บทที่ 3

การศึกษาที่ผ่านมา

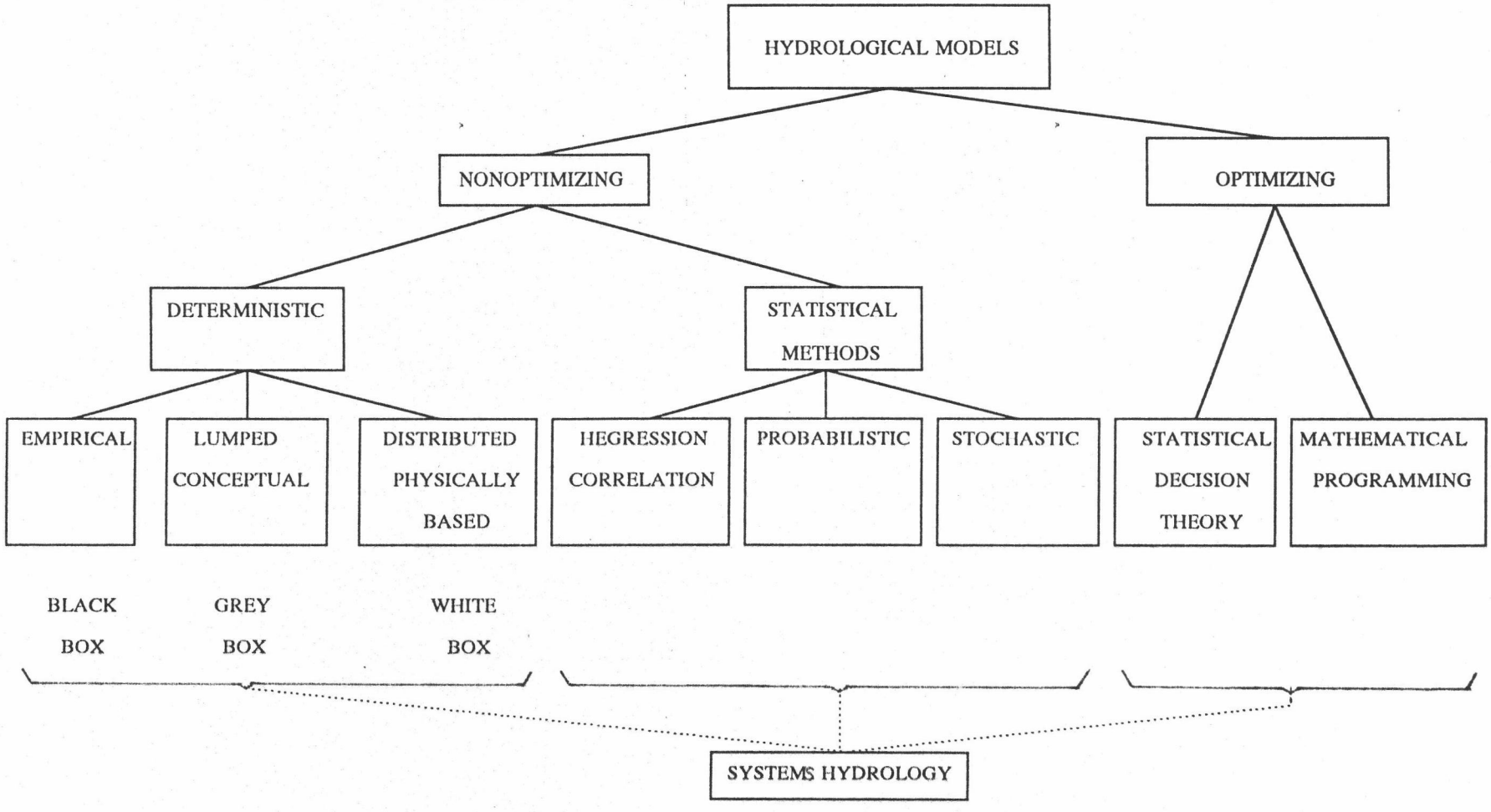
การพัฒนาและทดสอบแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่ารายเดือน WRECU-I จำเป็นต้องศึกษาถึงแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่ารายเดือน ที่มีใช้กันอยู่ทั่วไปทั้งในและต่างประเทศ เพื่อศึกษาถึงข้อเด่นข้อด้อยของแบบจำลองแต่ละแบบ แล้วนำข้อมูลนี้มาพัฒนาแบบจำลองให้เหมาะสมต่อไป แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่ารายเดือนที่นิยมใช้กันทั่วไปมีดังนี้

3.1 แบบจำลองทางอุทกวิทยา (Hydrological Models)

แบบจำลองทางอุทกวิทยา สามารถจำแนกได้หลายแบบ DHI(1986) ได้กล่าวอ้างถึง การจำแนกประเภทของแบบจำลองทางอุทกวิทยา (Hydrological Models) ว่าประมาณ ค.ศ.1973 และ 1975 Woolhiser และ Fleming ตามลำดับ ได้จำแนกประเภทของแบบจำลองทางอุทกวิทยาไว้ดังรูป 3-1 การจำแนกประเภทแบบนี้เป็นการจำแนกโดยแบ่งตามวิธีคำนวณ

จากรูป 3-1 คำว่า Optimization มีความหมายเกี่ยวกับการตัดสินใจ (Decision making) มากกว่าที่จะหมายถึง การวิเคราะห์ตัวแปรแบบจำลอง (Optimization of Model Parameters) ส่วนวิธี Nonoptimizing นั้นสัมพันธ์กับการกำหนดขนาด/จำนวนของข้อมูลทางอุทกวิทยา และเป็นวิธีการที่ถูกใช้สำหรับกำหนดวิธีการศึกษาขบวนการทางกายภาพ ในวิธี Optimization จะพิจารณาถึงการหาวิธีการที่ดีที่สุดในการเลือกของขบวนการวางแผน ทั้ง 2 วิธี เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Methods)

สำหรับ Deterministic Models ยังจำแนกได้เป็น Empirical Lumped Conceptual และ Distributed Physically Based การพัฒนาแบบจำลองทางอุทกวิทยาที่ผ่านมา โดยเฉพาะแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าที่ใช้กับลุ่มน้ำ (Rainfall - Runoff Models (watershed models)) ประมาณ 10 ปีย้อนหลัง ได้มีการการพัฒนาแบบจำลองประเภทนี้ในลักษณะของแบบจำลอง black box ถึง grey box (lumped, conceptual) และจากนี้ต่อไปในอนาคต คาดว่าจะมีการพัฒนาแบบจำลองประเภท physically based distributed (white box) เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความรู้ทางด้านอุทกวิทยาได้เริ่มแพร่หลายขึ้น การ



รูป 3-1 การจำแนกประเภทของแบบจำลองทางอุทกวิทยา (DHI, 1986)

เพิ่มขีดความสามารถในการเก็บข้อมูลด้านกายภาพและการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทางด้านเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์

3.2 แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า จำแนกตามช่วงเวลาของสถานการณ์ที่พิจารณาได้เป็น 2 แบบคือ

- แบบจำลองประเภท Event-Based Streamflow Simulation (EBSS)
- แบบจำลองประเภท Continuous Streamflow Simulation (CSS)

Singh (1989) ได้กล่าวถึงแบบจำลองทั้ง 2 ประเภทนี้ โดยจัดให้อยู่ในกลุ่มของแบบจำลองลุ่มน้ำ (Watershed Modeling) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 Event-Based Streamflow Simulation Model (EBSS)

แบบจำลองประเภท EBSS พยายามจำลองสภาพกราฟน้ำท่าโดยตรง (Direct Runoff Hydrograph, DRH) หรือจำลองพฤติกรรมช่วงการไหลสูงสุด (Peak flow Characteristics) ใช้สำหรับจำลองน้ำฝน-น้ำท่าของพายุฝน หรือน้ำหลาก เพื่อใช้ประโยชน์ในการออกแบบ โครงสร้างระบายน้ำต่าง ๆ เช่น ทางระบายน้ำ สะพาน ท่อลอดถนนระบายน้ำ ระบบระบายน้ำของทางหลวงและในเมือง เป็นต้น ตัวอย่างของแบบจำลองประเภทนี้ปรากฏในตาราง 3-1 ซึ่งจะไม่นิยมนำมาใช้ในการสังเคราะห์น้ำฝน-น้ำท่ารายเดือน

3.2.2 Continuous Streamflow Simulation Model (CSS)

แบบจำลอง CSS ใช้สำหรับการขยายข้อมูลน้ำท่า ทำนายข้อมูลน้ำท่าในอนาคต ใช้วางแผนจัดการบริหารลุ่มน้ำ เช่น การติดตั้งเครื่องวัดน้ำ ฯลฯ ใช้ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ลุ่มน้ำหรือการใช้ที่ดิน ใช้สำหรับวางแผนระบบการชลประทานและเกษตรกรรม เป็นต้น แบบจำลองประเภทนี้ใช้จำลองสภาพลุ่มน้ำในช่วงเวลายาวกว่าประเภท EBSS เนื่องจากการจำลองสภาพในช่วงเวลาที่ยาวขึ้น ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงผลกระทบเกี่ยวกับ การคายการระเหย การดักการซึม การไหลใต้ผิวดินด้วย ซึ่งในแบบจำลองประเภท EBSS จะไม่ให้ความสำคัญกับค่าเหล่านี้มากนัก หลักการของ CSS คือ จำลองสภาพในส่วนของพื้นดิน (Land phase) ซึ่งหมายถึงน้ำบนผิวดินและใต้ผิวดินด้วย ดังนั้น

จึงอาจกล่าวได้ว่าแบบจำลอง CSS เป็นแบบจำลองของระบบอุทกวิทยา (Hydrologic cycle) แต่แบบจำลองประเภท EBSS เป็นแบบจำลองของระบบน้ำท่า (Runoff Cycle) Singh (1989)

3.2.2.1 ส่วนประกอบของแบบจำลอง CSS

แบบจำลองแบ่งการจำลองลุ่มน้ำเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนพื้นดิน (Land Phase) และส่วนบนลำน้ำ (Channel Phase) มีส่วนต่าง ๆ แสดงดังรูป 3-2 ดังนี้

Mean Areal Rainfall - ใช้ฝนตัวแทนลุ่มน้ำในกรณีที่สถานีวัดน้ำฝนในลุ่มน้ำมากกว่า 1 สถานี

Interception ค่าสูงสุดประมาณไม่เกิน 3 mm. จะเห็นว่าเป็นค่าเล็กน้อยมากสำหรับช่วงฤดูฝน หรือช่วงที่มีฝนตกมาก ซึ่งสามารถตัดทิ้งในขณะที่พิจารณาช่วงเวลานั้น แต่กลับมีความสำคัญมากสำหรับแบบจำลองที่มีช่วงเวลารายปี

Depression Storage ลุ่มน้ำส่วนใหญ่จะมีค่า Depression Storage ไม่มากนักสามารถคิดค่านี้รวมไปกับค่า Soil-moisture Storage ได้เลย แต่สำหรับบางลุ่มน้ำเช่นในพื้นที่ในเมืองหรือพื้นที่ที่มีการเก็บกักน้ำไว้มาก เช่นพื้นที่ที่มีสระน้ำมาก ๆ ค่านี้ก็จะมีความสำคัญตามไปด้วย

Soil Moisture Storage หัวใจของแบบจำลอง CSS คือส่วนนี้ซึ่งจะเกี่ยวพันธ์ถึงการคำนวณค่าการซึม Interflow และการซึมลงสู่ชั้นใต้ดิน (percolation to groundwater) ค่านี้จะพิจาณาในระดับของดินชั้นบน บางทีลึกลงประมาณไม่น้อยกว่าความลึกของรากต้นไม้ (~100 cm) ในชั้นนี้อาจจะแบ่งเป็น 2 ส่วน หรือมากกว่า ซึ่งค่าปริมาณความชื้นในดินสูงสุด (maximum moisture-holding capacities) สามารถคำนวณได้จากลักษณะของดินและพืชที่ปกคลุม (Singh, 1989)

