การจำลองความต้องการใช้น้ำชลประทาน สำหรับระบบการเกษตรที่หลากหลายของมลรัฐฮาวาย

มาโนช โพธาภรณ์ [1] โทมัส ดับบลิว เจียมเบลูกา และ แครอล เอ เฟอร์กูสัน

บทคัดย่อ

บทความนี้จะแสดงการคำนวณฟังก์ชั่นความต้องการใช้น้ำชลประทานของพืชสวน (horticultural crops) ด้วยการใช้พลวัตร์น้ำ (water balance) ผลิตข้อมูลค่าประมาณของการคายระเหย (actual evapotranspiration) ของพืชแต่ละชนิด โดยให้ค่าประมาณของการคายระเหยเป็นตัวกลาง (intermediate input) เชื่อมระหว่างผลผลิต (crop yield) และปริมาณน้ำชลประทาน (applied irrigation) และจากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธ์ (estimated coefficients) ของ empirical functions เพื่อใช้ในการศึกษาคำนวณ ในแบบจำลองที่ใหญ่ขึ้นต่อไป

การคำนวณฟังก์ชั่นความต้องการใช้น้ำชลประทานดังกล่าวเป็นขั้นตอนสำคัญของการศึกษาเพื่อหามาตรการในการแก้ข้อพิพาทการใช้น้ำระหว่างภาคเมืองและชนบทในฮาวายโดยจำลองภาคชนบทด้วยพืช 12 ชนิด ได้แก่กล้วย, มะละกอ, สับปะรด, กระหล่ำปลี (หัว), หอมหัวใหญ่, พริกหยวก (bell peppers), แตงกวา, มะเขือเทศ, ผักกาดหอม (lettuce), แตงโม, กล้วยไม้ (dendrobium orchid, ตัดช่อ), และไม้ประดับ (dracaena, ขายทั้งต้นในกระถาง) ที่ปลูกใน๒ฤดูการผลิตต่อปีเพื่อตลาดภายในรัฐฮาวายและเพื่อส่งออก

สาระสำคัญของบทความนี้อยู่ที่ การสืบค้นและประมวลข้อมูลจากการศึกษาทดลองภาคสนาม (field experiments), การจำลองกระบวนการทางกายภาพของความสัมพันธ์ระหว่างดินน้ำและพืช (soil, water and plant relations) เพื่อนำไปผนวกกับปัจจัยทางเศรษฐกิจและสังคม (ในความหมายแคบคือการวางแผนการผลิตและการใช้น้ำ) บทเรียนที่ได้คาดว่าจะมีประโยชน์ต่อการศึกษาในพื้นที่เขตร้อนชื้นแห่งอื่นที่มีน้ำฝนใช้ร่วมกับน้ำชลประทาน (เช่น ภาคเหนือ ประเทศไทย ฯลฯ)

1. ความนำ

David Seckler อดีตผู้อำนวยการสถาบันเพื่อการจัดการทรัพยากรน้ำระหว่างประเทศ เปรียบน้ำเสมือนหนึ่งเป็นเทพเจ้าฮินดูที่มีหลายหน้าและมีตัวตนดำรงอยู่หลายสถานะ ทั้งของแข็ง ของเหลวและไอน้ำ และมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่งตลอดเวลาโดย (ในกรณีของน้ำ) ผ่านกระบวนการธรรมชาติหลายกระบวนการเช่นการซึมซับลงใต้ดิน (infiltration) และลอยตัวขึ้นไปในอากาศ (evaporation) (Seckler, 1994) ความเข้าใจในเรื่องกระบวนการทางกายภาพอันเกี่ยวเนื่องกับทรัพยากรน้ำจึงมีความสำคัญ เมื่อความต้องการใช้น้ำเพิ่มสูงตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรแต่ปริมาณน้ำที่มีทั้งหมดในโลกยังคงมีเท่าเดิมกับสมัยที่เกิดกระบวนการบิคแบง (Big Bang) ที่อะตอมของไฮโดรเจนและอ๊อกซิเจนจับตัวกันกลายเป็นน้ำ ก่อนการกำเนิดโลก แต่ภายใต้ปริมาณที่มีอยู่อย่างจำกัด (finite supply) น้ำจืดที่ถูกนำมาใช้ยังมีปริมาณน้อยมากเพียง 2.75%ของปริมาณทั้งหมดที่มีอยู่

[1] คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200

โดยที่เหลืออยู่ในทะเลและเค็มเกินกว่าที่จะใช้บริโภคได้สำหรับคนสัตว์หรือพืช (Shiklomanov, 1993 อ้างต่อใน Saleth and Dinar, 2004).

