



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม

อนุรักษ์วิทยา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน
บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

Preliminary Test Run of KINEROS 2 Model for Estimating Sediment Yield
at Mae Sa Subwatershed, Chiang Mai Province

นามผู้วิจัย นางสาวอนุสร อันทมา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมนิมิตร พุกงาม, วท.ค.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ศาสตราจารย์นิพนธ์ ตั้งธรรม, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย อรุณประภารัตน์, D.Agr.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.รชนี เอมพันธ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน
บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

Preliminary Test Run of KINEROS 2 Model for Estimating Sediment Yield
at Mae Sa Subwatershed, Chiang Mai Province

โดย

นางสาวอนุสรรา อินทมา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2552

อนุสรณ์ อินทมา 2552: การทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำ และสิ่งแวดล้อม) สาขาการจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมนิมิตร พุกงาม, วท.ด. 140 หน้า

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง KINEROS 2 รวมทั้งกำหนดภาพเหตุการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินตามนโยบายการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ และตามระดับความลาดชันเพื่อคาดการณ์ผลผลิตตะกอนที่เกิดขึ้น โดยรวบรวมข้อมูลจากภาคสนามของสถานีวัดน้ำฝน จำนวน 11 แห่ง และสถานีวัดน้ำท่า 1 แห่ง บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ในปี พ.ศ. 2550

ผลการศึกษาพบว่า ส่วนย่อยที่เล็กที่สุดที่สามารถวิเคราะห์ผลผลิตตะกอน เมื่อกำหนดให้มีพื้นที่รับน้ำต่ำสุดที่ถือว่าเป็นส่วนลำธาร มีค่าร้อยละ 2.50 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ สามารถแบ่งเป็นส่วนพื้นดิน มีจำนวนเท่ากับ 78 ส่วน และส่วนลำธาร มีจำนวนเท่ากับ 33 ส่วน การศึกษาได้คัดเลือกสถานีฝนเดี่ยวตัวแทนทั้งหมด 14 สถานี พบว่าแบบจำลองสามารถประมาณปริมาณน้ำท่า ผลผลิตตะกอนได้ในเชิงปริมาณและลักษณะความผันแปรแต่ละช่วงเวลา ตลอดจนความเข้มข้นตะกอนสูงสุด โดยส่วนใหญ่ประมาณได้ต่ำกว่าค่าตรวจวัด จากการศึกษาพบว่า ช่วงต้นฤดูฝนเกิดผลผลิตตะกอนมากกว่าช่วงเวลาอื่นๆ ประมาณ 90-600 ตัน และมีความเข้มข้นตะกอนสูงสุดประมาณ 40-50 กิโลกรัมต่อวินาที รองลงมา คือ ช่วงปลายฤดูฝน ประมาณ 160-500 ตัน และมีความเข้มข้นตะกอนสูงสุดประมาณ 20-40 กิโลกรัมต่อวินาที และช่วงกลางฤดูฝน ประมาณ 80-350 ตัน และมีความเข้มข้นตะกอนสูงสุดประมาณ 7-10 กิโลกรัมต่อวินาที ทั้งนี้อาจเนื่องจากลักษณะการตกของฝนในประเทศไทยเป็นฝนทิ้งช่วง กล่าวคือ ฝนตกในช่วงต้นฤดูฝนและทิ้งช่วงการตกในช่วงกลางฤดูฝนและกลับมาตกอีกครั้งหนึ่งในช่วงปลายฤดูฝน ทำให้ช่วงต้นฤดูฝนมีความเข้มข้นตะกอนสูงสุดมากกว่าช่วงอื่น และกลับมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วงปลายฤดูฝน และให้ความถูกต้องในการจำลองแบบได้ดีถึง 0.8178 หรือร้อยละ 81.78

จากการกำหนดภาพเหตุการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดิน พบว่า สามารถลดผลผลิตตะกอนอยู่ระหว่างร้อยละ 12.65 – 82.90 โดยการใช้ประโยชน์ที่ดินตามนโยบายการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำลดได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม การใช้ประโยชน์ที่ดินตามระดับความลาดชันมีความเป็นไปได้มากกว่า เนื่องจากจำนวนประชากรเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับยังคงมีความต้องการและจำเป็นต้องใช้ประโยชน์พื้นที่ ดังนั้น จึงควรวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดินตามระดับความลาดชัน ซึ่งเหมาะสมและเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการลดผลผลิตตะกอน แต่ต้องควบคู่ไปกับมาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำ

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. สมณมิตร พุกงาม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ศ.ดร. นิพนธ์ ตั้งธรรม และ ผศ.ดร. วันชัย อรุณประภารัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ช่วยวางแผนการทำวิจัย ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนตรวจ เสนอแนะและแก้ไขข้อผิดพลาด ข้อบกพร่องต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อีกทั้งขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. วิชา นิยม ประธานการสอบ และ ดร. ไพสานต์ เพ็ชรพลาย ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ช่วยเสนอแนะ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์เพิ่มมากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ. ชัชชัย ตันตสิรินทร์ ที่ช่วยเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และโครงการวิจัยร่วมระหว่างคณะวนศาสตร์กับภาควิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยฮาวาย ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่อนุเคราะห์ข้อมูลบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติ พี่น้อง ที่คอยดูแลเอาใจใส่ อบรมสั่งสอนข้าพเจ้าให้มีโอกาสในการศึกษามาจนถึงวันนี้ ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคน ที่คอยห่วงใย เห็นใจและเข้าใจ ข้าพเจ้าเสมอมา สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขออุทิศคุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ต่อผู้มีพระคุณ บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่าน ด้วยใจบริสุทธิ์