Infiltration อัตราของการซึมขึ้นกับสภาพของความชื้นในดินขณะนั้น ค่า Infiltraion นี้อาจจะเป็นอีกแบบจำลองหนึ่ง และเชื่อมกับแบบจำลองความชื้นในดินอีกที ค่าอัตราการซึมจะคำนวณโดยอาศัยค่าของความชื้นในดิน ดังนั้นทั้งสองค่านี้จะทำงานในลักษณะเชื่อมต่อกัน (interactive)

Evapotranspiration (ET) เป็นกลไกการคำนวณน้ำจากพื้นดินไปสู่อากาศ น้ำที่ตกค้างจะระเหยไป (Evaporated) ส่วนความชื้นในชั้นดินจะไปสู่อากาศโดยการคายระเหย (Evapotranspiration)

ดังนั้นค่าอัตราการคายระเหยจะสัมพันธ์กับค่าความชื้นในดินและทำงานโดยเชื่อมต่อกับแบบจำลองความชื้นในดิน

Interflow การไหลใต้ผิวดินชั้นบน ขึ้นกับความชื้นในดินชั้นบน ดังนั้น ค่าการเก็บกักในชั้นดิน (Soil-Moisture Storage) จึงเป็นหัวใจสำคัญในการหาค่า interflow

Baseflow คำนวณจากค่าการเก็บกักน้ำใต้ดิน (Graoundwater Storage) และอัตราการไหลในช่วงฤดูแล้ง

Surface Runoff น้ำฝนที่ตกลงมาหลังที่ซึมลงดิน และสูญเสียไปกับส่วนอื่นๆ แล้ว ส่วนที่เหลือคือน้ำผิวดิน (Surface Runoff หรือ Overland) ในลุ่มน้ำที่มีสภาพพื้นที่แตกต่างกันมาก แนะนำให้คิดแบบจำลองของน้ำผิวดินแยกกันไปแต่ละลุ่มน้ำย่อย (Singh, 1989)

Channel-Flow Routing การเดินทางของน้ำในลำน้ำ เริ่มตั้งแต่น้ำผิวดินไหลมาลงลำน้ำสาขาแล้วมาลงลำน้ำหลัก ดังนั้นการคำนวณการเดินทางของน้ำในลำน้ำควรจะแบ่งลุ่มน้ำออกเป็นส่วน ๆ

Reservoir-Flow Routing ถ้าในลุ่มน้ำมีที่กักเก็บน้ำจะต้องคำนวณการเดินทางของน้ำผ่านอ่างเก็บน้ำด้วย หรือบางแห่งอาจมีสิ่งกีดขวาง เช่น ถนน ท่อลอด สะพาน และโครงสร้างอื่น ๆ แบบจำลองจะต้องคิดถึงสิ่งเหล่านี้ด้วย

3.2.2.2 ข้อมูลสำหรับแบบจำลองประเภท CSS

ข้อมูลสำหรับแบบจำลองมี 3 ลักษณะคือ

- ข้อมูลสภาพภูมิประเภทของลุ่มน้ำ (Watershed Characteristics) ได้แก่ ข้อมูลดิน สภาพของพื้นที่/การใช้ที่ดิน เป็นต้น
- ข้อมูลสภาพอากาศ (Climatic Characteristics) ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความกดอากาศ เป็นต้น
- ข้อมูลทางด้านอุทกวิทยา (Hydrological characteristics) ได้แก่ข้อมูลน้ำท่า ข้อมูลอัตราการระเหย ข้อมูลน้ำฝน เป็นต้น

อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ดีควรจะใช้ข้อมูลให้น้อยที่สุดแต่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด(Singh,1989)

3.2.2.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

แบบจำลอง CSS ส่วนใหญ่ จะต้องทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ ที่เหมาะสมก่อน วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ มีหลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของแบบจำลอง CSS ว่าจะเหมาะสมกับการหาค่า parameter แบบไหน เช่น หาโดยวิธี Maximum Likelihood วิธี Least Squares วิธี Trial & error เป็นต้น

3.2.2.4 การสร้างแบบจำลองประเภท CSS

การสร้างแบบจำลองกระทำโดยทำการคำนวณสมดุลย์ของน้ำ (Water Balance) โดยนำส่วนของแบบจำลองที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้วมารวมกัน บางส่วนอาจจะมีพฤติกรรมเชื่อมต่อกันและกัน (interactive) รูป 3-2 แสดงถึงลักษณะพฤติกรรมของแบบจำลอง CSS ตาราง 3-2 สรุปแบบจำลองประเภท CSS ที่มีใช้กันในปัจจุบัน และแสดงลักษณะส่วนประกอบแบบจำลอง

3.3 แบบจำลอง Stanford Watershed Model IV (SWM)

แบบจำลอง SWM ถูกพัฒนาขึ้นโดย Crawford และ Linsley เมื่อประมาณปี ค.ศ.1960 เป็นต้นมา เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย (Singh, 1989) ข้อมูลสำหรับป้อนเข้าแบบจำลองมีข้อมูลฝนรายวัน และฝนรายชั่วโมง อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดรายวัน อัตราการระเหยรายวันหรือรายเดือน และข้อมูลเกี่ยวกับคุณลักษณะของลุ่มน้ำ (เป็นค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง) ผลลัพธ์ของแบบจำลองให้ค่าปริมาณน้ำท่ารายชั่วโมงหรือรายวัน แบบจำลองเป็นแบบ Lumped พารามิเตอร์ ประมาณ 34 พารามิเตอร์ ใน 34 ค่านี้ มี 4 ค่า ที่ต้องคำนวณปรับเทียบพารามิเตอร์ ซึ่งเป็นค่าเกี่ยวกับอัตราการซึม ความชื้นในดิน (Soil-moisture zone) และการไหลใต้ผิวดินชั้นบน อีก 30 ค่าที่เหลือหาได้จากแผนที่ การสำรวจ หรือข้อมูลอุตุ-อุทกวิทยา (เนื่องจากเป็นข้อมูลคุณสมบัติของลุ่มน้ำ) ถ้าไม่คำนึงถึงผลกระทบของการละลายของหิมะค่าพารามิเตอร์ จะลดเหลือประมาณ 25 ตัว แบบจำลอง SWM ถูกพัฒนาขึ้นหลายรุ่น ดังนั้นค่าเหล่านี้อาจถูกปรับปรุงวิธีการคำนวณพารมิเตอร์ และจำนวณของพารามิเตอร์ให้เปลี่ยนไป ลักษณะส่วนประกอบของแบบจำลอง SWM IV แสดงในตาราง 3-2 และรูป 3-3

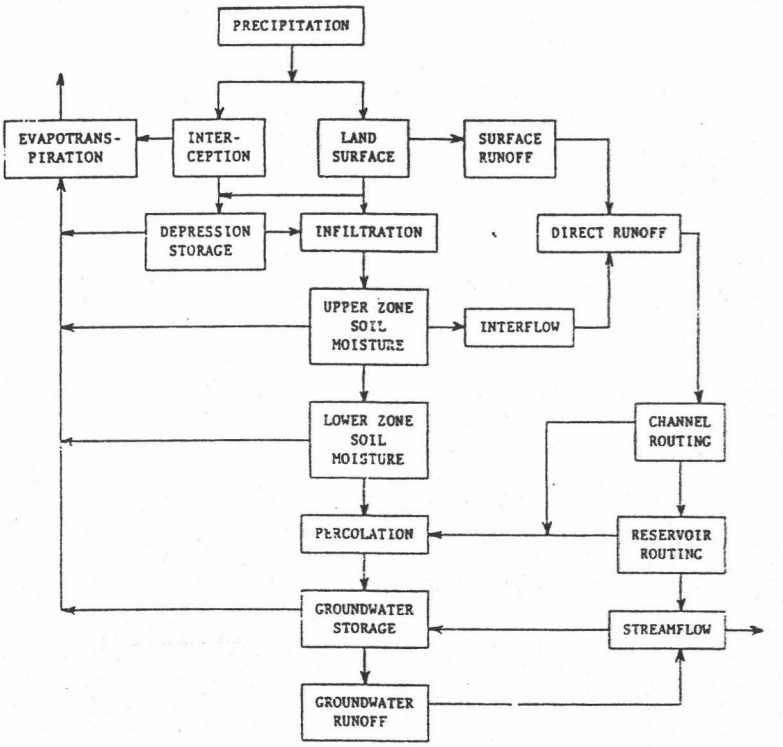
ในตาราง 3-2 แบบจำลอง Kentucky Watershed Model (KWM), Kentucky Self-Calibrating Watershed Model (OPSET) , Ohio State University Model (OSUM) และ National Weather Service River Forecast System (NWSRFS) ล้วนแต่เป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาจากแบบจำลอง SWM ทั้งสิ้น แต่ละรุ่นถูกพัฒนาด้วยวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน รุ่น KWM ถูกปรับปรุงเกี่ยวกับ

ตาราง 3-1 ตัวอย่างรายชื่อแบบจำลองประเภท EBSS และส่วนประกอบของแบบจำลอง (Singh , 1989)

Some event-based streamflow simulation models

Model			Model Components						
Name	*Author(s)*	*Year*	*Baseflow Separation*	*DR Volume*	*Infiltration and Loss*	*DR Hydrograph*	*Channel Routing*	*Reservoir Routing*	*Parameter Optimization*
HEC-1	Hydrologic Engineering Center	1981, 1982	Yes	SCS curve number and two other methods	Variable loss rate method	Clark's and Snyder's unit hydrograph methods	Muskingum method and five other methods	Storage-indication method	Automatic calibration capability
TR-20	Soil Conservation Service	1973	Constant rate method	SCS curve number method	SCS curve number method	Unit hydrograph method	Convex method	Storage-indication method	No
USGS	Dawdy et al.	1972	Constant rate method	Soil moisture accounting	Philip equation	Clark's unit hydrograph	Translation method	No	Rosenbrock's method
HYMO	Williams and Hann	1973	No	SCS curve number method	SCS curve number method	Nash model	Variable storage coefficient method	Storage-indication method	No
SWMM	Metcalf and Eddy, Inc. et al.	1971	No	Loss accounting	Horton's equation	Hydraulic method	Hydraulic routing method	No	No
WAHS	Singh	1983	Recession equation	SCS curve number method	Philip's equation	Geomorphological unit hydrograph method	Linear reservoir	No	Rosenbrock-Palmer method
RORB	Laurenson and Mein	1983	Two options	No	Constant and variable loss rate methods	Nonlinear storage routing	Nonlinear storage routing	Yes	No
WBNM	Boyd et al.	1979a, 1979b	No	Yes	ϕ-index	Linear as well as storage elements for routing	Storage routing	No	Yes
FHSM	Foroud and Broughton	1981	Yes	Yes	Modified Horton's equation	Time area curve + a linear reservoir	No	No	Nonlinear least square curve fitting
XJM	Zhao et al.	1980	Yes	Yes	Storage capacity curve	Unit hydrograph method	Muskingum method	No	No
GAWSER	Ghate and Whiteley	1977, 1982	Yes	Yes	Holtan's equation	Time area curve + convolution	HYMO method	No	No
MIT	Maddaus and Eagleson	1969	No	No	Any suitable model	Linear channel and reservoir	Linear	No	Optimization
HM	Huggins and Monke	1968	No	Yes	Holtan's equation	Kinematic wave method	No	No	No
Kansas	Smith and Lumb	1966	Yes	Yes	Soil moisture accounting	Lag and route method	No	No	No
IHM	Morris	1980	Yes	Yes	Richards equation	St. Venant equation	St. Venant equation	No	No

รูป 3-2 โครงสร้างของแบบจำลองประเภท
Continuous Streamflow Simulation (CSS)



ตาราง 3-2 ตัวอย่างรายชื่อแบบจำลองประเภท CSS และส่วนประกอบของแบบจำลอง (Singh, 1989)