ความเป็นเกาะล้อมรอบด้วยทะเลทำให้ปัญหาน้ำในฮาวายเป็นเรื่องที่อาจอยู่นอกเหนือความคาดหมายของผู้คนโดยทั่วๆไปไม่เฉพาะแต่เพียงคนต่างถิ่นแต่รวมถึงผู้อาศัยในพื้นที่ (local residents) ในขณะที่ในบางพื้นที่เช่นที่เกาะมาวี (Maui) มีผู้ขอมิเตอร์น้ำที่ต้องรอถึง 10 ปีกว่าจะมีน้ำใช้ ทั้งนี้เนื่องจากทรัพยากรน้ำจำนวนมากยังอยู่ความควบคุม (รวมนัยยะความเป็นเจ้าของไม่ใช่ทรัพยากรแต่เป็นระบบท่อส่งน้ำ) ของระบบชลประทานที่ใหญ่ที่สุดในโลกที่เอกชนยังเป็นเจ้าของระบบดังกล่าว (East Maui Irrigation System) ถูกสร้างขึ้นเมื่อเกือบ 100 ปีก่อนเพื่อนำน้ำบริเวณที่มีฝนตกมากของเกาะเพื่อนำมาใช้เพื่อการปลูกอ้อยในบริเวณพื้นที่แห้งแล้งแต่ดินดีกลางเกาะ ซึ่งปัจจุบันการปลูกอ้อยยังคงอยู่เป็น หนึ่งในสองไร่อ้อย (plantations) สุดท้ายที่ยังคงเหลืออยู่ในปัจจุบันในรัฐฮาวายจาก 400 กว่าไร่ในปี 1960s (Wilcox, 1996)

ไร่อ้อยที่ทะยอยปิดตัวตั้งแต่ทศวรรษ 1970s ถึงกลาง 1990s ก่อปัญหาให้กับสาธารณชนด้วยการทิ้งระบบชลประทานที่ต้องการการซ่อมแซมรักษาไว้เป็นมรดก เหตุผลที่สำคัญส่วนหนึ่งเนื่องมาจากสิทธิการใช้น้ำที่เคยเป็นของเอกชน (เมื่อสมัยที่เอกชนลงทุนก่อสร้างระบบเมื่อเกือบ 100 ปีก่อน) ได้กลายมาอยู่ในการควบคุมกำกับดูแล (และออกใบอนุญาติใช้น้ำ) ของภาครัฐตามเจตนารมย์ของกฎหมายน้ำ (State Water Code) ในฮาวาย ทีมีมาตั้งแต่กลางทศวรรษที่1980s แต่เพิ่งถูกทดสอบเมื่อไร่อ้อยกลางเกาะโออาฮู่ (Oahu) ซึ่งเป็นที่ตั้งของฮอนโนลูลู (Honolulu) ซึ่งเป็นเมืองหลวงของรัฐปิดตัวลงเมื่อกลางทศวรรษที่ 1990s แล้วมีก่อให้เกิดข้อพิพาทตามมาในเรื่องการใช้น้ำขึ้นระหว่างกลุ่มที่ต้องการใช้น้ำ (ที่ไร่อ้อยเคยใช้) ด้วยวัตถุประสงค์ต่างๆกัน หน่วยงานของรัฐที่กำกับดูแลซึ่งได้แก่ State of Hawai'i's Commission for Water Resource Management (COWRM) ได้ออกคำตัดสินจัดสรรน้ำไปแล้วเมื่อปี 1997 แต่ยังไม่เป็นที่ลงเอยเพราะมีการอุทธรณ์ต่อศาลสูง (Supreme Court State of Hawai'i) ซึ่งศาลได้มีคำตัดสินและส่งเรื่องกลับให้ COWRM พิจารณาถึง 2 ครั้งโดยที่ COWRM ได้ออกคำตัดสินครั้งที่ 3 เมื่อปลายเดือนมิถุนายน 2005 ที่ผ่านมา

กรณีนี้ (ระบบชลประทานไวโฮเล่, Waiahole Irrigation System) กำลังเป็นกรณีทดสอบการจัดการน้ำตามระบบกฎหมายใหม่ (ซึ่งคำตัดสินชี้ขาดจะมีนัยยะต่อการจัดการทรัพยากรน้ำที่เกาะมาวี) ว่าระบบปัจจุบัน (ที่เริ่มเมื่อกลางปี 1980s) มีประสิทธิภาพและเป็นธรรมเพียงใด ในกรณีระบบชลประทานไวโฮเล่รัฐเข้ามาซื้อกิจการต่อจากเจ้าของไร่อ้อยเมื่อปี 1997 (หลังคำตัดสินของ COWRM ครั้งแรก) และเข้าดำเนินการบริหารจัดการด้วยเหตุผลเพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากทรัพย์สิน (อุโมงค์ส่งน้ำ ท่อปิดและลำรางชลประทาน) ที่มีอยู่ และเพื่อสนับสนุนเกษตกรผู้ปลูกพืชสวนบนพื้นที่เดิมเคยใช้ปลูกอ้อย (รวมทั้งหมดประมาณ 6,000 เอเคอร์ ซึ่งเป็นที่เช่าสัญญาเช่าระยะยาว)

ระบบการให้รัฐมีบทบาทควบคุมกำกับการใช้น้ำและหรือจัดการอย่างที่ฮาวายเป็นระบบที่รัฐบาลไทยมีแนวโน้มจะนำมาใช้ที่แล้วมาการกำกับควบคุมเอื้ออำนวยต่อประโยชน์ในเชิงสาธารณะเช่นการใช้น้ำเพื่ออนุรักษ์ระบบนิเวศน์วิทยา และด้วยเหตุผลด้านวัฒนธรรม แต่ก็มีความสนใจที่จะประกันประสิทธิภาพของระบบโดยเฉพาะประสิทธิภาพที่อาจเกิดขึ้นได้จากการยอมให้มีการซื้อขายใบอนุญาติใช้น้ำได้การเปลี่ยนแปลงกฎหมายในลักษณะดังกล่าวต้องอาศัยความแม่นยำระดับสูงเพราะหากเกิดความเสียหายขึ้นจะมีผลต่อผู้ผลักดันนโยบาย และผลต่อสาธารณชนยากที่จะแก้ไขได้ วิธีการศึกษาผลของนโยบายด้วยวิธีทางคอมพิวเตอร์ (computer policy modeling and simulation experiment) จึงได้ถูกนำมาใช้

