ่มตัวของดิน ขณะที่ค่า wilting point ถูกกำหนดให้เป็นค่าศักย์เฉลี่ยของน้ำในดินที่ความลึก 0.6 ม. จากพื้นผิวดินในวันที่มีปริมาณน้ำที่สะสมในดินต่ำที่สุด และค่า limiting point ถูกกำหนดให้เป็นค่าศักย์ของน้ำที่อยู่ระหว่างค่า ศักย์ของน้ำในดินเท่ากับ 33 kPa (field capacity) และค่า wilting point (22)

ระยะห่างระหว่างหมุดในอนุภาคสามเหลี่ยมของแบบจำลองต่ำสุดที่ 1 มม. ถูกใช้ที่ขอบเขตด้านบนและด้านล่างของแบบจำลองและที่ระหว่างชั้นดินที่มีคุณสมบัติทางกลศาสตร์ที่แตกต่างกันมาก และระยะห่างระหว่างหมุดเพิ่มขึ้นที่ระยะห่างออกไปจากจุดเหล่านี้ โดยระยะห่างระหว่างหมุดมากที่สุดอยู่ที่ 30 มม. ขั้นตอนที่ใช้ในการคำนวณแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เริ่มตั้งแต่ 1 วันจนถึง 10^{-15} วัน ความแตกต่างของปริมาณความชื้นที่ยอมให้ในแต่ละช่วงการคำนวณสองครั้งที่ติดกันมีค่าต่ำสุดที่ 10^{-7} ขณะที่ความแตกต่างของ

ค่าศักย์ของน้ำในดินที่ยอมให้ในแต่ละช่วงการคำนวณสองครั้งที่ติดกันมีค่าต่ำสุดที่ 0.1 มม. ข้อกำหนดเหล่านี้ถูกใช้ในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อให้ค่าผิดพลาดในการคำนวณสมดุลของน้ำมีค่าต่ำที่สุด ($\approx 1\%$) ตัวอย่างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของชั้นดินกลบขยะโดยใช้โปรแกรม HYDRUS ที่เมือง Albany แสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม HYDRUS ของชั้นดินกลบขยะตามหลักสมดุลของน้ำที่เมือง Albany มลรัฐจอร์เจีย

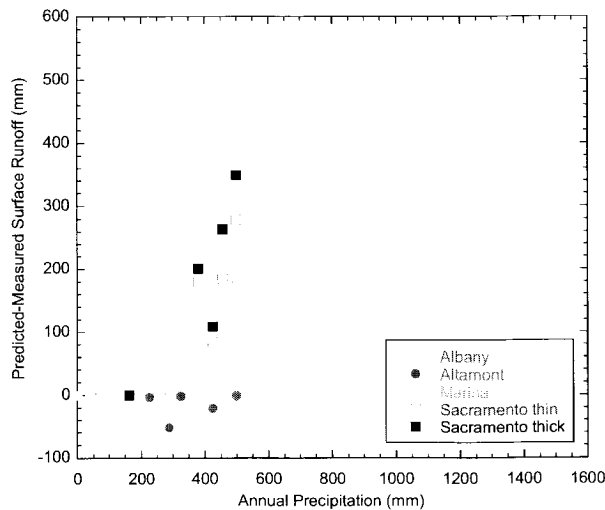
4. ผลการศึกษาวิจัย

ผลการคำนวณค่าทางกระบวนการทางอุทกวิทยาจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของชั้นดินกลบขยะซึ่งประกอบด้วยปริมาณน้ำท่าผิวดิน ปริมาณการคายระเหยน้ำ ปริมาณน้ำสะสมในชั้นดิน และปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้านล่างของชั้นดิน โดยใช้โปรแกรม HYDRUS รวมถึงค่าที่วัดได้จากสนามจำลองเพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบที่ใช้แสดงและวิเคราะห์ผลการศึกษาวิจัยนี้ เป็นค่าเป็นรายปีที่อยู่ในช่วงระหว่างวันที่ 1 กรกฎาคมถึง 30 มิถุนายนของปีถัดไปและได้จากแบบจำลองที่มีขอบเขตด้านล่างแบบ seepage face

เนื่องจากปริมาณน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองแบบ seepage face และแบบ unit gradient มีความแตกต่างกันน้อยมาก (< 5.2 มม./ปี)