Some CSS models

Model		Model Components										
Name	Author	Inter-ception	Infiltra-tion	Soil Moisture Storage	Evapotrans-piration	Surface Runoff	Snowmelt Runoff	Inter-flow	Groundwater Runoff	Channel Routing	Reservoir Routing	Parameter Optimiza-tion
SWM IV	Crawford & Linsley (1966)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
KWM	Liou (1970)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
OPSET	James (1970, 1972)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
CSUM	Ricca (1972)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No
NWSRFS	Hydrology Research Laboratory (1972)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
SSARR	U.S. Army Engineer Division, North Pacific (1975)	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
API	Sittner et al. (1969)	No	No	Yes	No	Yes	No	No	Yes	No	No	No
USDA	Holtan et al. (1975)	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No
TWM	Clabom and Moore (1970)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
TANK	Sugawara et al. (1984)	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes
HBV	Bergstrom (1976)	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes
SHE	Abbott et al. (1986a, 1986b)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No
CEQUEAU	Charbonneau et al. (1977)	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No
MC	Deschenes et al. (1985a, 1985b)	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No
SCM	Refsgard (1981)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	No
SRBM	Bultot and Dupriez (1986a, 1986b)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No	Yes
UBCWM	Quick and Pipes (1977)	No	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
MRM	Porter and McMahon (1971, 1975)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No	Yes
HYSIM	Manly (1978)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
ARBM	Chapman (1968)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	No	Yes
BM	Boughton (1966)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	No	Yes
HBM	Ando et al. (1983)	No	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	No	Yes
TVA	Tennessee Valley Authority (1972)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes	Yes	No	No	Yes
USUWSM	Andrews et al. (1978)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No	Yes

สภาวะอากาศ (Climate) และสภาพทางภูมิศาสตร์ (Geography) ให้มีสภาพที่คล้ายคลึงกับรัฐ Kentucky และรัฐอื่น ๆ ในสหรัฐอเมริกาที่มีสภาวะอากาศและพื้นดินคล้ายคลึงกัน รุ่น OPSET ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถทำ Calibration ได้โดยตัวของแบบจำลองเอง เป็นต้น ส่วนประกอบของโครงสร้างของรุ่นต่าง ๆ แสดงอยู่ในตาราง 3-2

3.4 แบบจำลอง SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation)

พัฒนาขึ้นครั้งแรกที่ U.S.Corps of Engineerings โดย Rockwood ประมาณปี ค.ศ.1958-64 สำหรับงานวางแผนและออกแบบระบบควบคุมน้ำใน Columbia River Basin ต่อมาได้มีการพัฒนาร่วมกับ The National Weather Service ในปี 1968 โดยแบบจำลองมีวัตถุประสงค์ให้ปฏิบัติการเกี่ยวกับการทำนายน้ำในลำน้ำ (Haan, 1982) แบบจำลองจัดเป็นประเภท Deterministic และ Lumped Conceptual มีพารามิเตอร์มากกว่า 24 ค่า ซึ่งคำนวณโดยวิธี trial & error

รุ่นที่พัฒนาโดย U.S.Army Engineer Division, North Pacific, Portland, Oregon, U.S.A. ประมาณปี ค.ศ.1975 แบบจำลองประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ แบบจำลองลุ่มน้ำ (Watershed model) แบบจำลองระบบแม่น้ำ (river system model) และแบบจำลองระบบการจัดการอ่างเก็บน้ำ (reservoir regulation model)

ส่วนของ watershed model หรือ River Basin Model จะใช้สำหรับสังเคราะห์น้ำท่าจากน้ำฝน ในส่วนของ River System model หรือบางทีเรียก Channel System Model ใช้สำหรับคำนวณการเดินทางของน้ำในลำน้ำ โดยจะแบ่งออกเป็นส่วนย่อย ๆ เริ่มจากส่วนบนของพื้นที่รับน้ำลงมาจนถึงส่วนล่างสุดที่พิจารณา และแบบจำลองย่อยส่วนสุดท้าย คือ Reservoir Regulation Model ซึ่งจะสามารถคำนวณในกรณีลุ่มน้ำมีจุดกักเก็บน้ำอยู่ ทั้ง 3 แบบจำลองย่อย สามารถแยกใช้หรือร่วมกันก็ได้

สำหรับแบบจำลองย่อย watershed model ของ SSARR ใช้ข้อมูลป้อนเข้า คือ น้ำฝนรายวันหรือรายชั่วโมง ซึ่งละเอียดได้ถึง 0.1 ซม. และข้อมูลอัตราการระเหย ในกรณีที่มีหิมะละลายต้องใช้ข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดต่ำสุดรายวันด้วย ผลลัพธ์ของแบบจำลองคือน้ำท่ารายวัน แบบจำลองต้องการข้อมูลน้ำท่าจากการวัดอย่างน้อย 4 หรือ 5 ปี เพื่อคำนวณปรับเทียบ (parameter fitting หรือ model calibration) ข้อมูลที่มีการกระจายของค่าสูงสุดและต่ำสุดมาก ๆ แต่ระยะเวลาสั้น (4-5 ปี) จะดีกว่าข้อมูลยาวเป็น 10 ปี แต่มีสภาพการไหลที่ไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง ถ้ามีข้อมูลการไหลในช่วงการไหลสูงสุดน้อย แบบจำลองจะสังเคราะห์น้ำท่าได้ไม่ดีนัก การทดสอบแบบจำลอง (model verification) ควรจะ

กระทำโดยใช้ข้อมูลการไหลหลาย ๆ สถานการณ์และไม่ควรใช้ข้อมูลในการปรับเทียบแบบจำลองเพียง 2-3 ปี (Haan,1982)

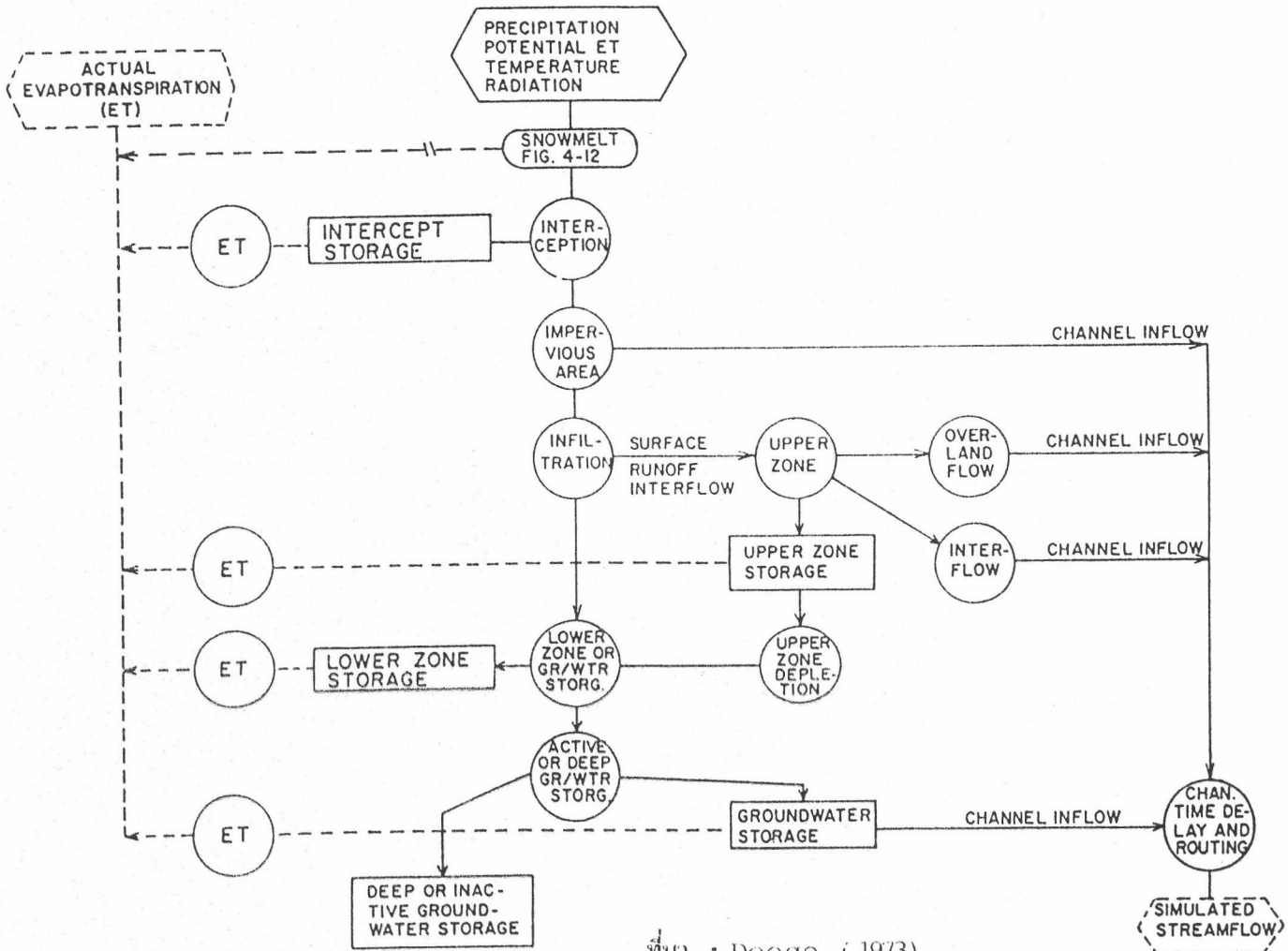
ข้อจำกัดอย่างหนึ่งของแบบจำลอง SSARR คือ แบบจำลองมีค่าพารามิเตอร์ มากกว่า 24 ค่า และบางค่าต้องการข้อมูลหรือวิธีการวัดจากลุ่มน้ำที่ศึกษา ซึ่งบางลุ่มน้ำอาจจะไม่มีข้อมูลเหล่านี้เป็นค่าเริ่มต้น ทำให้ยากต่อการคำนวณ รูป 3-4 แสดงลักษณะการทำงานของแบบจำลองย่อย Watershed Model ของ SSARR แบบจำลองถูกนำมาทดลองใชกับหลายพื้นที่ทั่วโลก โดยเฉพาะลุ่มน้ำใหญ่ๆรวมถึงแม่น้ำมูลในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยด้วย Arbhabhirama (1978) ได้ใช้แบบจำลอง SSARR ศึกษาความสัมพันธ์ของน้ำฝนกับน้ำท่าในลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบน โดยใช้ข้อมูลน้ำฝน 60 สถานี อัตราการระเหย 5 สถานี และสถานีวัดน้ำ 27 สถานี พื้นที่ลุ่มน้ำที่ศึกษาประกอบไปด้วย เขื่อนภูมิพล เขื่อนสิริกิตต์ เขื่อนกิ่วลม ใช้ข้อมูลรายวันของปี ค.ศ.1968 1971 และ 1975 ซึ่งเป็นปีแล้ง ปีปกติและปีน้ำมากตามลำดับ ผลการศึกษาปรากฏว่าแบบจำลองให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากการสังเคราะห์กับข้อมูลจากการวัดที่ดีทุกสถานี

3.5 <u>แบบจำลอง SACRAMENTO</u>

แบบจำลองพัฒนาขึ้นโดย U.S.National Weather Service and California Department of Water Resources โดย Burnash และ Ferral เมื่อประมาณ ค.ศ.1969 จัดเป็นแบบจำลองประเภท Deterministic Lumped Conceptual และอยู่ในกลุ่ม CSS แบบจำลองสามารถสังเคราะห์น้ำท่า ทำนายการเกิดน้ำหลากล่วงหน้า และสามารถศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงการใช้พื้นที่ดินได้