อนุสรฯ อินทมา

ตุลาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการ	37
ผลและวิจารณ์	47
สรุปและข้อเสนอแนะ	92
สรุป	92
ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	95
ภาคผนวก	100
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	140

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอนรายเดือนจากสถานีตรวจวัดน้ำท่า บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	51
2	ปริมาณน้ำฝน น้ำท่า ผลผลิตตะกอน และความเข้มข้นตะกอนสูงสุด ในแต่ละ สตอร์มที่เลือกศึกษา บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	53
3	ร้อยละความคลาดเคลื่อนของการประมาณความเข้มข้นตะกอนสูงสุด	65
4	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในแบบจำลอง KINEROS 2 ที่มีผลต่อการเกิด ผลผลิตตะกอน ทั้งส่วนพื้นดินและส่วนลำธาร	69
5	ค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเทียบแล้ว เพื่อประมาณผลผลิตตะกอนในแบบจำลอง KINEROS 2	70
6	ปริมาณน้ำท่า ผลผลิตตะกอน ความเข้มข้นตะกอนสูงสุด ที่ประมาณได้โดยใช้ แบบจำลอง KINEROS 2	76
7	การใช้ประโยชน์ที่ดินที่ควรเป็นตามชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำ สาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	86
8	การใช้ประโยชน์ที่ดินที่ควรเป็นตามระดับความลาดชัน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำ สาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	88
9	สัดส่วนพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินจากภาพเหตุการณ์ (scenarios) ที่แตกต่างกัน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	89
10	ปริมาณน้ำท่า และผลผลิตตะกอนที่ประมาณจากภาพเหตุการณ์ได้โดยใช้ แบบจำลอง KINEROS 2 บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

	ตารางผนวกที่	หน้า
1	การประมาณค่าชลศาสตร์ของดินจากการสุ่มตัวอย่างในภาคสนาม	101
2	ค่าคงที่แสดงถึงความต้านทานการไหลของน้ำของสิ่งที่ยู่บนดิน (roughness coefficient)	102
3	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลกลุ่มดิน และรหัสลักษณะดิน (SNUM) บนแผนที่ลักษณะดินที่จัดทำขึ้นใหม่	103
4	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับหน่วยดิน เนื้อดิน ชุดที่ 1	104
5	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับหน่วยดิน เนื้อดิน ชุดที่ 2	105
6	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับรหัสลักษณะดิน ร้อยละของดินแต่ละ ชั้นบนแผนที่ลักษณะดินที่จัดทำขึ้นใหม่	106
7	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับลักษณะดิน	107
8	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ที่ดิน	108
9	ตัวอย่างเพิ่มข้อมูลที่แบบจำลองได้เตรียมไว้เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน ของสตอร์มฝนที่ตก	110
10	เพิ่มข้อมูลน้ำฝนที่ใช้ในแบบจำลอง KINEROS 2	111
11	ตำแหน่งสถานีวัดน้ำฝนและน้ำท่า บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	112
12	จำนวนครั้งของฝนที่ตกรายเดือน ของแต่ละสถานีวัดน้ำฝน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำ สาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	113
13	ความยาวนานในการตกของฝนแต่ละครั้ง (duration) ของแต่ละสถานีวัดน้ำฝน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	114
14	ความหนักเบาของฝนในแต่ละครั้งที่ฝนตก (rainfall intensity) ของแต่ละ สถานีวัดน้ำฝน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	115
15	ปริมาณน้ำฝน (rainfall amount) รายเดือนของแต่ละสถานีวัดน้ำฝน บริเวณพื้นที่ ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	116

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ประเภทของแบบจำลองตามระบบการจำแนกของ Becker and Serban	8
2	มโนทัศน์การทำงานของแบบจำลอง KINEROS 2	11
3	ตัวอย่างส่วนน้ำไหลผ่านผิวดิน (overland flow element) และส่วนลำธาร (channel element) ของลุ่มน้ำย่อย Walnut Gulch	12
4	ส่วนน้ำไหลผ่านผิวดิน (overland flow element) ทั้ง 6 ส่วนที่ประกอบเป็นส่วนเมือง (urban element)	12
5	รูปเรขาคณิตภาพตัดขวาง (cross section) ของส่วนลำธาร (channel element)	13
6	รูปเรขาคณิตเพียงบางส่วนของส่วนน้ำในท่อระบายน้ำ (culvert element)	15
7	กระบวนการน้ำไหลผ่านผิวดิน (overland flow)	20
8	ลักษณะของน้ำไหลผ่านผิวดิน (overland flow) เมื่อพิจารณาตามลักษณะภูมิประเทศ	22
9	ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลอง KINEROS 2 ใน extension AGWA	27
10	ขั้นตอนแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำออกเป็นส่วนย่อย (watershed delineation)	28
11	ขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ (parameter estimation)	29
12	ขั้นตอนสร้างเพิ่มข้อมูลปริมาณน้ำฝน (rainfall generation)	29
13	ขั้นตอนประมวลผล (model execution)	30
14	ขั้นตอนแสดงผลลัพธ์ (results visualization)	31
15	พื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ และตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดน้ำฝนและน้ำท่า	34
16	ขั้นตอนการศึกษาการทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	38
17	ลำดับการทดลองใช้ extension AGWA คำสั่ง run landcover and soils parameterization เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับดิน	43