4.1 ปริมาณน้ำท่าผิวดิน

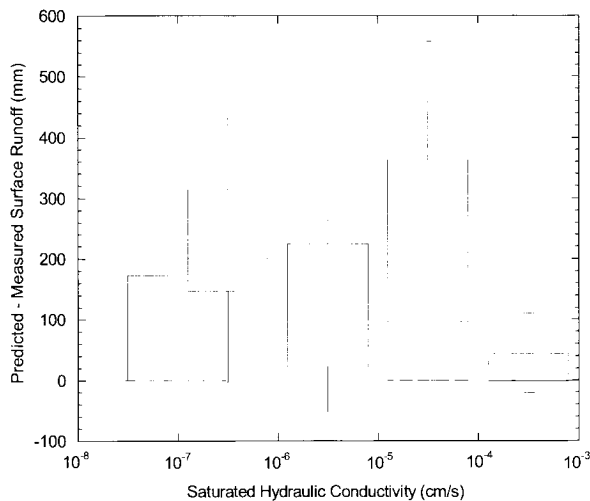
ปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าข้อมูลสนามที่วัดได้ โดยมีค่ามัธยฐานของความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้กับที่วัดได้อยู่ที่ $+109.1$ มม./ปี นอกจากนี้ปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้กับปริมาณน้ำท่าที่วัดได้จากสนามมีความแตกต่างมาก (ตั้งแต่ -52.4 มม./ปี ถึง $+558.0$ มม./ปี)



ภาพที่ 3 ผลต่างระหว่างค่าปริมาณน้ำท่าผิวดินที่คำนวณจากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ โดยโปรแกรม HYDRUS กับค่าที่วัดได้จากสนามจำลองของชั้นดินกลบขยะเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำฝนต่อปี

ปัจจัยหนึ่งนี้อาจทำให้มีความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำท่าที่วัดได้และที่คำนวณได้คือปริมาณน้ำฝน เนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่ตกในช่วงที่เต็มปีมีค่าอยู่ระหว่าง 287-1380 มม./ปี ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้กับค่าที่วัดได้ในสนาม เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำฝนที่ตกต่อปีแสดงในภาพที่ 3 ความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้กับค่าที่วัดได้ในสนามมีค่าน้อยเมื่อมีฝนตกในปริมาณที่น้อย แต่จะมีแนวโน้มที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำฝนเพิ่มมากขึ้น โดยที่ปริมาณน้ำฝนที่น้อยที่สุดที่ทำให้ปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้กับค่าที่วัดได้เริ่มแตกต่างกันอยู่ที่ประมาณ 200 มม./ปี

อีกปัจจัยนี้อาจเป็นสาเหตุของความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์กับปริมาณน้ำท่าในสนามในพื้นที่ที่ไม่มีหิมะ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านของชั้นพื้นผิวดินของชั้นดินกลบขยะ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านของชั้นพื้นผิวดินของชั้นดินกลบขยะในแต่ละพื้นที่ที่ทำการศึกษามีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก (8.6×10^{-8} – 3.3×10^{-4} ซม./วินาที) ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำท่าที่ไม่ได้ไหลเข้าชั้นดินกลบขยะที่คำนวณได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ โดยโปรแกรม HYDRUS กับปริมาณน้ำท่าที่วัดได้จากสนามจำลองของพื้นที่ที่ไม่มีหิมะและค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านของดินอิมตัวของชั้นผิวดินแสดงในรูปกราฟแบบกล่อง (Box plot) ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 Box plot แสดงความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำท่าผิวดินที่คำนวณจากแบบจำลองโดยโปรแกรม HYDRUS กับปริมาณน้ำท่าที่วัดได้จากสนามจำลองของชั้นดินกลบขยะที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านของผิวดินอิมตัว

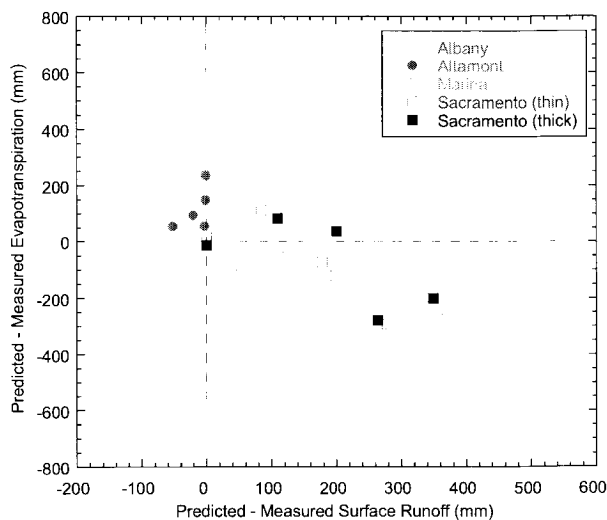
ภาพที่ 4 แสดงให้เห็นว่า ความแตกต่างในภาพรวมที่ปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าปริมาณน้ำท่าที่วัดได้นั้นมีค่าลดลงเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านของชั้นผิวดินมีค่าสูงขึ้น โดยสังเกตได้จากค่ามัธยฐานที่ลดลง ความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้กับปริมาณน้ำท่าที่วัดได้สูงมาก สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านของชั้นผิวดินที่มีค่าต่ำมาก น่าจะมาจากความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านของชั้นผิวดินที่ใช้ในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์กับค่าที่วัดได้ในสนาม โดยค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านของชั้นผิวดินที่ใช้ในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เป็นค่าที่วัดได้ในช่วงเวลาหนึ่งและถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดปีของการคำนวณแบบจำลอง

ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านของชั้นผิวดินในสนามแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพดิน พืช และภูมิอากาศ

4.2 ปริมาณการคายระเหยน้ำ

ปริมาณการคายระเหยน้ำที่คำนวณจากแบบจำลองโดยโปรแกรม HYDRUS มีทั้งค่าที่มากกว่าและน้อยกว่าค่าที่วัดได้ในสนาม โดยปริมาณการคายระเหยน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้ในสนามมากที่สุดอยู่ที่ +234.3 มม./ปี ขณะที่ปริมาณการคายระเหยน้ำที่คำนวณได้ที่มีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้ในสนามอยู่ที่ -581.2 มม./ปี

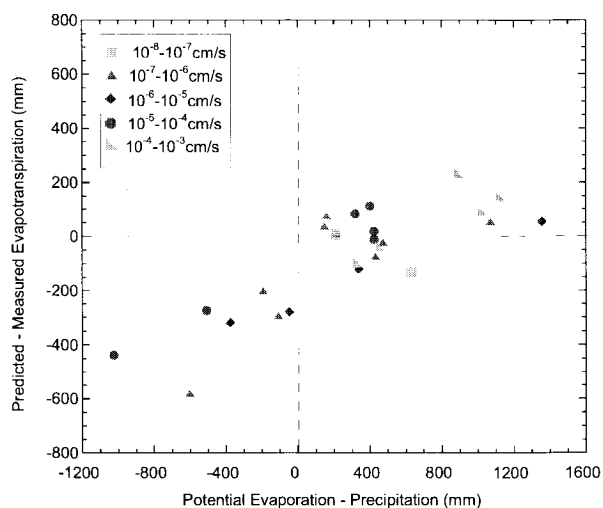
ความแม่นยำในการคำนวณปริมาณน้ำท่าผิวดินอาจมีผลกระทบต่อความแม่นยำในการคำนวณปริมาณการคายระเหยน้ำ เนื่องจากส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ไหลเข้าชั้นดินกลบขยะที่ใช้ในการคำนวณปริมาณการคายระเหยน้ำ ภาพที่ 5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างระหว่างปริมาณการคายระเหยน้ำต่อปีที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่ใช้ขอบเขตด้านล่างแบบ seepage face โดยโปรแกรม HYDRUS และที่วัดได้จากสนามจำลอง เมื่อเทียบกับความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำท่าต่อปีที่คำนวณได้และที่วัดได้จากสนามจำลองของชั้นดินกลบขยะที่ทำการศึกษา ภาพที่ 5 บ่งชี้ว่า ความแตกต่างระหว่างปริมาณการคายระเหยน้ำที่คำนวณได้และที่วัดได้จากสนามจำลองแปรผกผันกับความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำท่าต่อปีที่คำนวณได้และที่วัดได้จากสนาม ซึ่งปริมาณการคายระเหยน้ำที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่ส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าค่าที่วัดได้จากสนามนั้นเนื่องมาจากผลการคำนวณปริมาณน้ำท่าที่มากกว่าข้อมูลสนาม



ภาพที่ 5 ความแตกต่างระหว่างปริมาณการคายระเหยน้ำต่อปีที่คำนวณจากแบบจำลองโดยโปรแกรม HYDRUS และที่วัดได้จากสนามจำลอง เมื่อเทียบกับความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำท่าต่อปีที่คำนวณจากแบบจำลองและที่วัดได้จากสนามจำลองของชั้นดินกลบขยะ

ความแตกต่างระหว่างปริมาณการคายระเหยน้ำที่คำนวณจากแบบจำลองโดยโปรแกรม HYDRUS และที่วัดได้จากสนามจำลองอาจมาจากการคำนวณปริมาณการระเหยน้ำบนผิวดินของแบบจำลองในโปรแกรม HYDRUS ที่ใช้ขอบเขตด้านบนแบบ atmospheric ซึ่งขึ้นอยู่กับผลต่างระหว่างค่าศักยภาพการระเหยน้ำบนผิวดินกับปริมาณน้ำฝน รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำไหลผ่านของพื้นผิวดิน (K_s) ความแตกต่างระหว่างปริมาณการคายระเหยน้ำต่อปีที่คำนวณจากแบบจำลองโดยโปรแกรม HYDRUS และที่วัดได้จากสนามจำลอง เมื่อเทียบกับผลต่างระหว่างค่าศักยภาพการระเหยน้ำบนผิวดินกับปริมาณน้ำฝนต่อปีของชั้นดินกลบขยะที่ทำการศึกษาแสดงไว้ในภาพที่ 6 ซึ่งจัดกลุ่มตามช่วงของค่า K_s