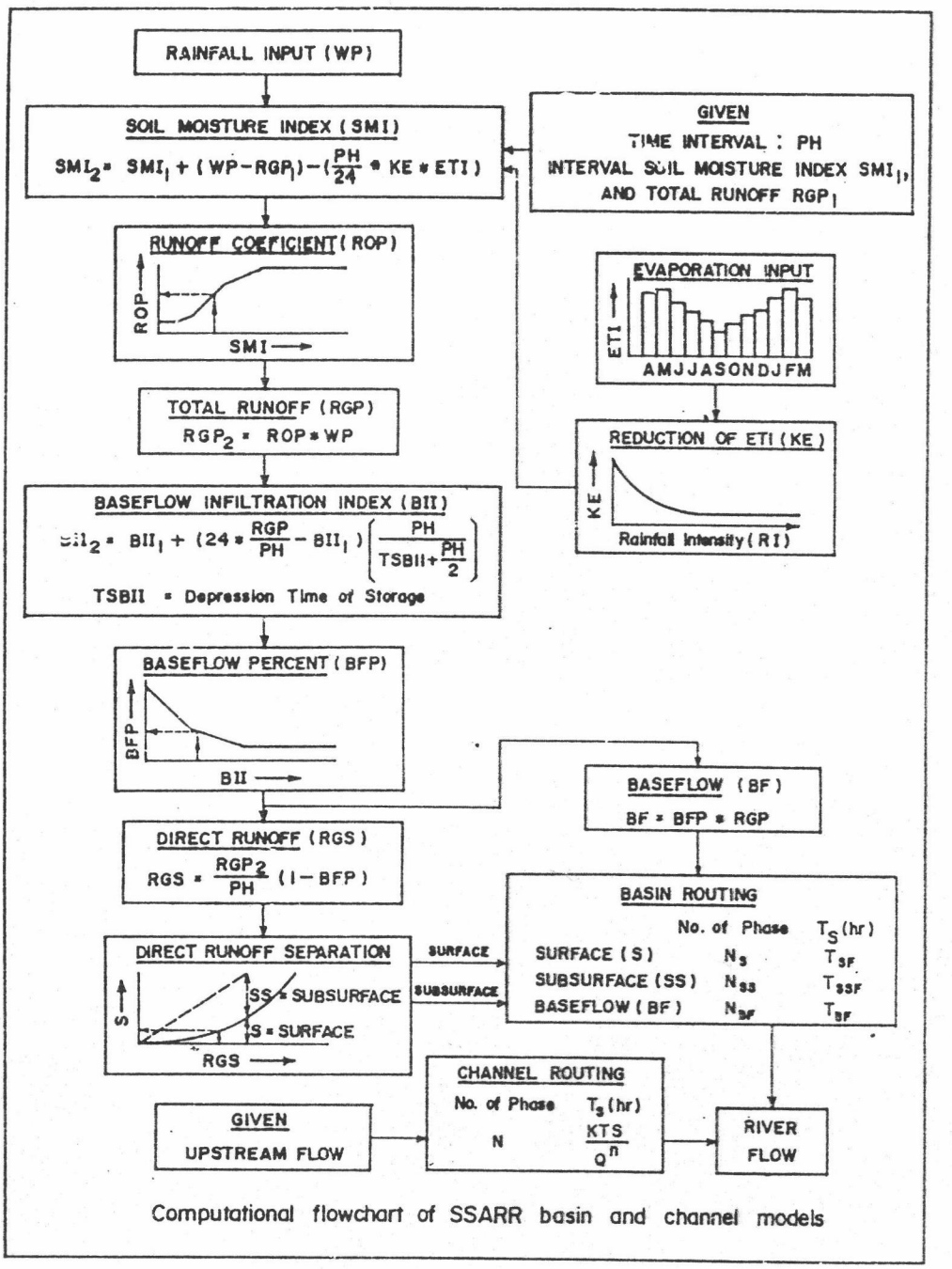
ขบวนการคำนวณในแบบจำลองนี้สามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนทางพื้นดิน (Land Phase) และส่วนทางพื้นน้ำ (Channel Phses) ในส่วนทางพื้นดินแบบจำลองจะสมมติโดยการรวบรวมค่าพารามิเตอร์ ซึ่งเป็นจำนวนของความชื้นภายในดินโดยจะแบ่งพื้นที่เป็นลุ่มน้ำใหญ่หรือลุ่มน้ำย่อย ๆ ภายในลุ่มน้ำย่อยปริมาณฝนตกและคุณลักษณะต่าง ๆ จะเหมือนกับลุ่มน้ำใหญ่การแพร่กระจายของคลื่นน้ำท่วม (Flood Waves) ในลำน้ำสามารถพิจารณาได้จากแบบจำลองโดยการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ บางค่าที่มีผลกระทบ ประกอบกับการพิจารณาจากลักษณะทางกราฟหนึ่งหน่วยน้ำท่า (Unit Hydrograph) (ปกครอง, ..2538) แบบจำลองคำนวณค่าพารามิเตอร์ โดยทำการปรับเทียบค่าข้อมูลจากการวัดให้ใกล้เคียงกับข้อมูลจากการสังเคราะห์ลักษณะแนวคิดของแบบจำลองแสดงดังรูป 3-5

ปกครอง (2538) ได้ศึกษาการสังเคราะห์น้ำท่าโดยใช้แบบจำลอง Sacramento ในการสังเคราะห์น้ำท่าของลุ่มน้ำเพชรบุรี พบว่าการสังเคราะห์ข้อมูลน้ำท่าเป็นระบบลุ่มน้ำโดยใช้แบบจำลอง



ที่มา : Dooge (1973)

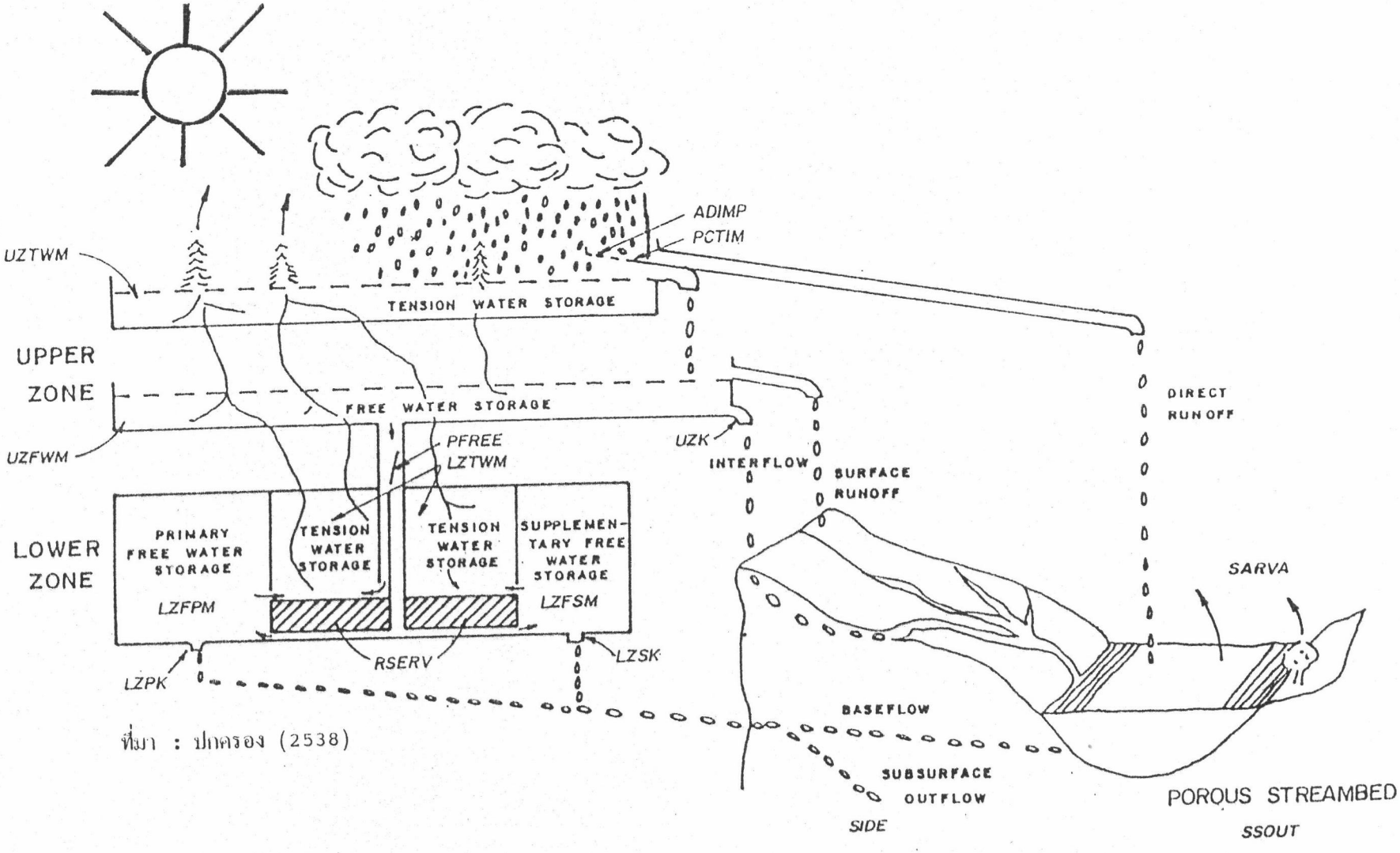
รูป 3-3 การทำงานของแบบจำลอง Standford Watershed Model IV



Computational flowchart of SSARR basin and channel models

ที่มา : A.Arbhabhiramaและ T.Tingsanchali (1987)

รูป 3-4 การทำงานของแบบจำลอง SSARR (Watershed และ Channel Models)



ที่มา : ปกครอง (2538)

รูป 3-5 แนวคิดการสร้างแบบจำลอง SACRAMENTO

นี้ ต้องคำนึงถึงการเลือกใช้ข้อมูลน้ำฝนที่สามารถเป็นตัวแทนที่ดีของพื้นที่มาใช้ และสรุปว่าถ้าต้องการข้อมูลน้ำท่าที่มีช่วงเวลายาวกว่าข้อมูลน้ำท่าจริง ควรใช้แบบจำลองนี้ ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลก่อน จากนั้นจึงค่อยใช้แบบจำลองทางสถิติเช่น HEC-4 สังเคราะห์ข้อมูลน้ำท่าเป็นระบบลุ่มน้ำ

3.6 แบบจำลองถัง (TANK MODEL)

3.6.1 ลักษณะทั่วไปของแบบจำลอง

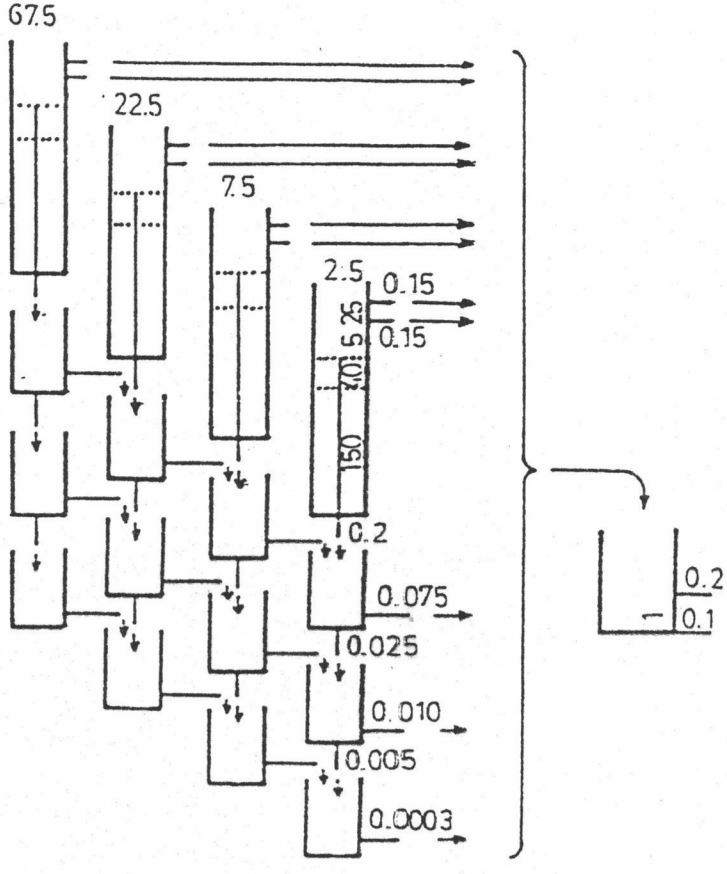
แบบจำลองถังพัฒนาขึ้นใช้โดย Suguwara และคณะ เมื่อประมาณ คศ.1974 ที่ The National Research Center For Disaster Prevention, Tokyo , Japan จำลองสภาพโดย สมมุติให้พื้นที่รับน้ำเป็นถังหลายใบเรียงกันตามแนวดิ่ง ดังรูป 3-6 ฝนและหิมะละลายทั้งหมดจะตกลงบนถังใบบนสุด ถังแต่ละใบจะมีทางน้ำออก 1 ทาง ที่ด้านล่าง และมีทางน้ำออก 1 หรือ 2 ทางที่ด้านข้าง น้ำที่ไหลลงด้านล่างจะไปสู่ถังใบถัดไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งใบสุดท้ายน้ำที่ไหลลงด้านล่างจะคิดเป็น loss น้ำที่ไหลออกทางด้านข้างของถังจะกลายเป็นน้ำที่ไหลลงลำน้ำ จำนวนของถัง ขนาดและตำแหน่งของทางน้ำออกจะกำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์ แบบจำลองถังที่มีชุดของถังในแนวดิ่ง 1 ชุด จะเหมาะสำหรับจำลองน้ำฝนน้ำท่าในพื้นที่ที่มีสภาพชุ่มชื้น (Humid Regions) ดังรูป 3-6(ข) สำหรับพื้นที่ที่เป็น arid และ semi-arid ควรใช้แบบจำลองถังที่มีชุดของถังเรียงตามแนวดิ่ง ขนานกันหลายชุดดังรูป 3-6(ก) การไหลลงด้านล่าง (ตามแนวดิ่ง) จะเหมือนกับแบบจำลองถังแบบชุดเดียว ส่วนการไหลด้านข้างจะสมมติให้ไหลไปสู่ถังในชุดถัดไปทางด้านข้างดังรูป 3-6(ข) ยกเว้นถังชุดสุดท้ายและถังใบบนสุดของทุกชุด การไหลออกทางด้านข้างจะกลายเป็นปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่ลำน้ำโดยตรง การคำนวนค่าพารามิเตอร์ ในแบบจำลองสามารถกระทำได้ทั้งแบบ Trial & Error หรือแบบ Automatic Procedure ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้สร้างแบบจำลอง การเปลี่ยนจำนวนและรูปแบบของพารามิเตอร์ในแบบจำลอง จะทำให้โครงสร้างของแบบจำลองเปลี่ยนไป