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะแสดงวิธีการคำนวณฟังก์ชั่นความต้องการใช้น้ำชลประทานของพืชสวน (horticultural crops) ต่อการพยากรณ์ผลผลิต ทั้งนี้โดยที่กระบวนการทางกายภาพที่ถูกแสดง (embedded) ในฟังก์ชั่นความต้องการใช้น้ำของพืชจะถูกผนวกเข้ากับการตัดสินใจของเกษตรกรในการวางแผนการผลิตปลูกพืชแต่ละชนิดในแต่ละฤดูโดยเลือกที่จะไม่ผลิตหากไม่คุ้มทุน (breakeven point) ผลที่ได้จะเป็นความต้องการน้ำของเกษตรกรในความหมายที่ใกล้เคียงมากขึ้นกับความต้องการในความหมายทางเศรษฐศาสตร์มากขึ้น

2. ความต้องการใช้น้ำชลประทานของพืช

เมื่อทรัพยากรน้ำมีความขาดแคลนและทรัพยากรน้ำจำนวนมากยังอยู่ภาคเกษตรจึงมักนำไปสู่ข้อเสนอที่จะให้มีการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำเพื่อจะได้มีน้ำเหลือเพื่อใช้ในภาคเศรษฐกิจอื่น Seckler แย้งว่าการประหยัดน้ำอาจไม่มีมากอย่างที่คิดหากคำนึงถึงว่าน้ำส่วนเกินซึ่งไหลลงใต้ดิน (infiltration) จะถูกนำขึ้นมาใช้ใหม่ในรูปของ return flow บทความในหนังสือพิมพ์ The Independent ของอังกฤษ: Pearce (2004) เสนอว่าการไม่คำนึงถึง return flow และผลกระทบต่อผู้ใช้น้ำบาดาลเป็นมายาคติ (myth) ที่เกิดจาก classical irrigation principle ที่จำเป็นต้องแก้ไขพร้อมยกกรณีปัญหาชายแดนสหรัฐอเมริกาและเม็กซิโกเป็นอันเนื่องมาจากการหายไปของ return flow จากทำ canal liningในคาลิฟอร์เนียเป็น ตัวอย่าง

พลวัตรน้ำ (water balance) เป็นทางออกเพราะ พลวัตร์น้ำ (water balance) ติดตามการได้มา (inputs) และใช้ไป (outputs) ของปริมาณความชื้นที่กักเก็บไว้ในผิวดิน (soil moisture) โดยการกักเก็บดังกล่าวเป็นไปโดยฝืนแรงโน้มถ่วงของโลก โดยอาศัยหลักการไม่สูญหายไปของมวลสะสาร โดยที่ไม่มองข้ามผลของการประหยัดน้ำต่อ return flow (ซึ่งจะปรากฏเป็น recharge) อย่างเช่นวิธีการ irrigation scheduling ในแต่ละช่วงเวลาสถานะของความชื้นในดินในพื้นที่หนึ่งๆจะเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์ตามหลักพลวัตรน้ำดังต่อไปนี้

$$P_t + IRR_t = ET_t + RO_t + RCHG_t + \Delta SMC_t \qquad [1]$$

โดยที่ P_t =น้ำฝน, IRR_t =น้ำชลประทาน, ET_t =การคายระเหยของพืชและดิน, RO_t =การไหลบ่า, $RCHG_t$ = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านชั้นดินไปสมทบแหล่งน้ำใต้ดิน, ΔSMC_t=การเปลี่ยนแปลงความชื้นในดินที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงภายในช่วงเวลาที่กำหนด t =1 ช่วงเวลาในที่นี้คือ 1 วัน, ตัวแปรทุกตัวจะวัดในรอบ1 วันหรือ 24 ชั่วโมง

เนื่องจากตัวแปรในแต่ละตัวในสมการข้างต้นมีความยากง่ายต่อการจัดเก็บและคำนวณไม่เท่ากันพลวัตร์น้ำจึงมีประโยชน์ในการใช้คำนวนตัวแปรที่ยากที่จะวัดได้โดยตรงเช่นปริมาณน้ำที่ไหลผ่านชั้นดินไปสมทบแหล่งน้ำใต้ดิน ($RCHG_t$ หรือ recharge to an aquifer) และการคายระเหยของพืชและดิน (evapotranspiration) โดยการคายระเหยของพืชและดินเป็นการคำนวณจากพลวัตร์น้ำเป็นการคายระเหยที่เป็นจริง (actual evapotranspiration) ซึ่งกรณีดังกล่าวครอบคลุมทั้งในกรณีที่พืชได้รับน้ำพอเพียงกับความต้องการ (ซึ่งหมายถึง evaporative demand หรือ plant's water requirement) และ ในกรณีที่พืชได้รับน้ำน้อยกว่าระดับที่ต้องการ ซึ่งในที่นี้เพื่อครอบคลุมความเป็นไปได้ในการลดการให้น้ำ (deficit irrigation) ในกรณีที่ปริมาณน้ำมีไม่มากพอ (water as a limiting factor) โดยที่