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	ขั้นตอนการใช้คำสั่งใน extension AGWA เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน	45
19	แนวโน้มปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอน ที่ตรวจวัดได้จากภาคสนาม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	51
20	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับผลผลิตตะกอนรายเดือน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	52
21	ปริมาณน้ำฝนสะสม น้ำท่า และผลผลิตตะกอน ที่ตรวจวัดได้จากภาคสนาม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	54
22	ส่วนพื้นดินและส่วนลำธาร ที่ถูกแบ่งเพื่อใช้วิเคราะห์ในแบบจำลอง KINEROS 2 บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	60
23	การแบ่งส่วนย่อยที่ผิดพลาด (error) โดยทดลองใช้โปรแกรมเสริม extension AGWA	61
24	การใช้ประโยชน์ที่ดินในแต่ละส่วนพื้นที่ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	63
25	ลักษณะของดินในแต่ละส่วนพื้นที่ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัด เชียงใหม่	64
26	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเท่าของค่าตั้งต้นของพารามิเตอร์ในส่วนพื้นดิน กับความเข้มข้นตะกอนสูงสุด	66
27	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเท่าของค่าตั้งต้นของพารามิเตอร์ในส่วนลำธาร กับความเข้มข้นตะกอนสูงสุด	67
28	ปริมาณน้ำฝน น้ำท่า และความเข้มข้นตะกอนที่ประมาณได้จากแบบจำลอง KINEROS 2 เปรียบเทียบกับที่ตรวจวัดได้ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	72
29	การเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าที่ประมาณได้กับที่ตรวจวัดจากภาคสนาม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
30	การเปรียบเทียบผลผลิตตะกอนที่ประมาณได้กับที่ตรวจวัดจากภาคสนาม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	80
31	การเปรียบเทียบความเข้มข้นตะกอนสูงสุดที่ประมาณได้กับที่ตรวจวัดจากภาคสนาม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	81
32	ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากการประมาณได้และตรวจวัดจากภาคสนาม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	82
33	การใช้ประโยชน์ที่ดินซ้อนทับชั้นคุณภาพลุ่มน้ำตามนโยบายการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	84
34	การใช้ประโยชน์ที่ดินที่เป็นไปตามนโยบายการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	85
35	การใช้ประโยชน์ที่ดินประโยชน์ที่ดินที่เป็นไปตามระดับความลาดชัน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
1	เส้นชั้นความสูง (contour) บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	117
2	แบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model; DEM) บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	118
3	ทิศทางการไหลของน้ำ (flow direction) บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	119
4	การไหลสะสม (flow accumulation) บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	120
5	แผนที่ของกลุ่มดิน (soil group) บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	121
6	ลักษณะทางธรณีวิทยา (geology) บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	122
7	ลักษณะของดิน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	123
8	การใช้ประโยชน์ที่ดิน ในปี พ.ศ. 2550 บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	124
9	ขอบเขตอิทธิพลของสถานีวัดน้ำฝน โดยวิธี Theissen polygon บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	125
10	ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	126
11	ระดับความลาดชัน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่	127
12	ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ประจำเดือนมกราคม พ.ศ. 2550	128
13	ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ประจำเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2550	129
14	ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ประจำเดือนมีนาคม พ.ศ. 2550	130

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
15	ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ประจำเดือนเมษายน พ.ศ. 2550	131
16	ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ประจำเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2550	132
17	ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ประจำเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2550	133
18	ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ประจำเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2550	134
19	ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ประจำเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2550	135
20	ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ประจำเดือนกันยายน พ.ศ. 2550	136
21	ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ประจำเดือนตุลาคม พ.ศ. 2550	137
22	ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ประจำเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2550	138
23	ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ประจำเดือนธันวาคม พ.ศ. 2550	139

การทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน
บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

Preliminary Test Run of KINEROS 2 Model for Estimating Sediment Yield
at Mae Sa Subwatershed, Chiang Mai Province

คำนำ

การจัดการลุ่มน้ำ เป็นการจัดการพื้นที่โดยผสมผสานหลักการทางวิชาการ และการมีส่วนร่วมของประชาชน เพื่อให้มีทรัพยากรธรรมชาติใช้อย่างยั่งยืน โดยมีหลักในการตรวจสอบผลสัมฤทธิ์ของการจัดการ คือ การมีปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการใช้ มีระยะเวลาการไหลของน้ำที่เหมาะสมสม่ำเสมอ คุณภาพของน้ำที่ดีเหมาะสมต่อการอุปโภค/บริโภค ควบคุมการพังทลายของดิน ลดความเสียหายจากอุทกภัย รวมถึงการใช้ทรัพยากรในลุ่มน้ำอย่างถูกต้องตามหลักการอนุรักษ์ ทั้งนี้เพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ดังกล่าว จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดินให้ถูกต้องตามศักยภาพของพื้นที่ ปัญหาการชะล้างพังทลายของดินเป็นปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสียหน้าดินและความอุดมสมบูรณ์ของดิน แล้วไหลสะสมลงสู่ลำธาร ทำให้คุณภาพของน้ำในลำธารไม่ดี แหล่งน้ำตื้นเขิน ซึ่งปัญหานี้เกิดจากสาเหตุหลัก 2 ประการด้วยกัน คือ ประการแรก เกิดโดยธรรมชาติ (natural soil erosion) ซึ่งเกิดจากการกระทำของอิทธิพลของลม น้ำฝน และแรงโน้มถ่วง การชะล้างพังทลายของดินแบบนี้เกิดอย่างช้าๆ ใช้เวลานานไม่สามารถควบคุมได้ ส่งผลกระทบไม่มากนัก และประการที่สอง เกิดโดยมีตัวเร่ง (accelerated soil erosion) ซึ่งเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์หรือสัตว์เข้ามาเกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ที่ดิน ได้แก่ การใช้ที่ดินผิดประเภทไม่ตรงตามศักยภาพของพื้นที่ การไถพรวนและทำลายสิ่งปกคลุมดิน การกระทำเหล่านี้ล้วนทำให้เกิดปัญหาการชะล้างพังทลายของดินทั้งสิ้น (นิพนธ์, 2545)

แนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว กระทำได้โดยกำหนดรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ถูกต้องและเหมาะสม ซึ่งแบบจำลอง (model) ก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกใช้เป็นเครื่องมือ (tool) เพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจในการวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดินในลุ่มน้ำ แบบจำลองที่นิยมนำมาทดลองใช้ในการประมาณผลผลิตตะกอนนั้นมีหลายแบบจำลอง อาทิเช่น USLE, CALSITE, MUSLE, WEPP เป็นต้น สำหรับในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดลองใช้แบบจำลอง KINEmatic Runoff and EROSion model (KINEROS 2 model) ประมาณผลผลิตตะกอน ซึ่งแบบจำลอง KINEROS 2

เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีการแบ่งพื้นที่ออกเป็นหน่วยย่อย (distributed model) ที่ใช้ศึกษาผลผลิตตะกอนในการตกของฝนแต่ละครั้ง (event storm) ผนวกเข้ากับมโนทัศน์ (concept) ในการประมาณผลผลิตตะกอน ด้วยการทดลองใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System; GIS) และ extension AGWA ทำให้แบบจำลองนี้สามารถใช้ประมาณผลผลิตตะกอน ภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินได้ แต่เนื่องจากแบบจำลอง KINEROS 2 ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย ผู้ศึกษาจึงสนใจนำมาทดลองใช้กับพื้นที่ลุ่มน้ำในประเทศไทยที่มีลักษณะสอดคล้องกับพื้นที่ที่แบบจำลองกำหนด

ลุ่มน้ำสาขาแม่สา เป็นพื้นที่ที่มีการศึกษาด้านอุทกวิทยาภายใต้โครงการวิจัยร่วมระหว่างคณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กับภาควิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยฮาวาย ประเทศสหรัฐอเมริกา ทำให้มีข้อมูลเพียงพอและเหมาะสมสำหรับทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 มาประมาณผลผลิตตะกอน ประกอบกับพื้นที่ลุ่มน้ำได้รับผลกระทบอย่างเด่นชัดในเรื่องผลผลิตตะกอน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินจากพื้นที่ป่าเป็นพื้นที่เกษตรกรรมและบางส่วนถูกพัฒนาเป็นแหล่งท่องเที่ยว ประกอบกับการขาดมาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำที่ถูกต้อง จึงทำให้มีปริมาณตะกอนไหลลงสู่แหล่งน้ำมาก ผลของการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดินให้เหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ลุ่มน้ำต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 ประมาณผลผลิตตะกอนในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่
2. เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการใช้แบบจำลอง KINEROS 2 ในการประมาณผลผลิตตะกอนในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่
3. เพื่อทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินตามภาพเหตุการณ์ (scenarios) ที่แตกต่างกันต่อผลผลิตตะกอนในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

การตรวจเอกสาร

1. การชะล้างพังทลายของดิน

การชะล้างพังทลายของดิน (soil erosion) เป็นกระบวนการทำลายการยึดเกาะและเคลื่อนย้ายวัตถุที่เป็นดิน กรวด หิน และทราย จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ด้วยการกระทำของลม น้ำ และแรงโน้มถ่วงของโลก (เกษม, 2539) เช่นเดียวกับนิพนธ์ (2545) ที่กล่าวว่า เป็นกระบวนการที่เกิดจากการที่มีแรง ซึ่งอาจเกิดจากน้ำ ลม หรือแรงโน้มถ่วงของโลก มากระทำให้ดินแตกแยกออกจากกัน แล้วเคลื่อนย้ายอนุภาคของดินที่แตกแยกออกมานั้น ไปตกตะกอนทับถมอีกพื้นที่หนึ่ง ทั้งนี้การที่ดินจะถูกชะล้างพังทลายออกไปได้นั้น แรงดังกล่าวนี้ต้องมากกว่าแรงจับตัวของเม็ดดินเอง จึงจะทำให้ดินแตกกระจายและเคลื่อนย้ายไปได้

การชะล้างพังทลายของดิน แบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ การชะล้างพังทลายของดินโดยธรรมชาติ (natural soil erosion) ซึ่งจากการกระทำของน้ำ ลม แรงโน้มถ่วงของโลก และการชะล้างพังทลายของดินที่มีตัวเร่ง (accelerated soil erosion) ซึ่งเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ที่ดิน ซึ่งในประเทศไทยการชะล้างพังทลายของดินส่วนใหญ่เกิดจากฝน (นิพนธ์, 2545) โดยมีกระบวนการและปัจจัยที่ทำให้เกิดการชะล้างพังทลายของดิน ดังนี้

1.1 กระบวนการชะล้างพังทลายของดิน

กระบวนการชะล้างพังทลายของดิน เริ่มต้นจากเม็ดฝนที่ตกกระทบผิวน้ำดินจากพลังงานของฝนที่ปะทะหน้าดิน ทำให้อนุภาคของดินที่เกาะกันอยู่เกิดการแตกแยกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก อนุภาคเหล่านี้จะกระเด็นไปอุดช่องว่างภายในดิน หรือไปอุดรูดินทำให้น้ำฝนที่ตกลงมาแทรกซึมไปในดินได้ยาก ต่อมาเมื่อฝนตกลงมาอีก น้ำฝนในส่วนที่เกิดจากการแทรกซึมลงไปดินก็จะรวมตัวกันเป็นน้ำไหลบ่าหน้าดินและไหลลงสู่ลำธารหรือที่ต่ำ ซึ่งในขณะที่น้ำไหลบ่าหน้าดินอยู่นั้นจะมีพลังงานที่มากพอสำหรับการพัดพาของอนุภาคของดินแตกกระจายมากขึ้น (เกษมและนิพนธ์, 2525) โดยอาจเคลื่อนที่ไปในลักษณะต่างๆ กัน เช่น กระเด็น กลิ้ง เลื่อน หรือถูกพัดพาไปในสภาพแขวนลอยกับน้ำไหลบ่าไปบนดิน (สมเจตน์, 2522)