3.6.2 การประเมินปริมาณน้ำของแบบจำลองถัง

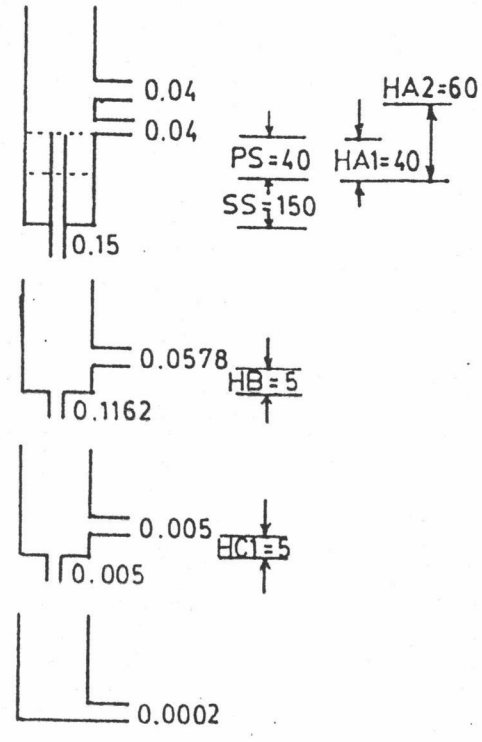
ปริมาณน้ำที่พิจารณาในแบบจำลองแบ่งเป็น 3 กลุ่มหลัก

- Free water (ปริมาณน้ำไหลออกจากถัง)
- Confined water/soil water (ปริมาณความชื้นในดิน)

และ - Evapotranspiration (ปริมาณการคายและระเหยน้ำ)



(ก) แบบจำลองถังชนิดหลายชุด



(ข) แบบจำลองถังชนิด 1 ชุด

รูป 3-6 ตัวอย่างโครงสร้างของแบบจำลองถัง

ก) การคำนวณปริมาณน้ำในถัง

$$Y = \alpha X$$

Y = ปริมาณน้ำไหลออก

X = ปริมาณน้ำในถังเมื่อเวลา t

α = สัมประสิทธิ์การไหล

เมื่อเวลา $t+\Delta t$;

$X' = (1-\alpha)X$;

X = ปริมาณน้ำในถังที่เวลา $t + \Delta t$

ปริมาณการไหลออกจากถังที่เวลา $t+\Delta t$

$Y_{(t+\Delta t)} = (1-e^{-\alpha dt}) X$; α น้อยกว่า 1 ถ้า $\alpha = \infty$; $Y = X$

ข) ปริมาณความชื้นของดินในถัง (Confine/Soil Water) มี 2 ลักษณะ

- ความชื้นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของน้ำในถังใบบนจากดินชั้นบนลงสู่ดินชั้นล่าง

  $T_2 = TC (1-XS/SS)$

- ความชื้นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของน้ำในถังใบล่างขึ้นไปใบบน

  $T_1 = TB (1-XA/PS)$

XS = ความชื้นในดินชั้นที่ 2 ของถังใบบน

SS = ความชื้นที่จุดอิ่มตัวของดินชั้นที่ 2 ของถังใบบน

XA = ความชื้นในดินชั้นที่ 1 ของถังใบบน

PS = ความชื้นที่จุดอิ่มตัวของดินชั้นที่ 1 ของถังใบบน

TC & TB = สัมประสิทธิ์

ค) ปริมาณการคายและการระเหยของน้ำ

- กรณีมี Free Water อยู่ในถังใบบนมาก = 0.8E (E = อัตราการระเหย)
- กรณีไม่มี Free Water ในถังใบบน = 0.6E
- กรณีมี Free Water แต่น้อยกว่า 0.8E

  = xf + 0.75 (0.8E-xf) ; xf = Free Water ที่ถังใบบน

3.6.3 พารามิเตอร์ของแบบจำลองถัง แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม

- Parameters ของลักษณะภูมิประเทศ ได้แก่ค่า

  S_n , Ha_n , HB_n , HC_n , HD_n -----, TC และ TB

- Parameters ที่เป็นสัมประสิทธิ์ของการไหล ได้แก่ค่า

  A_n , B_n , C_n ,D_n ------- ฯลฯ

3.6.4 การทดสอบแบบจำลอง

- การคำนวณปริมาณการไหลขึ้นกับช่วงเวลา Δt ที่กำหนด โดยทดลองกำหนดค่า parameters ต่าง ๆ ให้กับ แบบจำลอง
- เปรียบเทียบปริมาณการไหลที่ได้จากแบบจำลองกับปริมาณการไหลจากการวัดจริง
- ทดลองเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ไปจนกว่าปริมาณการไหลที่ได้จากแบบจำลอง
- จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการวัดจริง

3.6.5 ข้อมูลสำหรับแบบจำลอง

- ข้อมูลน้ำท่า (สำหรับทดสอบฯ calibrations)
- ข้อมูลน้ำฝน
- อัตราการระเหย

3.6.6 ประสบการณ์ในการใช้แบบจำลอง

วีระชัย (2530) ได้ศึกษาถึงประสบการณ์ในการใช้แบบจำลองถังในประเทศไทย สามารถสรุปได้ดังนี้

คศ.1976 M.Sugawara ได้ใช้แบบจำลองถังในการคำนวณปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำเจ้าพระยาและลุ่มน้ำสาขา จำนวน 4 แห่ง คือ

- ที่สถานีวัดน้ำ C.2 อ.เมือง จ.นครสวรรค์ พื้นที่รับน้ำ 110,496 ตร.กม
- แม่น้ำปิงที่สถานีวัดน้ำ P.2 เขื่อนภูมิพล จ.ตาก พื้นที่รับน้ำ 26,390 ตร.กม
- แม่น้ำยมที่สถานีวัดน้ำ Y.6 บ้านแก่งหลวง จ.สุโขทัย พื้นที่รับน้ำ 12,658 ตร.กม
- แม่น้ำน่านที่เขื่อนสิริกิติ์ จ.อุตรดิตถ์ พื้นที่รับน้ำ 13,086 ตร.กม

คศ.1977 A.B.M Kamal Uddin ได้ศึกษาเรื่อง " The Applicability of Tank Model to Monthly Rainfall - Runoff Relationship" โดยใช้พื้นที่ศึกษา 3 แห่ง คือ แม่น้ำน่านที่เขื่อนสิริกิติ์ แม่น้ำยมที่สถานี Y.6 และแม่น้ำแควน้อยที่สถานี K.10 จ.กาญจนบุรี พื้นที่รับน้ำ 7,000 ตร.กม ผลการศึกษาสรุปได้ว่า ได้ผลดีพอใช้สำหรับแม่น้ำน่านและแม่น้ำยม แต่ไม่ดีสำหรับแม่น้ำแควน้อย

คศ.1980 Perfecto M. Loria ได้ศึกษาเรื่อง "Automatic Calibration of Tank Model in Ping River Basin Thailand" โดยใช้ข้อมูลรายวัน ที่สถานีวัดน้ำ P.19A บ.ท่าศาลา อ.จอมทอง จ. เชียงใหม่ พื้นที่รับน้ำ 14,230 ตร.กม ผลการศึกษาสรุปได้ว่าแบบจำลองถังสำหรับพื้นที่ชุ่มชื้น สามารถใช้คำนวณปริมาณน้ำท่ารายเดือนจาก ข้อมูลฝนรายวัน ได้ผลดี

คศ.1983 Sanyu Consultants Inc. ได้ใช้แบบจำลองถัง กับคลองท่าฉาง และคลองท่าทนซึ่ง มีพื้นที่รับน้ำ 258 และ 91 ตร.กม ตามลำดับ ผลการจำลองน้ำฝนน้ำท่ารายเดือนได้ค่าความสัมพันธ์ ระหว่างน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลองกับน้ำท่าที่ได้จากการวัดมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ $R^2 = 0.88$

วีระชัย ชูพิศาลยโรจน์ (2530) ได้ศึกษา " ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำฝน-น้ำท่าในลุ่มน้ำป่าสักโดยวิธีแบบจำลองถัง" ใช้ลำน้ำสาขาของแม่น้ำป่าสัก จำนวน 6 สถานี มีพื้นที่รับน้ำไม่เกิน 1,000 ตร.กม. เป็นพื้นที่ศึกษาและ ใช้แบบจำลองถังเป็นแบบจำลองสำหรับทดลองสังเคราะห์ข้อมูลน้ำท่าจากข้อมูลน้ำฝนรายวันและอัตราการระเหยรายวันผลการศึกษา แบบจำลองสามารถให้ผลดี เป็นที่น่าเชื่อมั่นได้

3.7 แบบจำลอง NAM

แบบจำลอง NAM (DHI, 1990) ถูกพัฒนาขึ้นที่ The Technical University of Denmark โดย Nielsen และ Hansen เมื่อประมาณ คศ.1973 NAM เป็นคำย่อของภาษาเดนมาร์ค "Nedbor-Afstromnings Model" ซึ่งหมายถึง precipitation-runoff-model ในภาษาอังกฤษ เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเภท deterministic , conceptual และ lumped ใช้สำหรับจำลองน้ำฝนน้ำท่าในพื้นที่ชนบท (rural catchments)

3.7.1 โครงสร้างของแบบจำลอง

แบบจำลองประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ที่จะให้ปริมาณน้ำคือ OVERLAND FLOW (QOF) , INTERFLOW (QIF) และ BASEFLOW (BF) ใน 3 ส่วนหลักนี้มีการเก็บกักน้ำอยู่ 4 ที่ คือ

SNOW STORAGE , SURFACE STORAGE , LOWER ZONE STORAGE และ GROUNDWATER STORAGE ลักษณะโครงสร้างของแบบจำลอง แสดงในรูป 3-7

พิจารณารูป 3-7 สำหรับพื้นที่ ที่ได้รับอิทธิพลจากการละลายของหิมะ แบบจำลองจะคิดปริมาณน้ำจากการละลายของหิมะโดยพิจารณาที่อุณหภูมิเป็นหลัก ถ้าอุณหภูมิ >0·c ค่า Qmelt = CSNOW * TEMP ค่า CSNOW เป็นค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเรียกว่า degree-day-coefficient