ภาพที่ 6 บ่งชี้ว่าความแตกต่างระหว่างปริมาณการคายระเหยน้ำต่อปีที่คำนวณจากแบบจำลองโดยโปรแกรม HYDRUS และที่วัดได้จากสนามจำลองโดยรวมแปรผันโดยตรงกับผลต่างระหว่างค่าศักยภาพการระเหยน้ำบนผิวดินกับปริมาณน้ำฝน โดยที่ปริมาณการคายระเหยน้ำที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าข้อมูลสนามเมื่อปริมาณน้ำฝนมากกว่าค่าศักยภาพการระเหยน้ำ และมีค่ามากกว่าข้อมูลสนามเมื่อปริมาณน้ำฝนน้อยกว่าค่าศักยภาพการระเหยน้ำ



ภาพที่ 6 ความแตกต่างระหว่างปริมาณการคายระเหยน้ำต่อปีที่คำนวณจากแบบจำลองโดยโปรแกรม HYDRUS และที่วัดได้จากสนามจำลอง เมื่อเทียบกับผลต่างระหว่างค่าศักยภาพการระเหยน้ำบนผิวดินกับปริมาณน้ำฝนต่อปีของชั้นดินกลบขยะ

นอกจากนี้ ภาพที่ 6 ยังบ่งชี้ว่า ค่า K_s ก็มีผลกระทบต่อความแตกต่างระหว่างปริมาณการคายระเหยน้ำที่คำนวณได้กับข้อมูลสนามด้วย โดยเฉพาะในกรณีที่ว่า PE มีค่ามากกว่า ปริมาณน้ำฝน แบบจำลองส่วนใหญ่ที่มีค่า K_s สูงและมี

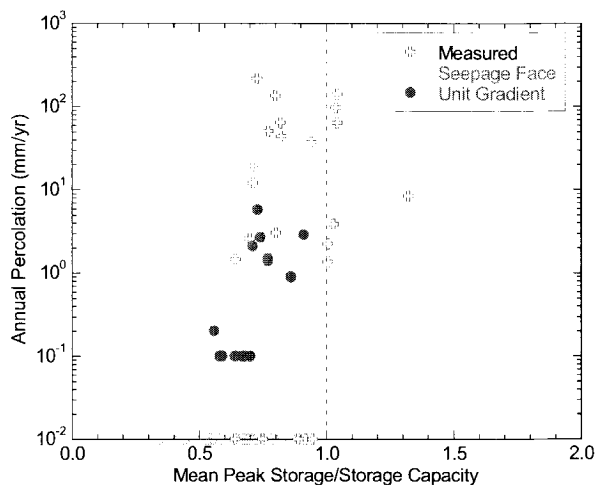
จะมีความแตกต่างของปริมาณการคายระเหยน้ำมากกว่าแบบจำลองที่มีค่า K_s ต่ำ

4.3 ปริมาณน้ำที่ไหลออกด้านล่าง

ปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้านล่างของทุกแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของชั้นดินกลบขยะที่คำนวณได้จากโปรแกรม HYDRUS โดยใช้ลักษณะขอบเขตแบบ seepage face มีค่าเท่ากับศูนย์ในทุกแบบจำลอง ขณะที่ปริมาณน้ำที่วัดได้จากสนามแบบจำลองมีค่าตั้งแต่ 0.0 มม. จนถึง 218.3 มม. การที่ไม่มีน้ำไหลออกทางด้านล่างของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของชั้นดินกลบขยะบ่งบอกว่าไม่มีน้ำไหลลงไปถึงขอบเขตด้านล่างของชั้นดินกลบขยะ หรือน้ำไหลถึงขอบเขตด้านล่างแต่มีปริมาณไม่เพียงพอที่ทำให้ดินที่ขอบเขตด้านล่างอิ่มตัว จนทำให้เกิดการไหลของน้ำออกจากด้านล่างของแบบจำลองชั้นดินกลบขยะ ซึ่งอาจเกิดจากน้ำที่ไหลเข้าและสะสมอยู่ในชั้นดินกลบขยะถูกดึงดูดออกไปโดยกระบวนการคายระเหยน้ำก่อนที่จะมีการไหลไปถึงขอบเขตด้านล่าง ในทางตรงกันข้าม ปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้านล่างของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของชั้นดินกลบขยะโดยใช้ลักษณะขอบเขตแบบ unit gradient ซึ่งเป็นลักษณะของขอบเขตที่น้ำไหลออกจากขอบเขตด้านล่างภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก มีปริมาณที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีปริมาณน้ำที่คำนวณได้มากที่สุดอยู่ที่ 5.8 มม./ปี อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้านล่างที่คำนวณได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ทั้งแบบ seepage face และ