Meyer (1975) ได้แบ่งกระบวนการชะล้างพังทลายของดินออกเป็น 4 กระบวนการย่อยด้วยกัน คือ

- 1) การกัดชะผิวหน้าดินด้วยแรงน้ำฝน (detachment by rainfall)
- 2) การเคลื่อนย้ายตะกอนด้วยแรงน้ำฝน (transport by rainfall)
- 3) การกัดชะผิวหน้าดินด้วยแรงน้ำไหลบ่าหน้าดิน (detachment by runoff)
- 4) การเคลื่อนย้ายตะกอนด้วยแรงน้ำไหลบ่าหน้าดิน (transport by runoff)

1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการชะล้างพังทลายของดิน

ปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อการชะล้างพังทลายของดิน ประกอบด้วยลมฟ้าอากาศ สภาพภูมิประเทศ ดิน พืชพรรณ และมนุษย์ (Bever, 1933) ซึ่งนิพนธ์ (2545) สรุปว่าความสำคัญของแต่ละปัจจัยจะมากน้อยอย่างไรขึ้นอยู่กับสภาพของพื้นที่และเหตุการณ์ธรรมชาติที่มนุษย์ทำให้เกิดขึ้น ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

1.2.1 ลมฟ้าอากาศ

โดยฝนเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่มีอิทธิพลต่อการชะล้างพังทลายของดินในบรรดาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวกับลมฟ้าอากาศ ทั้งนี้เพราะแรงตกกระทบของเม็ดฝนอันเป็นพลังงานอันแรกที่ทำให้เกิดการแตกแยกออกจากกัน นอกจากนี้แรงตกกระทบดังกล่าวยังเป็นตัวการต่อเนื่องที่ทำให้เกิดน้ำไหลบ่าหน้าดิน และการเคลื่อนย้ายอนุภาคด้วย (นิพนธ์, 2545)

จากการศึกษาของ Wischmeier and Smith (1958) ได้ตรวจสอบลักษณะฝนหลายลักษณะว่ามีผลต่อการสูญเสียดินมากน้อยเพียงใด แม้ว่าผลที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของดินก็ตาม ลักษณะเด่นชัดมีผลสูงสุดต่อการชะล้างพังทลายดินก็คือ “ผลคูณของพลังงานของฝนที่ตกในครั้งนั้น ๆ กับความหนักเบา 30 นาที สูงสุดที่เกิดขึ้นในฝนครั้งนั้น” เรียกผลคูณนี้เรียกว่า rainfall erosivity index (EI_{30max}) มีผลต่อการชะล้างพังทลายของดินเนื่องจากการตกของฝนครั้งหนึ่งประมาณ 72–90 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นเป็นอิทธิพลของปัจจัยอื่นๆ

1.2.2 สภาพภูมิประเทศ

สภาพภูมิประเทศเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ชี้ได้ว่าดินจะมีการสูญเสียสากลมากน้อยเพียงใด ได้แก่ ความลาดชัน ความยาว และรูปร่างของความลาดชัน ซึ่ง Zingg (1940) และ สมยศ (2521) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างความยาวด้านลาดเทกับความลาดชันที่มีต่อการสูญเสียดินบริเวณโครงการจัดการลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ พบว่า เมื่อความยาวและความลาดชันของความลาดเทเพิ่มขึ้น การสูญเสียดินก็จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากความลาดชันมีอิทธิพลต่อความสามารถในการเคลื่อนย้ายน้ำที่ไหลบ่า

1.2.3 สมบัติของดินทั้งทางกายภาพและชีวภาพ

สมบัติของดินมีอิทธิพลอย่างมากต่อความยากง่ายในการพังทลายของดิน เนื้อดิน โครงสร้างของดิน การให้น้ำซึมผ่านและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน (Bever, 1933; Osborn, 1955; Hudson, 1971) Middleton (1930) ได้กำหนดดัชนีการชะล้างพังทลายของดินโดยใช้สมบัติทางกายภาพของดิน คือ เนื้อดินเป็นตัวชี้วัดให้เห็นถึงความยากง่ายในการแตกแยกของเม็ดดิน โดยเรียกค่านี้ว่า dispersion ratio ซึ่งถ้าค่านี้มากกว่า 10 แสดงว่าดินง่ายต่อการถูกชะล้างพังทลาย

1.2.4 พืชพรรณ

พืชพรรณเป็นปัจจัยที่สำคัญในการป้องกันการชะล้างพังทลายของดิน เพราะพืชช่วยลดพลังงานจลน์จากการตกของฝนและลดพลังงานจลน์ของน้ำไหลบ่าหน้าดิน ในขณะที่เดียวกันยังช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดน้ำของดินอีกด้วย (Bever, 1933) และ Wooldridge (1964) กล่าวว่า สภาพของพืชพรรณและสิ่งปกคลุมดินที่เกี่ยวข้องกับการชะล้างพังทลายของดิน คือ ความหนาแน่นและลักษณะของการปกคลุมของดินที่ต่อเนื่องกันอย่างเพียงพอที่จะลดแรงปะทะจากเม็ดฝนและช่วยให้น้ำไหลบ่าหน้าดินไหลช้าลง