$$AE = k\,(PE) \qquad [2]$$

โดยที่ AE = actual evapotranspiration, PE= potential evapotranspiration และ k = soil moisture depletion coefficient. จากการทดลองพบว่าเมื่อพืชได้รับน้ำน้อยกว่า evaporative demand ในชั้นต้นการคายระเหยยังคงดำเนินไปอย่างต่อเนื่องใกล้กับระดับการคายระเหยเมื่อมีน้ำสมบูรณ์ (well watered condition) แต่หลังจากนั้นปริมาณการคายระเหยจะขึ้นกับความสามารถของรากพืชที่จะดูด (extract) ความชื้นจากดิน เมื่อภาวะขาดน้ำดำเนินต่อไปจะถึงจุดหนึ่งที่รากจะไม่สามารถดูดน้ำได้อีกต่อไป

พลวัตร์น้ำคำนวณค่าการคายระเหยของพืชและดินที่แท้จริง (actual evapotranspiration) เป็นตัวแปรที่วัดได้ยากโดยเฉพาะในระดับแปลงเพาะปลูก (field level) แต่ actual evapotranspiration สามารถคำนวณขึ้นได้ด้วยข้อมูลทางภูมิอากาศ (climatology) ซึ่งข้อมูลคายระเหยของพืชและดินที่ได้มาจาก water balance จะสามารถนำไปพยากรณ์ผลผลิตของพืช (crop yield) โดยอาศัย yield response function ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ได้รับการยอมรับกันมานาน (scientifically well established) ระหว่างการคายระเหย และผลผลิตของพืช (crop yield)

ทั้งนี้เนื่องจากการคายระเหยของพืช (transpiration) เกิดขึ้นเมื่อปากใบ (stomata) ของพืชถูกเปิดขึ้นเพื่อรับ carbon dioxide ตามกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) ซึ่งมีผลทำให้พืชเจริญเติบโต จนถือกันว่าปริมาณน้ำที่ถูกใช้ไปตามกระบวนการคายระเหยของพืช (และดิน) เป็น การใช้น้ำของพืช (consumptive use) และมีนัยยะในเรื่องของการจัดสรรน้ำ (หรือที่เรียกว่า crop's water duty) แต่ทั้งนี้การคายระเหยของพืชและดิน (evapotranspiration) ที่คำนวณได้จากพลวัตร์น้ำเป็น กระบวนการทางกายภาพที่น้ำซึ่งอยู่ในสภาพของเหลวกลับคืนชั้นบรรยากาศโลก (atmosphere) ผ่านทางปากใบและโดยตรงผ่าน คายระเหยของดิน (evaporation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่พลังงานความร้อนถูกใช้ไปเพื่อแปลงน้ำบนพื้นดินให้กลายเป็นไอน้ำและลอยขึ้นไปในอากาศบริเวณที่แห้งกว่า การคายระเหยของพืชและการคายระเหยของดินมักไม่สามารถคำนวณแยกออกจากกันได้และกระบวนการทั้งสองมีลักษณะเหมือนกันยกเว้นที่การคายระเหยของพืชที่ถูกควบคุมกำกับโดยใบและรากในกรณีที่น้ำมีไม่เพียงพอที่จะการสนองตอบความต้องการระเหย (evaporative demand) หรืออีกนัยหนึ่งคือภาวะที่พืชขาดน้ำนั่นเอง

ส่วนตัวแบบในการพยากรณ์ผลิตจากการคายระเหยของน้ำมีที่มาจากการทดลองของBriggs and Shantz, 1914 (อ้างใน Potapohn, 2005) ที่และ de wit , 1958 อ้างใน (Potapohn, 2005) โดยที่คำนึงถึงประสิทธิภาพการใช้น้ำของพืชแต่ละชนิดจากสมการ

$$D = m\,W, \qquad [3]$$

โดยที่ D= มวลของพืช (ที่อบให้แห้ง) ณจุดสิ้นสุดฤดูกาล, W=ปริมาณน้ำตลอดทั้งฤดูและm=ประสิทธิภาพการใช้น้ำของพืช, ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถ normalized (ให้ลดความยุ่งยากในเรื่องหน่วยวัด, unit of measurement)ได้เป็น

$$D = m_2\left(\frac{D_{max}}{W_{max}}\right)W \qquad [4]$$

โดยที่ W_{max}= evaporative demand และ D_{max}= ศักยภาพในการผลิตของพืช (จากบทความของHanks, ในหนังสือของ Taylor et al., 1983) ต่อมามีการปรับปรุงสมการใหม่โดย Stewart et al., (1977) อ้างใน (Potapohn, 2005)

โดยเขียนในเชิงเปรียบเทียบเป็น

$$1-\frac{Y_a}{Y_m}=K_y\left(1-\frac{ET_a}{ET_m}\right) \qquad [5]$$

โดยที่Ya= actual yield, Ym= maximum yield, ETa= actual ETm= ET for maximum yield

สมการดังกล่าวข้างต้นนำมาเขียนใหม่ในรูปสมการเส้นตรงได้เป็น

$Y_a = a + bET_a$ โดยที่ $a=Y_m(1-K_y)$ and $b=\frac{K_y Y_m}{ET_m}$ [5′]