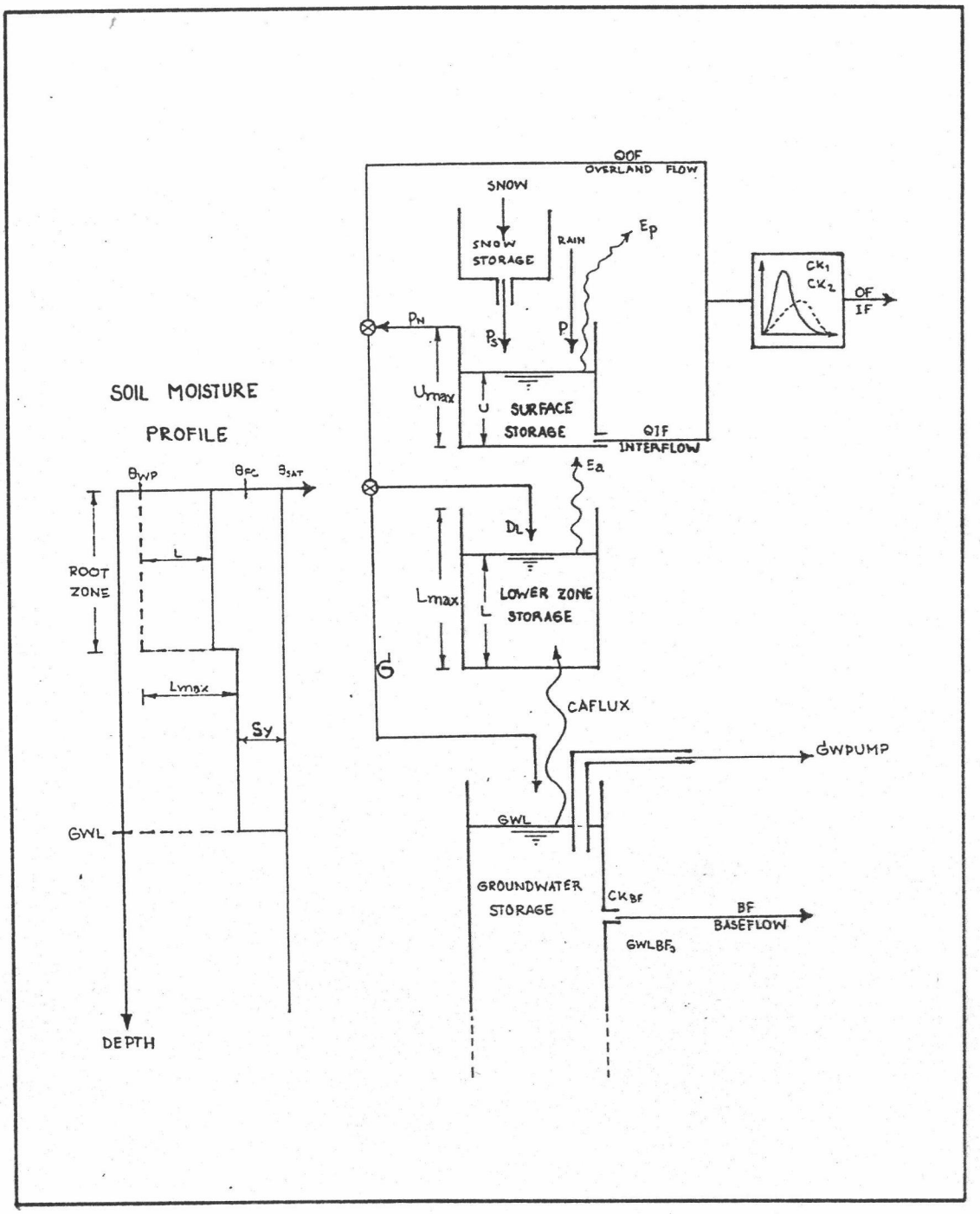
พื้นที่เก็บกักส่วนบน (SURFACE STORAGE) หมายถึง พื้นที่ปกคลุมเหนือผิวดินทั้งหมด ปริมาณน้ำที่เก็บกักในส่วนนี้เท่ากับ U และ Umax คือ ปริมาณน้ำที่พื้นที่ส่วนนี้สามารถเก็บไว้ได้มากที่สุด

พื้นที่ส่วนที่อยู่ถัดจาก พื้นที่เก็บกักส่วนบน คือ Lower Zone Storage หรือ root zone หมายถึง พื้นดินส่วนที่รากของต้นไม้สามารถดูดซับน้ำได้ L คือค่าปริมาณน้ำเก็บกักในพื้นที่ส่วนนี้ และ Lmax คือ ปริมาณน้ำสูงสุดที่ พื้นที่ส่วนนี้จะสามารถเก็บไว้ได้ ปริมาณน้ำ, U ในพื้นที่เก็กกักส่วนบน จะระเหยไปส่วนหนึ่งและอีกส่วนกลายเป็น Interflow (ปริมาณน้ำไหลใต้ผิวดินชั้นบน) เมื่อ U maximum น้ำบางส่วนกลายเป็น Excess Water, P_n ไหลลงลำน้ำโดยตรง ส่วนที่เหลือไหลลงสู่ Lower Zone และ groundwater storage

ปริมาณน้ำ Overland Flow (QOF) คำนวนโดยตั้งสมมติฐานว่าเป็นอัตราส่วนของ P_n (Proportional to P_n) และ ผันแปรเป็นลักษณะเส้นตรง กับอัตราส่วนของความชื้นในดิน $L/_{Lmax}$ ชั้น Lower Zone Storage (L คือ ปริมาณในชั้น Lower Zone) ปริมาณน้ำส่วนเกิน P_n ส่วนที่เหลือ (ไม่ได้ไหลลงลำน้ำโดยตรง) ไหลลง Lower Zone Storage หรือ root zone ปริมาณน้ำนี้ส่วนหนึ่งเป็นค่า DL ซึ่งถูกตั้งสมมติฐานว่าเป็น ปริมาณน้ำส่วนที่เพิ่มให้กับค่า L ในชั้น Lower Zone และส่วนที่เหลือแบบจำลองสมมติให้ไหลลึกลงไป และเป็นปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นสำหรับ groundwater storage, G

ปริมาณน้ำ Interflow (QIF) แบบจำลองตั้งสมมติฐานให้เป็นอัตราส่วนกับ U และผันแปรแบบเป็นเส้นตรงกับอัตราส่วนของความชื้น/ปริมาณน้ำในชั้น lower zone ปริมาณน้ำจาก BASEFLOW (BS) คำนวณโดยคิดว่าเป็นปริมาณการไหลออกจาก linear reservoir ที่เวลาคงที่ CK_{BF}

3.7.2 ค่าพา รามิเตอร์ของแบบจำลอง



รูป 3-7 โครงสร้างของแบบจำลอง NAM (DHI,1990)

- STORAGE CAPACITIES; U_{max} , L_{max} (mm)
- OVERLAND FLOW RUNOFF COEFF ; CQOF
- TIME CONSTANT FOR INTERFLOW; CKIF
- SNOW ROUTINE ; CSNOW
- BASEFLOW ; CAREA, $GWLBF_0$, SY AND CKBF
- CAPILLARY FLUX AND WATER LOGGING ; GWLFL, GWL_{min}
- THRESHOLD VALUES ; TIF , TOF , TG
- TIME CONSTANTS FOR OVERLAND FLOW ROUTING ; CK_1 & CK_2
- แบบจำลองกำหนดค่าสภาวะเริ่มต้น สำหรับเริ่มทดสอบแบบจำลองมาให้ดังนี้
  - ค่าปริมาณน้ำในส่วนเก็บกักต่าง ๆ
  - ค่า interflow และค่าการไหลบนผิวดิน
  - ค่าความลึกของน้ำใต้ดินที่การเริ่มต้นสังเคราะห์

3.7.3 ข้อมูลสำหรับป้อนเข้าแบบจำลอง NAM

Rainfall	โดยปกติใช้ฝนรายวันแต่ถ้าต้องการความละเอียดมากขึ้นก็สามารถกำหนดให้กับแบบจำลองได้
Potential evapotranspiration	ใช้ข้อมูลรายเดือน
Temperature	จะใช้เฉพาะกรณีพื้นที่ศึกษามีอิทธิพลของการ ละลายของหิมะเกี่ยวข้องใช้ข้อมูลเฉลี่ยรายวัน
ข้อมูลน้ำท่าจากการวัด	สำหรับปรับเทียบแบบจำลอง

3.7.4 การปรับเทียบแบบจำลอง

ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแบบจำลองได้จากการปรับเทียบ แบบจำลองโดย กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และค่าสภาวะเริ่มต้น ตามเอกสารแนะนำการใช้แบบจำลองแล้วทดสอบแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผล/ปริมาณน้ำท่า ที่ได้จากแบบจำลองกับปริมาณ น้ำท่าที่ได้จากการวัดจริง (ใช้ข้อมูลประมาณ 3-5 ปี)

3.7.5 ประสบการณ์การใช้แบบจำลอง

DHI (1986) ได้สรุปประสบการณ์ในการใช้แบบจำลอง NAM ไว้ดังกล่าวต่อไปนี้ ประเทศไทย ปี คศ. 1979-1980 ใช้ขยายและทำนายข้อมูลน้ำท่าสำหรับโครงการสูบน้ำเพื่อการประมง และการป้องกันน้ำท่วม ของลุ่มน้ำโขงที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ประเทศศรีลังกา ปี คศ. 1981-1983 ใช้ขยายข้อมูลน้ำท่าและใช้เป็นเครื่องมือสำหรับศึกษาเกี่ยวกับอุทกวิทยา และโครงการจัดหาน้ำใช้และน้ำประปาในชนบทของประเทศศรีลังกา ประเทศมาเลเซีย ปี คศ. 1979-1980 ใช้สังเคราะห์น้ำท่าในหลาย ๆ พื้นที่รับน้ำของโครงการศึกษาความเหมาะสมของ Sandakan Water Supply in Sabah , Malaysia ในประเทศอินเดีย คศ. 1980-1983 ใช้เป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อการทำนายน้ำท่วมที่ The Damodar Valley Basin , Northern India และในอีกหลายพื้นที่ประเทศอินเดีย ประเทศเดนมาร์ค ใช้งานกว่า 30 Catchments ตั้งแต่ 15 ตร.กม จนถึง 1,100 ตร.กม. เพื่อ : การศึกษาและวิจัยที่ Technical University of Denmark และที่ DHI ในด้านขยายข้อมูลน้ำท่า และศึกษาผลกระทบจากพัฒนาแหล่งน้ำใต้ดินและผลกระทบทางด้านอุทกวิทยา ประเทศกรีนแลนด์ , 1978-1981 ใช้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาโครงการไฟฟ้าพลังน้ำ และที่ประเทศ Iceland ปี 1981 ถูกติดตั้งไว้ในองค์การคอมพิวเตอร์ เพื่อการพลังงานแห่งชาติสำหรับใช้ศึกษาโครงการไฟฟ้าพลังน้ำ

3.8 <u>แบบจำลอง HEC-4</u>

แบบจำลอง/โปรแกรม ถูกพัฒนาขึ้นที่ Hydrologic Engineering Center, Corps of Engineers ของกองทัพบกสหรัฐอเมริกันเมื่อประมาณปี ค.ศ.1971 วัตถุประสงค์ของโปรแกรมเพื่อสังเคราะห์น้ำท่ารายเดือน (MONTHLA STREAMFLOW SIMULATION) จากข้อมูลน้ำท่า น้ำฝน หรืออัตราการระเหย อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือร่วมกันสังเคราะห์ก็ได้ มีลักษณะเป็นแบบจำลองทางสถิติ (STATISTICAL MODEL) กล่าวคือ โปรแกรมจะทำงานในลักษณะอาศัยหลักการทางสถิติ และความสัมพันธ์ของอนุกรมเวลา ระหว่างสถานี (Serial and Cross - Correlation) โดยการคำนวนของโปรแกรมจะรักษาคุณสมบัติหลักทางสถิติของข้อมูลแต่ละสถานีตามที่มีข้อมูลวัดอยู่เดิม คือ ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าความเบ้ (Skewness) ของแต่ละเดือนในรอบปี ตลอดจนรักษาความสัมพันธ์ของข้อมูลรายเดือนแต่ละสถานีไว้ การคำนวณในลักษณะดังกล่าวมีส่วนเป็นแบบจำลองเส้นตรง (Linear Model) ในเชิงสถิติ และประกอบด้วยส่วนผันแปร (random part) ซึ่งใน HEC-4 กำหนดใช้การกระจายสถิติแบบ Pearson Type III Distribution (ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ พ.ศ.2537 ข.)