1.2.5 กิจกรรมของมนุษย์

ปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดการชะล้างพังทลายของดิน คือ กิจกรรมของมนุษย์ สภาพการขาดแคลนที่ทำกิน และอัตราการเพิ่มขึ้นของประชากร ก่อให้เกิดปัญหาการบุกรุกทำลายป่าเพื่อทำไร่เลื่อนลอย ซึ่งเป็นสาเหตุของการชะล้างพังทลายของดินอย่างรุนแรง โดยเฉพาะ

ในประเทศที่กำลังพัฒนา การพัฒนาเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร การนำเครื่องทุ่นแรงมาใช้ไถและระบบไถพรวนขึ้นลงตามความลาดเท เป็นตัวเร่งให้เกิดการไหลบ่าของน้ำอย่างรุนแรงและรวดเร็วยิ่งขึ้น (วัฒนชัย, 2528)

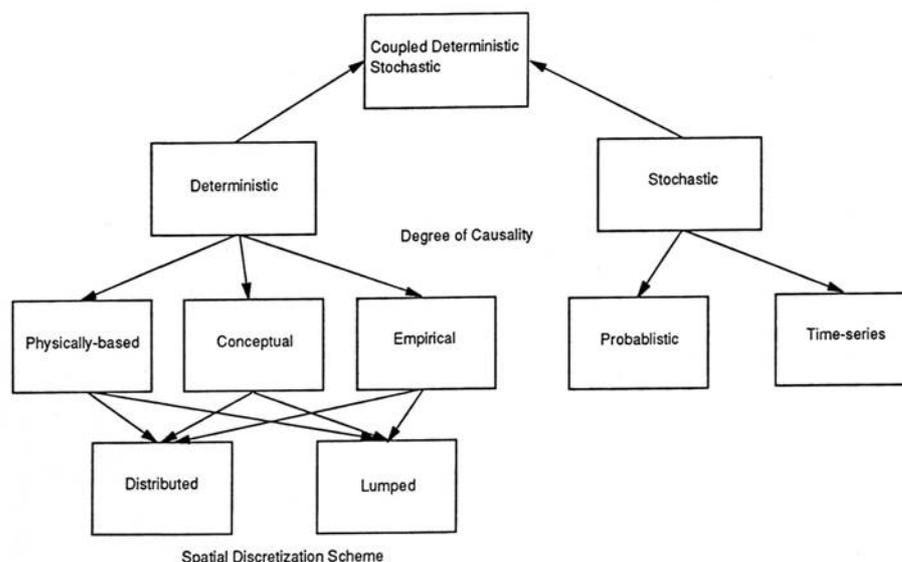
2. แบบจำลอง

2.1 ความหมายของแบบจำลอง

แบบจำลองเป็นสิ่งที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาแทนของจริง (Jorgensen, 1988) แบบจำลองจึงทำหน้าที่อธิบายถึงลักษณะของวัตถุ เหตุการณ์ กระบวนการ หรือระบบมากกว่าที่จะใช้บรรยายว่าสิ่งเหล่านั้นเป็นอย่างไร หรือเกิดขึ้นได้อย่างไร แบบจำลองจึงมักถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้หรือทำให้มองเห็นว่า ถ้าหากสิ่งนั้นหรือระบบถูกเปลี่ยนแปลงไปทางใดทางหนึ่งหรือหลายทางจะมีผลกระทบต่อองค์ประกอบอื่นๆ ของสิ่งนั้น และ/หรือ ระบบนั้น ๆ อย่างไร (นิพนธ์, 2549)

2.2 ชนิดของแบบจำลอง

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีหลายรูปแบบ เพื่อความสะดวกจึงได้มีแบ่งแบบจำลองตามประเภทของการจำลองแบบโดยใช้ระบบการจำแนกของ Becker and Serban (1990) ดังภาพที่ 1 อธิบายโดยซัชชัย (2543) ดังนี้



ภาพที่ 1 ประเภทของแบบจำลองตามระบบการจำแนกของ Becker and Serban

ที่มา: Bradbury *et al.* (1993)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องด้านอุทกวิทยาแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ แบบจำลองที่ให้คำตอบตายตัว (deterministic model) และแบบจำลองที่ให้คำตอบไม่ตายตัว (stochastic model) ซึ่งต่างกันตรงที่แบบจำลองแบบแรกให้ผลลัพธ์ที่ชี้ชัดไปในลักษณะที่แน่นอนว่ามีค่าเป็นเท่าใด ในขณะที่แบบจำลองแบบที่สองให้ผลลัพธ์ในลักษณะที่ไม่แน่นอนหรืออาจแสดงผลในรูปของความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ (probabilistic) หรือในรูปของอนุกรมเวลา (time series) รายละเอียดแบบจำลองแต่ละชนิดมีดังนี้

2.2.1 deterministic model

คือแบบจำลองที่ให้คำตอบตายตัว เพราะถูกกำหนดให้เป็นไปตามขั้นตอนของกระบวนการ (process) และสามารถเขียนออกมาในรูปของสมการคณิตศาสตร์ (mathematical) ได้ แบ่งย่อยแบบจำลองเป็นอีก 3 ชนิด คือ

1) empirical model หรือแบบจำลองกล่องดำ (black-box model) เป็นแบบจำลองในยุคแรกๆ เป็นแบบจำลองที่ให้คำตอบโดยไม่สนใจตัวกำหนด (regulator) ที่ทำให้เกิดผลนั้นว่ามีกระบวนการทำให้เกิดอย่างไร จึงเป็นการใช้ปัจจัยเข้า (input) เช่น นำปริมาณน้ำฝนที่