ที่ผ่านมาการใช้ตัวแบบในลักษณะสมการที่ [5] มีการคงจำกัดเฉพาะในหมู่พืชไร่ ปัญหาหนึ่งอาจเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของสมการเมื่ออัตราการลดการให้น้ำของพืชเริ่มรุนแรงขึ้นวิธีแก้ที่มีการเสนอคือจำกัดไม่ให้ไม่ได้ต่ำกว่า 50% จาก evaporative demand

3. ข้อมูล ค่าพารามิเตอร์ และฟังก์ชั่นความต้องการใช้น้ำของพืช

ระบบการเกษตรที่หลากหลายเกิดที่ใช้พื้นที่เพาะปลูกอ้อยเดิมและน้ำจากระบบชลประทานไวโฮเล่ ประกอบไปด้วยพืชตัวแทน 12 ชนิดได้แก่กล้วย, มะละกอ, สับปะรด, กระหล่ำปลี (หัว), หอมหัวใหญ่, พริกหยวก (bell peppers), แตงกวา, มะเขือเทศ, ผักกาดหอม (lettuce), แตงโม, กล้วยไม้ (dendrobium orchid, ตัดช่อ), และไม้ประดับ (dracaena, ขายทั้งต้นในกระถาง) ที่ปลูกเพื่อตลาดภายในรัฐและเพื่อส่งออกใน 2 ฤดูการผลิตต่อปีโดยที่ฤดูฝนเริ่มจากตุลาคมถึงมีนาคมและฤดูแล้งตั้งแต่เมษายนถึงกันยายน

ในขั้นของการสำรวจข้อมูลปรากฏว่ากล้วยไม้เป็นซึ่งพืชมูลค่าสูงเป็น epiphyte มีความสามารถดูดความชื้นได้ตรงจากอากาศทั้งยังมักปลูกในกระถางในโรงเรือน (shade house) ดังนั้นจึงจัดให้กล้วยไม้ได้รับน้ำที่ evaporative demand ที่ 1,175 แกลลอนต่อเอเคอร์ต่อวันตามผลการศึกษาของ Leonhardt and Sewake (1999) ซึ่งอ้างใน Potapohn (2005, หน้า 94) นอกจากนั้นพบว่าในกระบวนการผลิตช่วงหนึ่งก่อนส่งขาย ไม้ประดับจะถูกเลี้ยงในกระถางด้วย growing media ที่เอื้อต่อการไหลของน้ำ (porous) มากกว่าดินและเลี้ยงในโรงเรือนดังนั้นไม้ประดับดังกล่าวจึงถูกกำหนดให้รับน้ำที่ evaporative demand ที่ 5,000 แกลลอนต่อเอเคอร์ตามการศึกษาทางด้านอุตสาหกรรมของ Rauch et al., 1982 อ้างใน Potapohn (2005, หน้า 94) พืชอีกสองชนิดให้ปลูกฤดูเดียวได้แก่ แตงโมเฉพาะหน้าร้อนเพื่อเลี่ยงความเสียหายจากฝนและผักกาดหอม (lettuce)หน้าฝนเพื่อเลี่ยงความเสียหายจากใบไหม้ สำหรับพืชที่เหลือ จะคำนวณการคายระเหยทั้ง 2 ฤดูส่วนแตงโมและผักกาดหอมจะคำนวณเพียง 1 ฤดูโดยข้อมูลที่ใช้จะเป็นดังนี้:

ปริมาณน้ำฝนเป็นข้อมูล-แหล่งข้อมูลที่เก็บง่ายที่สุด เนื่องจากฮาวายมีอาศแบบ microclimate ซึ่งต่างกันมากในแต่ละพื้นที่ข้อมูลที่ใช้มาจากสถานีตรวจอากาศของ plantation ซึ่งภายหลังอยู่ในกรดูแลของNOAA และเก็บรวบรวมไว้ที่ State Meteorological Office เป็น Hourly Precipitation Report; มีทั้งหมด 12 ปีระหว่าง 1998-2000 ปีแต่ปรากฏว่ามี 5ปีที่ข้อมูลหายกว่า 50เปอร์เซ็นต์จึงไม่ได้ใช้ ที่เหลือข้อมูล 7 ปีมี missing observation ใช้ซ่อมด้วยวิธีการทางสถิติ แล้ว validate กับ atlas

ปริมาณน้ำชลประทานที่ใช้ กำหนดให้เป็นอัตราที่แนะนำโดยเจ้าหน้าที่ส่งเสริม แต่เพื่อวัด actual evapotranspiration จึงกำหนดให้พืชได้รับน้ำทุก 10% ของอัตราส่งเสริม (ซึ่งได้แก่ 10, 20, 30 … 80, 90%) โดย ให้งดน้ำเมื่อปริมาณฝนในวันก่อนหน้าเป็น 25% ของค่ารายวันตามอัตราที่ส่งเสริมแนะนำ และเทคโนโลยี่เป็นระบบน้ำหยด (subsurface irrigation)

การไหลบ่า พยากรณ์จากน้ำฝนด้วยวิธีการ curve number ของ US Department of Agriculture, Soil Conservation Service หรือ Natural Resource Conservation Service ในปัจจุบัน โดยการนำมาใช้ในฮาวายได้รับการทดสอบ โดย Cooley and Lane (1980 1982) อ้างใน (Potapohn, 2005)