แบบ unit gradient มีค่าน้อยกว่าปริมาณน้ำที่วัดได้ในสนาม โดยมีค่าน้อยสุดที่ -218.3 มม./ปี

ปริมาณความจุน้ำของชั้นดินกลบขยะอาจมีผลต่อการคำนวณปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้านล่างของชั้นดินกลบขยะ เนื่องจากในการออกแบบ น้ำที่ไหลออกทางด้านล่างของชั้นดินกลบขยะถูกกำหนดให้เกิดขึ้นเมื่อน้ำที่ไหลเข้าไปสะสมในชั้นดินกลบขยะมีปริมาณมากกว่าปริมาณความจุน้ำของชั้นดินกลบขยะ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้านล่างของชั้นดินกลบขยะต่อปีที่คำนวณได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์โดยโปรแกรม HYDRUS ที่ใช้ขอบเขตด้านล่างแบบ seepage face และแบบ unit gradient รวมถึงปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้านล่างของชั้นดินกลบขยะต่อปีที่วัดได้ในสนาม เมื่อเทียบกับอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำสูงสุดที่ไหลเข้าไปสะสมกับปริมาณความจุน้ำของชั้นดินกลบขยะ แสดงไว้ในภาพที่ 7 โดยข้อมูลสนามของปริมาณน้ำสูงสุดที่ไหลเข้าไปสะสมในชั้นดินกลบขยะ คือ ปริมาณน้ำสูงสุดที่สะสมอยู่ในชั้นดินกลบขยะที่วัดได้ในแต่ละปีขณะที่ปริมาณน้ำสูงสุดที่ไหลเข้าไปสะสมในแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของชั้นดินกลบขยะได้มาจากการคำนวณปริมาณน้ำสูงสุดที่สะสมอยู่ในชั้นดินกลบขยะในแต่ละปี ส่วนปริมาณความจุน้ำของชั้นดินกลบขยะ คือ ค่าความจุน้ำเฉลี่ยในชั้นดินกลบขยะที่คำนวณจากผลรวมของปริมาตรของน้ำภายในแบบจำลองชั้นดินกลบขยะในแต่ละปีของชั้นดินกลบขยะ



ภาพที่ 7 ปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้านล่าง รายปีของชั้นดินกลบขยะที่วัดได้จาก สนามจำลองและที่คำนวณได้จากแบบ จำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ขอบเขต ด้านล่างทั้งแบบ seepage face และแบบ unit gradient โดยใช้ โปรแกรม HYDRUS เมื่อเทียบกับ อัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำสูงสุด ที่ไหลเข้าไปสะสมกับปริมาณความจุ น้ำของชั้นดินกลบขยะที่ทำการศึกษา

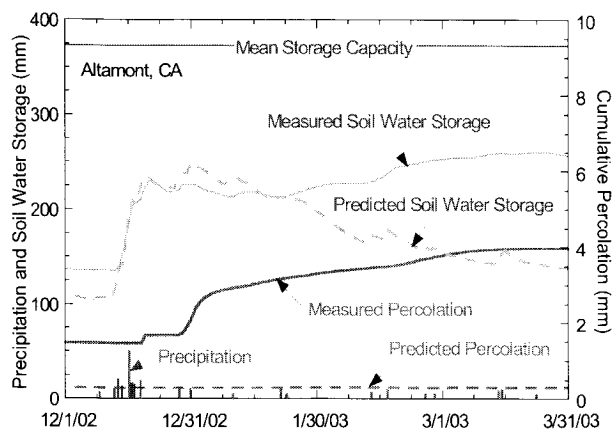
ภาพที่ 7 บ่งชี้ว่า รูปแบบการกระจาย ของข้อมูลของปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้านล่าง ที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่ใช้ขอบเขตด้าน ล่างทั้งแบบ seepage face และแบบ unit gradient ไม่มีความใกล้เคียงกับรูปแบบการ กระจายของข้อมูลของปริมาณน้ำที่ไหลออกทาง ด้านล่างที่วัดได้จากสนามจำลอง โดยรูปแบบการ กระจายของข้อมูลของปริมาณน้ำที่ไหลออกทาง ด้านล่างที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่ใช้ขอบเขต ด้านล่างแบบ seepage face เป็นเส้นตรงใน แนวอนและมีค่าเท่ากับศูนย์ในทุกข้อมูล ส่วนรูป แบบการกระจายของข้อมูลของปริมาณน้ำที่ไหล ออกทางด้านล่างที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่ใช้ ขอบเขตด้านล่างแบบ unit gradient มีค่าเพิ่ม