ตรวจวัดได้จริงในภาคสนาม (observed data) มาเป็นตัวหาค่าคงที่ (empirical constant) แล้วจึงแปลงค่าปัจจัยเข้าให้เป็นปัจจัยส่งออก (output)

2) conceptual model หรือแบบจำลองมโนทัศน์ เป็นแบบจำลองที่ผู้พัฒนา กำหนดแนวคิดในการพัฒนาโดยอาศัยความเป็นไปได้ในทุกขั้นตอนของกลไกต่างๆ ที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการย่อยๆ และพิจารณาปฏิสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการย่อยๆ นั้นไปพร้อมกัน อย่างเป็นระบบ และมีระเบียบในการเชื่อมโยงแบบจำลองย่อยๆ ให้มีลำดับขั้นตอนการคำนวณที่เลียนแบบธรรมชาติให้มากที่สุด

3) physically-based model เป็นแบบจำลองที่จำลองกระบวนการย่อยๆ ที่เกี่ยวข้องกัน โดยอาศัยทฤษฎีทางวิทยาศาสตร์และแทนกระบวนการด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์

การจำแนกแบบจำลองเป็นประเภทต่างๆ ทั้ง 3 แบบดังกล่าว ยังสามารถแยกได้อีก 2 กลุ่ม ตามลักษณะของการพิจารณาขอบเขตของพื้นที่ในการจำลองแบบคือ

1) lumped model หรือแบบจำลองโดยคิดเหมารวมเอาพื้นที่ลุ่มน้ำทั้งลุ่ม โดยพิจารณาพื้นที่ในลักษณะของพื้นที่ 1 หน่วย (single unit) และการคำนวณอื่นๆ ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ และนำค่าภายในพื้นที่ที่เป็นค่าเฉลี่ยมาใช้งาน เช่น การกำหนดให้ฝนตก มีปริมาณเท่ากันทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำ เป็นต้น

2) distributed model หรือแบบจำลองที่มีการแบ่งพื้นที่ออกเป็นหน่วยย่อยเพื่อทำให้แต่ละหน่วยพื้นที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity) มากที่สุด โดยให้แต่ละหน่วยมีอัตราพฤติกรรมของแต่ละกระบวนการ เช่น ปริมาณการตกของฝน การเกิดการชะล้างพังทลายดินแตกต่างกันไปตามลักษณะของแต่ละหน่วยพื้นที่ แล้วเชื่อมโยงผลที่ได้จากแต่ละหน่วยเข้าหากันอย่างเป็นระบบ

2.2.2 stochastic model

คือแบบจำลองที่กำหนดขึ้นบนสมมติฐานที่ว่าผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นจากเหตุการณ์ต่างๆ ไม่มีความแน่นอน (uncertain) และแบบจำลองนี้มีโครงสร้างเลียนแบบเหตุการณ์ที่ไม่แน่นอนนี้ แนวคิดในเชิง stochastic นี้มีน้อยมาก และยังแบ่งย่อยออกเป็น 2 ชนิด คือ

- 1) probabilistic model หรือแบบจำลองความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์ โดยอาศัยหลักเชิงสถิติแทนกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้น
- 2) time – series model หรือแบบจำลองอนุกรมเวลา โดยใช้ตัวแบบในการพยากรณ์เชิงปริมาณที่อาศัยข้อมูลในอดีต เพื่อนำมาคาดการณ์สิ่งที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

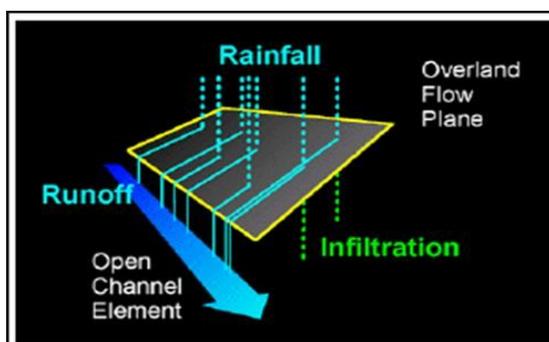
3. แบบจำลอง KINEROS 2

3.1 ส่วนประกอบของแบบจำลอง

แบบจำลอง KINEROS 2 เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากแบบจำลอง KINEROS (Woolhiser *et al.*, 1990) มีชื่อเต็มว่า **KIN**ematic **R**unoff and **EROS**ion ซึ่งได้รับการพัฒนาโดย USDA–ARS Southwest Watershed Research Center ร่วมกับ U.S. EPA Landscape Ecology Branch และได้จัดให้มีรูปแบบการใช้งานใหม่จากการใช้โปรแกรมภาษา FORTRAN เดิมมาเป็นการใช้ extension AGWA ใน ArcView 3.3 แทน เป็นแบบจำลองประเภท Physically–based model ในกลุ่มย่อย distributed model เหมาะกับใช้ศึกษาผลผลิตตะกอนและปริมาณน้ำท่าในการตกของฝนแต่ละครั้ง (event storm) อธิบายถึงกระบวนการน้ำพืชยึด (interception) การแทรกซึมน้ำผ่านผิวดิน (infiltration) น้ำไหลบ่าหน้าดิน (surface runoff) และการชะล้างพังทลายดิน (soil erosion) ในพื้นที่ลุ่มน้ำเกษตรกรรมหรือลุ่มน้ำเมืองที่เป็นลุ่มน้ำขนาดเล็ก ขนาดไม่เกิน 100 ตารางกิโลเมตร (USDA, 2007)