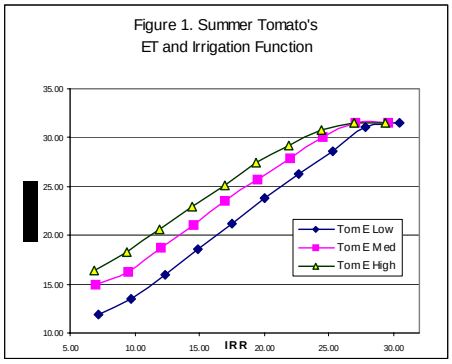
การคายระเหย (actual evapotranspiration) และ ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านชั้นดินไปสมทบแหล่งน้ำใต้ดินจะคำนวณ recursively จากระบบสมการที่แสดงในภาคผนวกโดยใช้ฐานซึ่งเป็น crop evaporative demand ซึ่งคำนวณจาก reference evaporation ซึ่งคือการระเหยของผืนน้ำ Pan evaporation ทั้งนี้เนื่องจากมีการจัดเก็บข้อมูลดังกล่าวมาตั้งแต่ปี 1894 โดยที่ตัวแบบจะให้อ้อยเป็น reference crop การคายระเหยของพืชใน well watered condition มีค่าเทียบกับ pan และ อ้อยได้ดังนี้

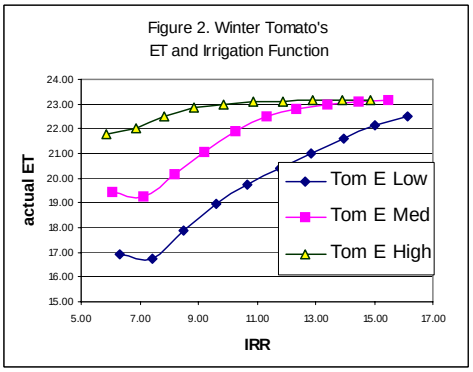
ตารางที่ 1 อัตราการคายระเหยสูงสุดของพืช

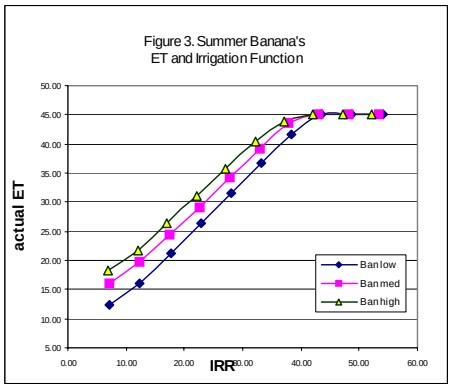
พืช	USDA HI เทียบกับ Pan evap	Adj USDA HI เทียบกับ อ้อย
แตงกวา	0.60	0.70
พริกหยวก	0.60	0.70
มะละกอ	0.60	0.70
แตงโม	0.55	0.64
กล้วย	0.85	0.99
กระหล่ำดอก	0.60	0.70
หอมหัวใหญ่	0.50	0.58
มะเขือเทศ	0.60	0.70
ผักกาดหอม	0.55	0.64
ส้มปะรด	0.30	0.35

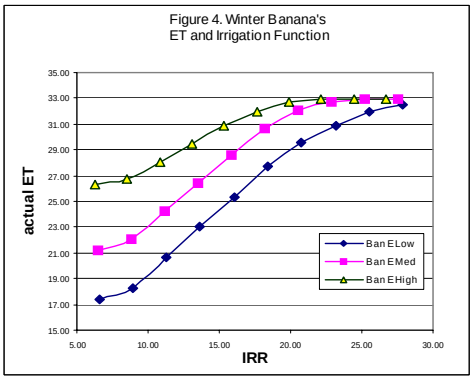
ที่มา: เอกสารการอบรมให้กับเกษตรกร US Deparrtment of Agriculture, Natural Resource Conservation Service, Hawai'i Office

ค่าการคายระเหยที่คำนวณได้เมื่อนำมาพล็อตเป็นกร้าฟโดยเลือกระดับน้ำฝน 3 ระดับ (น้อย, ปานกลาง และมาก) จะเห็น pattern กล่าวคือ (1) เมื่อเข้าใกล้ระดับสูงสุดความลาดชันของฟังก์ชั่นจะลดลงหมายถึง productivity ของ irrigation application จะน้อยลงกว่าช่วงก่อนหน้า rainfall ก่อนนั้น และ (2) ฝนมีบทบาทเป็นตัว shift curve ขึ้นลงโดยบทบาทของฝนจะน้อยลงเมื่อเข้าใกล้ asymptote ดังจะเห็นจาก figure 1-4 ข้างล่าง









การสังเกตุดังกล่าวข้างต้นนำไปสู่การสร้างแบบจำลองเพื่อแสดง Hydrological interdependenceระหว่างฝนและการคายระเหยซึ่งตัวแบบที่ดีที่สุด (best fit) ได้แก่

$$E_t = \alpha + \beta D + \gamma 1R + \gamma 2R2 + \delta IRR + \rho\,(R*IRR) + \rho(D*IRR) + \varepsilon_t \qquad [6]$$

โดยที่ E_t = การคายระเหย, D= ตัวแปรดัมมี่ (0, 1) แสดงความสำคัญเมื่อฟังก์ชั่นเข้าใกล้ 1 นิ้วจากasymptote, R=ปริมาณน้ำฝน, IRR=ปริมาณน้ำชลประทานที่ใช้และ ε_t=ค่า error