ขึ้นไปตามอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำสูงสุดที่ไหล เข้าไปสะสมกับปริมาณความจุ น้ำ ขณะที่รูปแบบ การกระจายของข้อมูลของปริมาณน้ำที่ไหลออก ทางด้านล่างที่วัดได้จากสนามจำลองอยู่ระหว่าง รูปแบบการกระจายของทั้งสองข้อมูลที่คำนวณได้ โดยมีค่าเริ่มต้นของอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำ สูงสุดที่ไหลเข้าไปสะสมกับปริมาณความจุ น้ำที่มี น้ำที่ไหลออกทางด้านล่างอยู่ที่ 0.52 และปริมาณ น้ำที่ไหลออกทางด้านล่างที่วัดได้ส่วนใหญ่เพิ่มขึ้น ไปตามอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำสูงสุดที่ไหล เข้าไปสะสมกับปริมาณความจุ น้ำ ขณะเดียวกัน ก็มีข้อมูลหลายค่าที่บ่งชี้ว่าไม่มีปริมาณน้ำที่ไหล ออกทางด้านล่างที่วัดได้ ถึงแม้ว่าอัตราส่วน ระหว่างปริมาณน้ำสูงสุดที่ไหลเข้าไปสะสมกับ ปริมาณความจุ น้ำที่ค่ามากกว่า 0.52

ข้อมูลของปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้าน ล่างที่วัดได้ในสนามที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณ น้ำสูงสุดที่ไหลเข้าไปสะสมกับปริมาณความจุ น้อยกว่า 1 ในภาพที่ 7 นั้น ⁽²³⁾ รายงานว่า เกิดจากกระบวนการ preferential flow ซึ่ง เป็นการไหลของน้ำออกทางด้านล่างของชั้น ดินกลบขยะตามรอยแยกในชั้นดินที่เกิดจาก กระบวนการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางชลศาสตร์ของ ดิน และการขนถ่ายของรากของพืช ซึ่งโปรแกรม HYDRUS ไม่มีการจำลองกระบวนการ preferential flow และไม่สามารถคำนวณปริมาณน้ำที่ไหล ออกทางด้านล่างของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ เกิดจากกระบวนการนี้ได้

ตัวอย่างที่สามารถอธิบายให้เห็นภาพแสดง ในภาพที่ 8 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณน้ำที่สะสมในชั้นดินกลบขยะ ปริมาณความจุ น้ำเฉลี่ย ปริมาณน้ำฝนรายวัน และปริมาณสะสมของน้ำที่ไหลออกทางด้านล่าง กับเวลาเป็นรายวันของชั้นดินกลบขยะที่เมือง

Altamont มลรัฐแคลิฟอร์เนีย ในช่วงระหว่างวันที่ 1 ธันวาคม 2545 ถึง 31 มีนาคม 2546 ซึ่งเป็นช่วงที่มีฝนตกในปริมาณที่น้อย โดยปริมาณฝนตกรายวันมากที่สุดอยู่ที่ 53 มม. ซึ่งวัดได้ในกลางเดือนธันวาคม 2545 ขณะที่ปริมาณฝนตกเฉลี่ยรายวันหลังจากนั้นอยู่ที่ 2 มม. ในทางตรงกันข้าม ปริมาณน้ำที่สะสมในชั้นดินกลบขยะในช่วงหลังเดือนธันวาคม 2545 กลับเพิ่มขึ้นในปริมาณที่มากกว่าปริมาณน้ำฝน และถึงแม้ว่าปริมาณน้ำที่สะสมในชั้นดินกลบขยะที่เพิ่มขึ้นมีค่าต่ำกว่าปริมาณความจุของน้ำในชั้นดินกลบขยะ ปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้านล่างก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำที่สะสมในชั้นดินกลบขยะ ขณะที่ปริมาณน้ำที่สะสมที่คำนวณได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ขอบเขตด้านล่างแบบ unit gradient มีค่าลดลงไปตามเวลาในช่วงนี้ เนื่องจากปริมาณน้ำฝนที่ตกในช่วงนี้มีค่าน้อยกว่าค่าศักยภาพการระเหยของน้ำบนผิวดิน ทำให้การไหลผ่านของน้ำบนผิวดินเป็นการไหลออกโดยการระเหยของน้ำบนดิน และไม่มีน้ำไหลเข้าไปสะสมเพิ่มในแบบจำลองที่จะไปทำให้เกิดปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้านล่างของแบบจำลอง



ภาพที่ 8 ปริมาณน้ำที่สะสมในชั้นดินกลบขยะ ปริมาณความจุน้ำเฉลี่ย ปริมาณน้ำฝนรายวัน และปริมาณสะสมของน้ำที่ไหลออกทางด้านล่างในช่วงระหว่างวันที่ 1 ธ.ค.45 ถึง 31 มี.ค.46 ของชั้นดินกลบขยะที่เมือง Altamont มลรัฐแคลิฟอร์เนีย