โปรแกรมสร้างขึ้นด้วยภาษา Fortran IV สำหรับรุ่นที่ใช้กับเครื่อง PC(HEC-4PC) จะทำงานภายใต้เงื่อนไข DOS V 2.0 หรือสูงกว่า ความจำ RAM 512 kilobytes หรือมากกว่า ต้องมี math - copocessor, the 8087 chip ลักษณะการทำงานของโปรแกรมมีขั้นตอนดังกล่าวต่อไปนี้

1. การสังเคราะห์ค่าสถิติในโปรแกรม; ค่าอัตราการไหลของแต่ละเดือน (calendar month) ที่แต่ละสถานีวัด จะถูกเพิ่มขึ้น 1 เปอร์เซ็นต์ ของค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลเฉลี่ยของแต่ละเดือน ก่อนเพื่อป้องกันปัญหาค่า infinite negative logarithms และ ค่านี้จะถูกลบออกภายหลัง จากนั้น จึงทำการหาค่าสถิติต่าง ๆ (Mean, standard deviation และค่า skew coeffts) ของแต่ละสถานี แต่ละเดือน โดยใช้สมการ (1),(2),(3) และ (4)

$$X_{i,m} = \text{Log}\,(Q_{i,m}+q_i) \qquad \text{---------- (1)}$$

$$\overline{X} = \sum_{m=1}^{N}\frac{X_{i,m}}{N} \qquad \text{---------- (2)}$$

$$S_i = \sqrt{\sum_{m=1}^{N}\left(X_{i,m}-X_i\right)^2/(N-1)} \qquad \text{---------- (3)}$$

$$G_i = N\sum_{m=1}^{N}\left(X_{i,m}-\overline{X}_1\right)^3/\left((N-1)(N-2)S_i^3\right) \qquad \text{---------- (4)}$$

โดยที่ :

$X_{i,m}$ = ค่าลอการิทึมของปริมาณน้ำท่ารายเดือนที่ถูกเพิ่มขึ้น

$Q_{i,m}$ = น้ำท่ารายเดือนจากการวัด

q_i = ค่าอัตราการไหลที่ถูกเพิ่มขึ้น 1 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเดือนที่การไหลเป็น 0

$\overline{X}$ = ค่าเฉลี่ยลอการิทึมของค่าน้ำท่ารายเดือนที่ถูกเพิ่มขึ้น

N = จำนวนของข้อมูล

S_i = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่สังเคราะห์เป็นแบบ Unbiased data

G = ค่าสัมประสิทธิ์ความเอียงของข้อมูลที่สังเคราะห์เป็นแบบ Unbiased data

i = เดือนที่ และ m = ปีที่

2. สำหรับสถานีและเดือนที่มีข้อมูลไม่ครบ โปรแกรมจะทำการค้นหาข้อมูลที่ยาวกว่าจากสถานีอื่นที่ใช้ในการคำนวณ (ในระหว่างสถานี) เพื่อที่จะให้การคำนวณค่าสถิติของสถานีหรือเดือน

ที่มีข้อมูลไม่ครบเป็นที่เชื่อถือได้มากขึ้น ดังนั้นค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน จะถูกปรับใหม่โดยสมการที่ (5) ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานของ โปรแกรมในการเลือกข้อมูลที่ดีที่สุดในการปรับแก้ และใช้สมการที่ (6) และ (7) ในการปรับแก้

$$N_1' = \frac{N_1}{1 - \frac{N_2 - N_1}{N_2} R^2} \qquad \text{---------- (5)}$$

$$\overline{X}_1' - \overline{X}_1 = \left(\overline{X}_2' - \overline{X}_2 \right) R S_1 / S_2 \qquad \text{---------- (6)}$$

$$S_1' - S_1 = \left(S_1' - S_2 \right) R^2 S_1 / S_2 \qquad \text{---------- (7)}$$

โดยที่ N = Length of record

R = Linear correlation coefficient

เทอมที่มี primes (') แสดงถึง ค่าของข้อมูลที่มีช่วงยาวกว่า

เทอมที่ไม่มี primes คือค่าของข้อมูลที่มีสั้น (หรือไม่ครบ) กว่าทั้งที่สถานี1 และ 2

3. ค่าอัตราการไหล (น้ำท่าหรือค่าที่ต้องการสังเคราะห์) แต่ละค่าจะถูกปรับเปลี่ยนให้เป็น Normalized standard variate โดยใช้การกระจายแบบ Pearson Type III ดังสมการที่ (8) และ (9)

$$t_{i,m} = \left(X_{i,m} - \overline{X}_i \right) S_i \qquad \text{---------- (8)}$$

$$K_{i,m} = \frac{6}{g_i} \left[\left(\left(g_i t_{i,m} / 2 \right) + 1 \right)^{1/3} - 1 \right] + \frac{g_i}{6} \qquad \text{------ (9)}$$

โดยที่ t = Pearson Type III standard deviate

K = Normal standard deviate

4. หลังจากที่ปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของทุกเดือนและทุกสถานีแล้วค่า gross (simple) correlation coefficient , R ระหว่างทุกคู่ของสถานี ที่แต่ละเดือนปัจจุบันและเดือนที่แล้ว จะคำนวณโดยสมการที่ (10)

$$R_{i,i=1} = \left\{1-\left[1-\left(\sum_{m=1}^{N} X_{i,m}X_{i-1,m}\right)^2 / \left(\sum_{m=1}^{N} X_{i-1,m}^2 \sum_{m=1}^{N} X_{i,1-m}^2\right)^2\right](N-1)/(N-2)\right\}^{1/2} \quad \text{-----(10)}$$

โดยที่ $X = X - \overline{X}$

5. ถ้าค่าตัวแปรของบางคู่ในการหาค่า R ในหัวข้อที่แล้ว มีไม่เพียงพอ ค่าหายไปจะถูกประมาณขึ้นจากความสัมพันธ์ของค่าของเดือนปัจจุบันแและเดือนที่แล้ว และหาค่า R โดยใช้สมการที่ (11) โดยใช้สัญญลักษณ์ i,j,k, แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าว

$$R_{ij} = R_{ki}R_{kj} \pm \sqrt{\left(1-R_{ki}^2\right)\left(1-R_{kj}^2\right)} \quad \text{---------- (11)}$$

6. ค่าน้ำท่ารายเดือนหรือค่าที่ต้องการสังเคราะห์ที่ขาดหายไปของแต่ละสถานี จะถูกประมาณสำหรับทุกสถานีในแต่ละเดือนในลักษณะเช่นนี้ เมื่อไหร่ก็ตามที่น้ำท่ารายเดือนถูกสร้างขึ้นมาจะมีค่าที่เป็นจริงแล้ว ของทุกสถานีในเดือนปัจจุบันหรือเดือนก่อน ดังนั้น ค่าของเดือนก่อนจะถูกนำมาใช้ เพื่อที่จะสร้างค่าน้ำท่าที่หายไปของเดือนนั้น ๆ ขึ้นมาใหม่ สมการการถดถอย (regression equation) ในลักษณะของnormal standard variate จะถูกคำนวณโดยการเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ จาก correlation matrix ที่ถูกต้องแล้วของเดือนนั้น และคำนวณโดยวิธีของ Crout

7. ค่า R ที่ไม่เหมาะสมที่เกิดจากการกำหนดค่าตัวแปรที่สูงกว่าควรจะเป็น จะถูกตัดทิ้ง (ค่าที่มากกว่า 1) ถ้ากรณีเช่นนี้เกิดขึ้น (เนื่องจากข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์) การคำนวณสมการถดถอยจะกระทำใหม่ จนกว่าจะได้ค่าตามที่ต้องการ

8. จากนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตราฐานปกติ (Normal standard deviates) ที่จะทำให้ ได้ค่าอัตราการไหลที่เหมาะสม จะคำนวณได้จากสมการ (12) และอัตราการไหลหาได้จากสมการ (13) , (14)

$$t_{i,m} = \left\{\left[\left(g_i/6\right)\left(K'_{i,m} - g_i/6\right)+1\right]^3 - 1\right\}2/g_i \quad \text{---------- (12)}$$

$$X_{i,m} = \overline{X} + t_{i,m}S_i \quad \text{---------- (13)}$$

$$Q_{i,m} = \text{Antilog } X_{i,m} - q_i \quad \text{---------- (14)}$$

เมื่อ ; $Q_{i,m} \geq 0$ ---------- (15)

9. เมื่อค่าน้ำท่ารายเดือนถูกคำนวณเรียบร้อยแล้ว แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ correlation matrices มีค่ามากกว่า 1 ค่า correlation matrix coeff แต่ละค่าจะถูกทดสอบใหม่โดยเริ่มที่การรวมค่า R 3 ค่า ของเดือนปัจจุบัน, เดือนที่แล้วและสำหรับทุกเดือน แล้วใช้สมการที่ (11) ทดสอบจนให้ค่าที่ควรจะเป็น ถ้าได้ค่าเกิน 1 จำเป็นจะต้องปรับแก้ใหม่ โดยแนะนำให้เริ่มกำหนดที่ค่าน้อยกว่า 0.2 ถ้าค่า consistency coeff ยังไม่ถึงอีก ค่าสัมประสิทธิ์ในแต่ละ inconsistent matrix จะเพิ่มขึ้นไปจากค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ทั้งหมด ใน matrix จนกระทั่งได้ตามที่ควรจะเป็น

10. เมื่อการสังเคราะห์ค่าต่าง ๆ เสร็จแล้ว ค่าน้ำท่าสังเคราะห์รายเดือนจะหาได้โดยสมการโดยวิธี Crout method เริ่มจากค่าเฉลี่ย (Zero deviation) สำหรับทุกสถานีในเดือนแรก และจะตัดทิ้ง 2 ปีแรก ของข้อมูลที่สังเคราะห์ได้

$$K'_{i,j} = \beta_1 K'_{i,j} + \beta_2 K'_{i,2} + \ldots + \beta_{j-1} K'_{i,j-1} + \beta_j K'_{i-1.j} + \beta_{j+1} K'_{i-1.j+1} + \ldots + \beta_n K'_{i-1.n} + \sqrt{1 - R^2_{i.j}} Z_{i.j} \quad \text{----------(16)}$$

เมื่อ K' = Monthly flow logarithm, expressed as a normal standard deviated

β = Beta coeff computed from correlation matrix

i = Month number

j = Stanition number

n = Number of interrelated stations

R = Multiple correlation coeff

Z = Random number from normal sstandard population

11. ค่า Max , Min และ Average flows ของข้อมูลจากการวัดและจากการ generated ถูกคำนวณ โดย routine search technique ดังที่กล่าวมาแล้ว

การคำหนดค่าต่าง ๆใน Program นี้ ต้องการสัมประสิทธิ์ 4 ค่าสำหรับแต่ละสถานีและค่า R 2 ค่า สำหรับสถานีที่คำนวณคู่กัน ในการกำหนดค่า wet และ dry season ของแต่ละสถานี จะมีการกำหนดดังนี้;

ก. ค่า Average mean logarithm ของการไหลในฤดูน้ำหลาก (wet season 3 เดือน) กำหนดให้บวก 0.2 สำหรับเดือนระหว่างกลาง และค่าเฉลี่ยลบ 0.1 สำหรับ 2 เดือนที่เหลือ

ข. ค่า Average mean logarithm ของการไหล ในฤดูแล้ง (dry season 3 เดือน) ให้ใช้ทั้ง 3 เดือน ค่าระหว่างฤดูน้ำหลากและฤดูแล้ง ใช้ interpolated linearly

ค. ค่า Average std deviation สำหรับ 12 เดือน ให้ใช้กับทุกเดือน

ง. ค่า Average serial correlation coefficient สำหรับ 12 เดือน ให้ใช้ค่าน้ำ ลบด้วย 0.15 แต่ไม่น้อยกว่า 0 สำหรับ แต่ละเดือนของฤดูน้ำหลาก และ ให้ใช้ค่านี้บวกด้วย 0.15 แต่ไม่เกิน 0.98 สำหรับ แต่ละเดือน ของฤดูแล้งนอกนั้นใช้ค่าน้ำสำหรับทุกเดือน

จ. ค่า R เฉลี่ยของ interstation ของทั้ง 12 เดือน ให้ใช้สำหรับแต่ละเดือนกับ สถานีคู่ m. กำหนดให้มีข้อมูลได้ไม่เกิน 10 สถานี