ผลการคำนวณที่ได้แสดงเป็นตัวอย่าง (เฉพาะฤดูร้อน) ในตารางที่ 2 ข้างล่างนี้

ตารางที่ 2 การตอบสนองของการคายระเหยของพืชในฤดูร้อน (หน่วย: นิ้ว/ ฤดู)

	N	Emax	X	จุดตัด	ดัมมี่	ฝน	ฝน^2	ชปท	ฝน x ชปท	ดัมมี่ x ชปท	Adj R^2
แตงกวา	57	31.58	0.5	0.16	11.94	1.26	−0.0358	1.01	−0.0108	−0.4834	0.97
				(0.15)	(2.78)	(8.44)	(−6.68)	(22.60)	(−2.03)	(−3.04)	
พริกหยวก	55	31.58	1.0	−0.65	10.55	1.38	−0.0378	1.04	−0.0118	−0.4409	0.98
				(−0.64)	(2.97)	(9.73)	(−7.74)	(22.11)	(−2.47)	(−3.27)	
มะละกอ	52	31.58	1.0	−1.78	5.66	1.60	−0.0405	1.04	−0.0117	−0.2551	0.99
				(−3.01)	(3.79)	(18.04)	(−15.34)	(36.28)	(−3.34)	(−4.37)	
แตงโม	47	29.04	0.5	−0.22	7.09	1.38	−0.0417	0.99	−0.0070	−0.3392	0.98
				(−0.22)	(2.36)	(9.72)	(−8.59)	(20.57)	(−1.27)	(−2.36)	
กล้วย	49	45.01	2.0	−0.00	21.17	1.20	−0.0307	1.03	−0.0092	−0.5697	0.99
				(−0.00)	(4.57)	(6.94)	(−4.63)	(29.94)	(−2.79)	(−4.99)	
กระหล่ำดอก	63	31.58	1.5	1.99	13.92	0.81	−0.0209	0.99	−0.0109	−0.5364	0.98
				(2.19)	(3.70)	(6.44)	(−4.49)	(25.03)	(−3.08)	(−3.98)	
หอมหัวใหญ่	62	26.50	1.0	2.85	15.40	0.69	−0.0190	0.93	−0.0100	−0.6850	0.98
				(3.65)	(5.36)	(6.01)	(−4.31)	(24.86)	(−3.03)	(−5.99)	
มะเขือเทศ	68	31.58	1.0	0.31	15.90	1.15	−0.029	1.04	−0.0150	−0.6250	0.97
				(0.28)	(3.44)	(7.31)	(−5.30)	(21.07)	(−3.16)	(−3.70)	

ที่มา Potapohn 2005 หน้า 92

หมายเหตุ: N=จำนวน observations นอกเหนือค่าบริเวณค่าคายระเหยสูงสุด, Emax=ค่าคายระเหยสูงสุด, X=ค่าระยะห่างจากEmaxที่มีการเคลื่อนขึ้นลงของ regression, 'ดัมมี่'= ตัวแปรดัมมี่ (0, 1) แสดงความสำคัญเมื่อฟังก์ชั่นเข้าใกล้ 1 นิ้วจากasymptote; ฝน=ปริมาณน้ำฝน และ ชปท=ปริมาณน้ำชลประทานที่ใช้

ค่า actual evapotranspirationที่ได้จะเอาไปใช้กับสมการ [5′]ในเพื่อพยากรณ์ผลผลิตโดยใช้ร่วมกับค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 3 หน้าถัดไป

ตารางที่ 3 อัตราการลดลงของผลผลิต (yield reduction ratio)

พืช	อัตราการลดลงของผลผลิตต่อการคายระเหย	ที่มา
แตงกวา	0.70	ข้อมูลจากการทดลอง
พริกหยวก	1.10	FAO: Doorenbos & Kasem (1979)
มะละกอ	0.40	ข้อมูลจากการทดลอง
แตงโม	1.10	FAO: Doorenbos & Kasem (1979)
กล้วย	1.20—1.35	FAO: Doorenbos & Kasem (1979)
กระหล่ำดอก	0.95	FAO: Doorenbos & Kasem (1979)
หอมหัวใหญ่	1.10	FAO: Doorenbos & Kasem (1979)
มะเขือเทศ	1.05	FAO: Doorenbos & Kasem (1979)
ผักกาดหอม	1.14	ข้อมูลจากการทดลอง
สับปะรด	0.37	ข้อมูลจากการทดลอง