5. สรุปผลการศึกษาวิจัย

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาวิเคราะห์ความแม่นยำในการทำนายค่าของกระบวนการทางอุทกวิทยาของแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของชั้นดินกลบขยะตามหลักสมมูลของน้ำโดยใช้โปรแกรม HYDRUS โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบผลการคำนวณค่าของกระบวนการทางอุทกวิทยากับค่าที่วัดได้จากสนามจำลองที่ถูกสร้างขึ้น ซึ่งค่าของกระบวนการทางอุทกวิทยาประกอบด้วย ปริมาณน้ำท่าผิวดิน ปริมาณการคายระเหย น้ำ ปริมาณน้ำที่สะสมในชั้นดิน และปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้านล่างของชั้นดินกลบขยะ โดยแบบจำลองชั้นดินกลบขยะตามหลักสมมูลของน้ำที่ทำการศึกษา มีจำนวน 5 แบบ ซึ่งมีความแตกต่างหลากหลายทั้งทางความหนา ชนิดและคุณสมบัติ

ของดินที่ใช้ ชนิดของพืชคลุมดิน ตลอดจนสภาพภูมิอากาศของสถานที่ตั้งของสนามจำลองที่มีสภาพภูมิอากาศกึ่งแห้งแล้งและชุ่มชื้น ข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองเป็นข้อมูลที่วัดได้จากสนามจำลองหรือในห้องปฏิบัติการจากตัวอย่างที่เก็บจากสนามจำลอง เพื่อให้มีข้อมูลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงในสนามมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยใช้ข้อมูลแบบรายวันและกำหนดให้คุณสมบัติทางชลศาสตร์ของดินมีค่าเท่ากันในทุกทิศทาง ซึ่งช่วงเวลาที่ใช้การศึกษาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของชั้นดินกลบขยะเหล่านี้อยู่ระหว่าง 3 – 5 ปี

ผลการศึกษายังพบว่า ถึงแม้ว่าจะใช้ข้อมูลที่วัดได้จากสนามจำลองหรือในห้องปฏิบัติการจากตัวอย่างที่เก็บจากสนามจำลอง เพื่อให้มีข้อมูลที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงในสนามมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ค่าทางกระบวนการทางอุทกวิทยารายปีที่คำนวณได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม HYDRUS และใช้ข้อมูลแบบรายวันอาจมีความแตกต่างจากค่าที่วัดได้ในสนามสูงสุดถึง 581.2 มม./ปี โดยปริมาณน้ำท่าที่คำนวณได้อาจมีค่ามากกว่าข้อมูลสนามสูงสุดถึง 558.0 มม./ปี หรืออาจมีค่าน้อยกว่าข้อมูลสนามสูงสุดถึง 52.4 มม./ปี ขณะที่ปริมาณการคายระเหยน้ำที่คำนวณได้อาจมีค่ามากกว่าข้อมูลสนามสูงสุดถึง 234.3 มม./ปี หรืออาจมีค่าน้อยกว่าข้อมูลสนามสูงสุดถึง 581.2 มม./ปี ส่วนปริมาณน้ำที่ไหลออกทางด้านล่างที่คำนวณได้จากแบบจำลองชั้นดินกลบขยะที่ใช้ขอบเขตด้านล่างทั้งแบบ seepage face และแบบ unit gradient มีค่าน้อยกว่าข้อมูลสนามสูงสุดถึง 218.3 มม./ปี

นอกจากนี้ ผลการศึกษายังพบว่า โปรแกรม HYDRUS ไม่สามารถทำนายค่าทางกระบวนการทางอุทกวิทยาที่เกิดจากการไหลของน้ำในชั้นดินตามรอยแยกของดินเนื่องจาก

กระบวนการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและคุณสมบัติของพืชและดิน (Preferential flow) ดังนั้น ผู้ออกแบบควรมีความระมัดระวังในการนำผลการคำนวณค่ากระบวนการทางอุทกวิทยาของแบบจำลองชั้นดินกลบขยะโดยใช้โปรแกรม HYDRUS มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบชั้นดินกลบขยะ