โปรแกรม HEC-4 เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ในที่นี้ขอยกตัวอย่างเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องเท่านั้น

วันชัย (2534) ใช้โปรแกรม HEC-4 สังเคราะห์ข้อมูลน้ำท่ารายเดือนของลุ่มน้ำแควใหญ่ เพื่อเปรียบเทียบผลกับแบบจำลองน้ำท่าโดยวิธี Linear Programming ซึ่งสรุปผลว่าสามารถใช้งานได้ดีกับลุ่มน้ำดังกล่าว

ปกครอง (.2538) ได้ใช้โปรแกรม HEC-4 สังเคราะห์น้ำท่ารายเดือนของลุ่มน้ำเพชรบุรี และสรุปว่าการสังเคราะห์ข้อมูลน้ำท่ารายเดือนควรกระทำทั้งลุ่มน้ำ จะให้ผลที่น่าเชื่อถือได้มากกว่าการสังเคราะห์เป็นสถานี

ภาควิชาวิศวกรรมแหล่งน้ำ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2537 ก และ ข) ได้ทดลองใช้โปรแกรม HEC-4PC สังเคราะห์น้ำท่ารายเดือนจากข้อมูลน้ำฝนและน้ำท่ารายเดือนในลุ่มน้ำเพชรบุรี และลุ่มน้ำชายฝั่งทะเลประจวบคีรีขันธ์ โดยสังเคราะห์เป็นระบบทั้งลุ่มน้ำ พบว่าโปรแกรมให้ค่าบางค่าผิดเพี้ยน จากปรากฏการณ์ทางอุทกวิทยาที่น่าจะเป็น เช่นค่าสูงสุดและต่ำสุดที่สังเคราะห์ได้ไม่เป็นจริงเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพอุทกวิยาของสถานีใกล้เคียงในช่วงเวลานั้น

3.9 <u>การคำนวณน้ำท่าจากน้ำฝนและลักษณะลุ่มน้ำในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ</u>

สวัสดิ์ บางสายน้อย (สำนักงานเร่งรัดพัฒนาชนบท, 2525) ได้ทำการศึกษาวิทยานิพนธ์โดยใช้ข้อมูลน้ำฝน-น้ำท่า ในพื้นที่ลุ่มน้ำภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จำนวน 18 ลุ่มน้ำ สำหรับใช้ในการ

ตรวจสอบความเชื่อมั่นของแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า จากรูปแบบของสมการดังนี้

$$R = C\, I^{\beta_1}\, A^{\beta_2}\, S^{\beta_3} \qquad \text{---------- (1)}$$

R = ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยรายปี (ล้านลูกบาศก์เมตร)

I = ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายปี (มิลลิเมตร)

A = พื้นที่รับน้ำฝน (ตารางกิโลเมตร)

S = ความลาดชันของลุ่มน้ำ

C = ค่าคงที่

β_1 β_2 และ β_3 = ค่าสัมประสิทธิ์

และทำการคำนวนหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยใช้วิธี Stepwise Regression Method โดยปลี่ยนรูปแบบจำลองสมการ (1) ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง ในรูปของ log ดังนี้

$$\text{Log } R = C + \beta_1 \text{ Log } I + \beta_2 \text{ Log } A + \beta_3 \text{ Log } S \text{---------} \quad (2)$$

ทำการหาค่าพารามิเตอร์ ; C , β_1 , β_2 และ β_3 โดยวิธี Stepwise Regression และเปรียบเทียบค่า Observed Log R กับ Predicted log R ผลต่างระหว่าง 2 ค่านี้ คือค่า Residuals โดยทำการปรับค่า Residuals ใหม่เพื่อให้ Obs log R = Pred log R โดยเพิ่มค่า residuals เข้าไปในค่าคงที่ C เพื่อทำให้ obs Log R = Pred Log R แล้วจึงคำนวณค่า antilog ของค่าคงที่ C ที่หาได้ใหม่ หลังจากนั้นเขียนกราฟค่าคงที่ C ที่ได้ลง ณ จุดศูนย์ถ่วง ของแต่ละลุ่มน้ำจะได้เส้นแสดงค่าเท่ากัน ของค่า C ผลการศึกษาแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สรุปได้ดังสมการ

$$R = CI^{1.3473}\, A^{0.72555}\, S^{-0.23362}$$

เมื่อ C = ค่าคงที่ ณ จุดใด ๆ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งดูได้จากตาราง 3-1 หรือประมาณค่าจากรูป 3-3

A = พื้นที่รับน้ำฝน, ตร.กม

S = ความลาดชันของลุ่มน้ำ (เมตร/เมตร)

3.10 การประเมินหาน้ำท่ารายเดือนโดยวิธี Linear Programming

วันชัย ประไพสุวรรณ (2534) ได้ทำการศึกษาประเมินหาน้ำท่ารายเดือนโดยใช้วิธี Linear Programming ในบริเวณพื้นที่ 5 ลุ่มน้ำ ได้แก่ ลุ่มน้ำแม่แตง (สาขาแม่น้ำปิงตอนบน) ลุ่มน้ำเชิญ (สาขาลำน้ำพอง) ลุ่มน้ำแควใหญ่ ลุ่มน้ำหลังสวน และลุ่มน้ำแม่แจ่ม (สาขาลำน้ำปิง) โดยกำหนดรูปแบบของสมการความสัมพันธ์ดังนี้

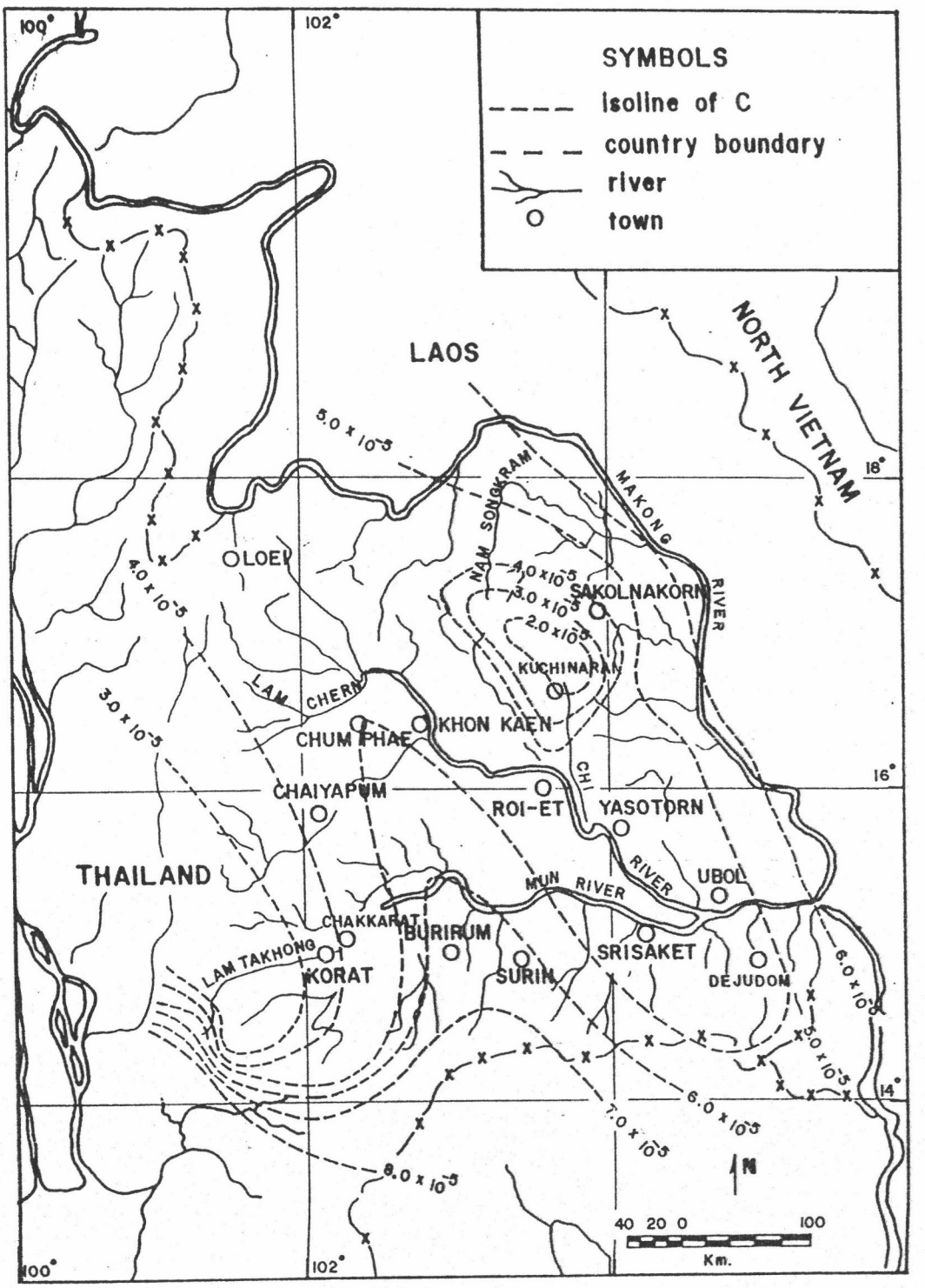
$$Q_0 = K_0P_0 + K_1P_1 + K_2P_2 + K_3P_3 + K_4P_4 + K_5P_5$$

เมื่อ Q_0 = ปริมาณน้ำเดือนปัจจุบัน

$P_0 \sim P_5$ = ปริมาณฝนที่ตกในเดือนปัจจุบันและย้อนหลังไปอีก 5 เดือน

$K_0 \sim K_5$ = ตัวประกอบที่เปลี่ยนจากค่าน้ำฝนเป็นน้ำท่าของเดือนปัจจุบันและย้อนหลังอีก 5 เดือน

รูปแบบสมการดังกล่าวมีลักษณะเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการประเมินหาปริมาณน้ำท่ารายเดือนจากปริมาณน้ำฝน โดยหลักการของโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Linear Programming) ประกอบด้วยโปรแกรมย่อย 9 โปรแกรม แต่ละโปรแกรมจะทำหน้าที่ในการสร้างสมการวัตถุประสงค์ สมการข้อจำกัด แล้วจึงแก้ปัญหาสมการเชิงเส้นตรงดังกล่าวด้วยวิธีซิมเพล็กซ์ (SIMPLEX) โดยอาศัยหลักการและแนวคิดในการสร้างฟังค์ชั่นวัตถุประสงค์เพื่อหาความผิดพลาดที่น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ได้จากการคำนวนกับปริมาณที่ตรวจวัดได้จริง ผลของการศึกษา พบว่า เมื่อปรียบเทียบแบบจำลองนี้กับ HEC-4 แบบจำลองนี้ให้ผลลัพธ์ที่ดีน่าเชื่อถือได้แต่มีข้อจำกัดของแบบจำลอง คือ สามารถใช้คำนวณข้อมูลฝนได้ไม่เกิน 10 ปี โดยคิดฝนย้อน 6 เดือน และใช้เวลาในการประมวลผลนาน



ที่มา : สำนักงานเร่งรัดพัฒนาชนบท (2525)

รูป 3-8 Isoline ของค่าคงที่ C ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

ตาราง 3-3 ค่า Constant C. ของ 18 ลุ่มน้ำในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

Basin	Constant, C ($x10^{-5}$)
Nam Mun near Chakkarat	2.6
Lam Phra Plerng	2.5
Lam Takhong at Ban Khlong Phai	3.1
Nam Mun at Ban Chorakhe Hin	3.4
Lam Sae at Ban Mak Krat	4.6
Lam Takhong at Ban Bung Toei	7.1
Lam Takhong at Kao Yai	8.1
Nam Sai Yai at Wang Heo	5.0
Nam Mun at Ubol	5.8
Nam Chi at Yasotorn	5.0
Lam Dom Yai at Dej Udom	3.9
Lam Dom Noi at Sae Falls	5.4
Huai Bang Sai at Ban Kham Palai	4.9
Nam Pung at Dam Site	2.1
Nam Pung at Ban tam Hai Bridge	2.2
Lam Chern at Ban Song Kon	4.0
Huai Bang-I near Ban Kham Sai	4.6
Nam Songkram at Ban Tha Kokdang	4.8

ที่มา : สำนักงานเร่งรัดพัฒนาชนบท (2525)