ผลที่ได้สามารถแสดงได้ดังนี้

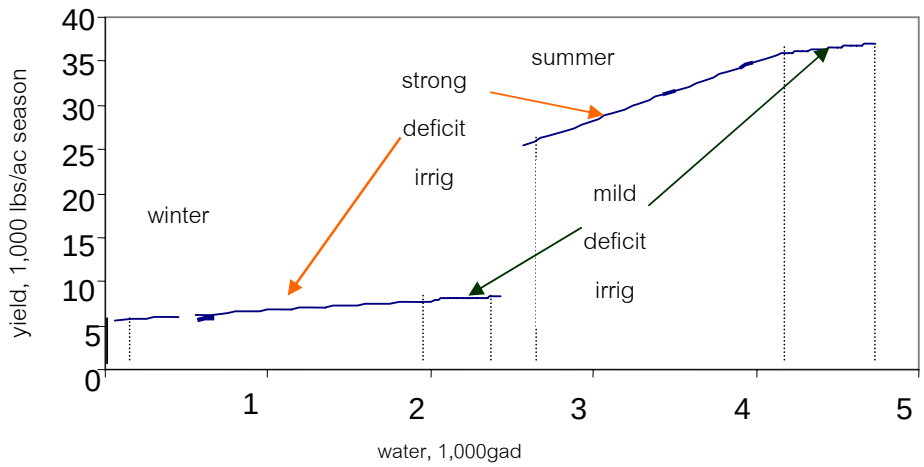


Figure 5 Tomatoes' Yield Response Function

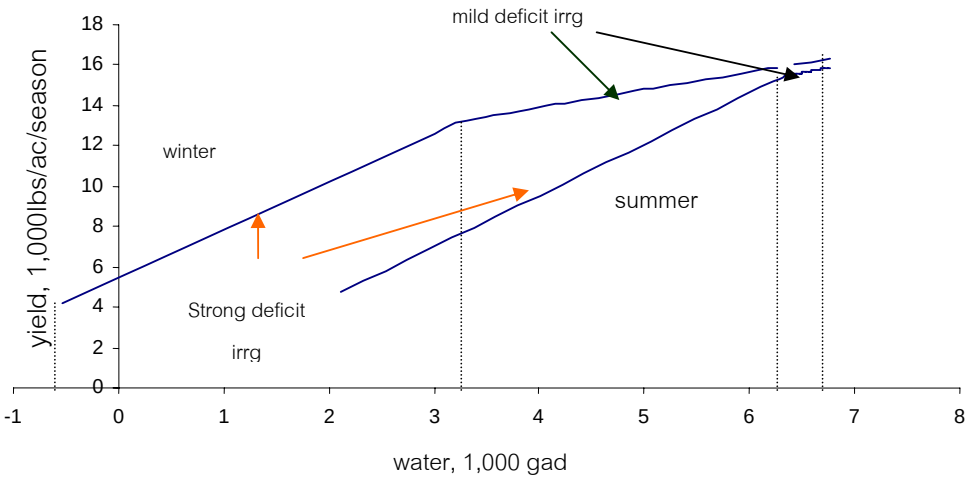


Figure 6 Banana's Yield Water Function

4. ข้อสรุป

ค่าฟังก์ชั่นสามารถนำไปใช้ในแบบจำลองที่ใหญ่ขึ้นโดยให้ผลได้ดีมีเหตุผลพอควรมีแต่เพียงราคา (Optimal price for irrigation) ที่เป็น corner solution ซึ่งคาดว่าเกิดจากการหลีกเลี่ยง discontinuity ในฟังก์ชั่นที่แสดงในกร้าพสองรูปสุดท้าย เนื่องจากผลดังกล่าวมีนัยยะทางด้านนโยบายจึงสมควรที่จะมีการพิจารณาทดสอบต่อไปทั้งนี้เนื่องจากความผิดพลาดในการคำนวณ hydrological interdependence อาจมีไม่มากเนื่องจากการชลประทานระบบน้ำหยดที่ใช้และหลักการงดการให้น้ำหากมีฝนตกอย่างน้อย 25% ของ recommended level ตามที่กำหนด

5. เอกสารอ้างอิง

Briggs, L. J. and H. L. Shantz. “Relative Water Requirement of Plants.” *Journal of Agricultural Research*. 3 (1914): 1-63.

Cooley, K. R. and L. J. Lane. “Optimized Runoff Curve Numbers for Sugarcane and Pineapple Fields in Hawai‘i.” *Journal of Soil and Water Conservation*, 35(1980): 137-141.

Cooley, K. R. and L. J. Lane. “Modified Curve Numbers for Sugarcane and Pineapple Fields in Hawai‘i.” *Journal of Soil and Water Conservation*, 37(1982): 295-298.

De Wit, C. T. *Transpiration and Crop Yields*. Instituut voor Biologisch en Scheikundig Onderzoek van Landbouwgewassen, Mededeling, No 59. Wageningen, the Netherlands, 1958.

Leonhardt, K. and K. Sewake. *Growing Dendrobium Orchids in Hawai‘i,* College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawai‘i at Ma noa, Honolulu, Hawai'i, 1999.

Pearce, F. “The Great Water Myth,” *The Independent Newspaper (UK)*, Science & Technology Section, Jan 28, 2004.

Potapohn, M, *Simulating the Economic Impacts of Water Reallocation on an Irrigation System in Hawai'i,* Unpublished Dissertation submitted to Graduate Division, University of Hawai'i at Manoa , 2005.

Saleth, R. M. and A. Dinar *The Institutional Economics of Water : a Cross-country Analysis of Institutions and Performance*, Cheltenham, UK : E. Elgar. 2004.

Seckler, D. "Designing Water Resource Strategies for the 21st Century." *Environment and Agriculture: Rethinking Development Issues for the 21st Century*, Morrilton, AR : Winrock International Institute for Agricultural Development, 1994.

Stewart, J. I., R. H. Cuenca, W. O. Pruitt, R. M. Hagan and J. Tosso. *Determination and Utilization of Water Production Functions for Principal California Crops*. W-67 California Contribution project, University of California at Davis. 1977.

Wilcox, Carol, *Sugar Water: Hawai'i's Plantation Ditches*, Honolulu : University of Hawai`i Press, 1996.