6. บรรณานุกรม

- (1) Morris, C. and Stormont, J. (1997). "Capillary barriers and subtitle D covers: Estimating equivalency". *Journal of Environmental Engineering*, 123(1), 3-10.
- (2) Khire, M., Benson, C., and Bosscher, P. (2000). "Capillary barriers: Design variables and water balance". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(8), 695-708.
- (3) Benson, C. H., and Chen, C. (2003) "Selecting the thickness of monolithic earthen covers for waste containment", *Soil and Rock America* 2003, P. J. Culligan, H. H. Einstein, and A. J. Whittle, eds., Verlag Gluckauf GMBH, Essen, Germany, 1397-1404.
- (4) Fayer, M. J., Rockhold, M. L., and Campbell, M. D. (1992). "Hydrologic modeling of protective barriers: Comparison of field data and simulation results", *Soil Society of America Journal*, 56, 690-700.
- (5) Fayer, M. J., and Gee, G. W. (1997). "Hydrologic model tests for landfill covers using field data", *Landfill Capping in the Semi-Arid West: Problems, Perspectives, and Solutions*, Environmental Science and Research Foundation, Idaho Falls, ID, 53-68, 53-68.
- (6) Khire, M., Benson, C. H., and Bosscher, P. J. (1997). "Water balance modeling of earthen final covers", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(8), 744-754.
- (7) Roesler, A. C., Benson, C. H., and Albright, W. H. (2002). "Field Hydrology and Model

- Predictions for Final Covers in the Alternative Assessment Program", *Geo Engineering Report No. 02-08*, University of Wisconsin-Madison.
- (8) Scanlon, B. R., Christman, M., Reedy, R. C., Porro, I., Šimůnek, J., and Flerchinger, G. N. (2002). "Intercode comparisons for simulating water balance of surficial sediments in semiarid regions", *Water Resources Research*, 38(12), 59-1 - 59-16.
 - (9) Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Keese, K. E. and Dwyer, S. F. (2005). "Evaluation of evapotranspirative covers for waste containment in arid and semiarid regions of the Southwestern USA", *Vadose Zone Journal*, 4, 55-71.
 - (10) Benson, C. H., Bohnhoff, G. L., Apiwantragoon, P., Ogorzalek, A. S., Shackelford, C. D., and Albright, W. H. (2004). "Comparison of model predictions and field data for an ET cover", *Tailings and Mine Waste '04*, Balkema, Leiden, The Netherlands, 137-142.
 - (11) Benson, C. H., Bohnhoff, G., Ogorzalek, A. S., Shackelford, C. D., Apiwantragoon, P., and Albright, W. H. (2005). "Field data and model predictions for an alternative cover", *Waste Containment and Remediation*, A. Alshawabkeh et. al. eds., ASCE, Reston, VA, 1-12.
 - (12) Benson, C. H., Abichou, T., Albright, W. H., Gee, G. W., and Albright, W. H. (2001). "Field evaluation of alternative earthen final covers", *International Journal of Phytoremediation*, 3(1), 105-127.
 - (13) Benson, C. H., Abichou, T., Wang, X., Gee, G. W., and Albright, W. H. (1999). "Test Section Installation Instructions: Alternative Cover Assessment Program", *Environmental Geotechnics Report No. 99-3*, Departments of Civil and Environmental Engineering, Geological Engineering University of Wisconsin-Madison.
 - (14) Albright, W. H., Benson, C. H., Gee, G. W., Roesler, A. C., Abichou, T., Apiwantragoon, P., Lyles, B. F., and Rock, S. A. (2004). "Field water balance of landfill final covers", *Journal of Environmental Quality*, 33(6), 1-17.
 - (15) Šimunek, J., van Genuchten, M. T., Sejna, M. (2007). "The HYDRUS Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media", *User Manual 1.02*, PC Progress, Prague, Czech Republic.
 - (16) Monteith, J.L. and M.H. Unsworth. (1990). "Principles of environmental physics", 2nd ed., 289 pp., *Edward Arnold*, London.
 - (17) van Genuchten, M. T. (1980). "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." *Soil Society of America Journal*, 44, 892-898.
 - (18) Mualem, Y. (1976). "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", *Water Resour. Res.*, 12(3), 513-522.
 - (19) Bohm, W. (1979). "Methods of Studying Root Systems", *Springer-Verlag*, New York, NY.
 - (20) Chadwick, D., Ankeny, M., Greer, L., Mackey, C., and McClain, M. (1999). "Field test of potential RCRA-equivalent covers at the Rocky Mountain Arsenal", *Proc. SWANA 4th Annual Landfill Symp.*, SWANA Publication No. GR-LM-0004, Silver Spring, MD, 12-33.
 - (21) Feddes, R. A., P. J. Kowalik, and H. Zaradny. (1978). "Simulation of Field Water Use and Crop Yield", *John Wiley & Sons*, New York, NY.
 - (22) Doorenbos, J. and Kassam, A. (1979). "Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage", *Paper No. 33*, Food and Agricultural Organization of the United Nations Rome, Italy.
 - (23) Apiwantragoon, P. (2007). "Field Hydrologic Evaluation of Final Covers for Waste Containment", *PhD Dissertation*, University of Wisconsin, Madison, WI.