แบบจำลอง KINEROS 2 ใช้จำลองพื้นที่ลุ่มน้ำ เพื่อให้เห็นถึงระบบการไหลของน้ำบนพื้นดินและในลำธาร แล้วแก้ปัญหาโดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ (partial differential) อธิบายถึงการไหลของน้ำผ่านผิวดิน (overland flow) การไหลของน้ำในลำธาร (channel flow) การชะล้างพังทลายดิน และการเคลื่อนย้ายของตะกอน (sediment transport) โดยอาศัยเทคนิคความแตกต่างกัน

ของแต่ละพื้นที่ (finite – difference techniques) ซึ่งความผันแปรเชิงพื้นที่ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน การแทรกซึมน้ำผ่านผิวดิน และการชะล้างพังทลายดิน (ภาพที่ 2) ซึ่งส่วนประกอบของแบบจำลองประกอบด้วย 6 ส่วนหลัก คือ



ภาพที่ 2 มโนทัศน์การทำงานของแบบจำลอง KINEROS 2

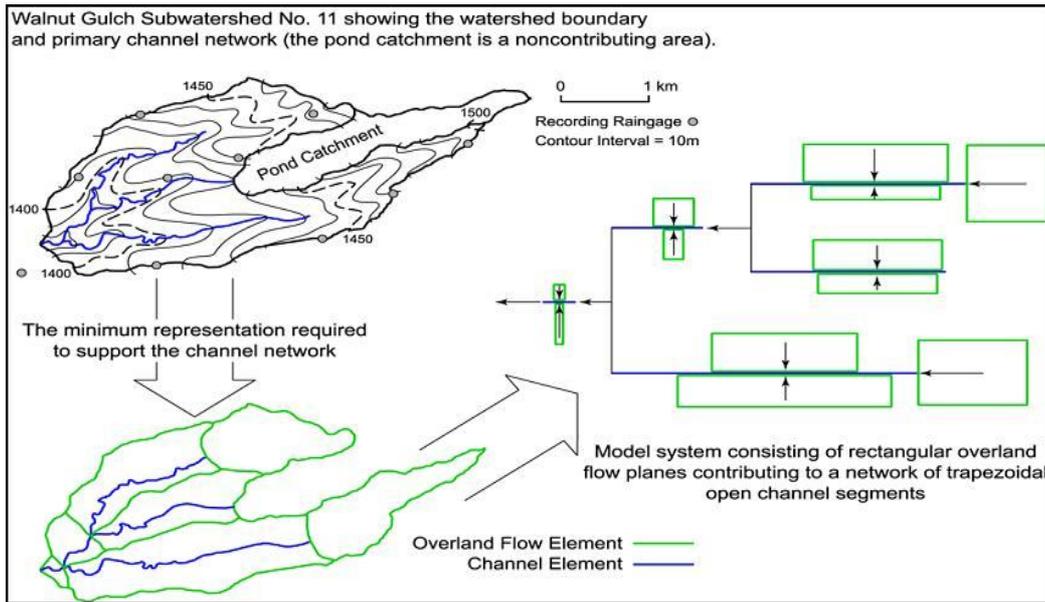
ที่มา: USDA (2007)

1) ส่วนน้ำไหลผ่านผิวดิน (overland flow element)

โดยทฤษฎีแล้ว จะเป็นส่วนควบคุมพื้นที่ย่อยมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมเช่นเดียวกับตัวแปรนำเข้า (parameter input) แต่ในบางพื้นที่ที่มีความแตกต่างกัน เช่น มีความลาดชันแตกต่างกันมากๆ อาทิเช่น น้ำตก อาจทำให้ส่วนนี้มีรูปแบบต่างออกไป (ภาพที่ 3)

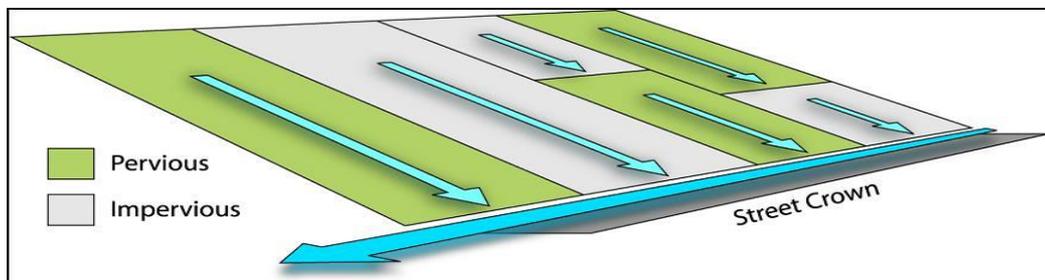
2) ส่วนเมือง (urban element)

ส่วนนี้ประกอบขึ้นจากส่วนน้ำไหลผ่านผิวดิน 6 ส่วน ที่มีความผันแปรของส่วนที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ (pervious) และน้ำซึมผ่านไม่ได้ (impervious) จนถึงถนนสายหลัก แบบจำลองจะถูกใช้เพื่ออธิบายลักษณะของหลังคา ถนน สนามหญ้า ทางเดินเท้า เป็นต้น โดยจะได้รับปริมาณน้ำเข้า (inflow) จากพื้นที่ตอนบน (upstream) จนถึงถนน แต่อาจไม่ได้รับน้ำทางด้านข้างจากส่วนน้ำไหลผ่านผิวดินที่ติดกันก็ได้ สัดส่วนความสัมพัทธ์ของทั้ง 6 ส่วนน้ำไหลผ่านผิวดินเป็นลักษณะเฉพาะของทั้งพื้นที่ ซึ่งอาจไม่จำเป็นต้องมีครบทุก 6 ส่วนน้ำไหลผ่านผิวดินก็ได้ แต่ต้องเป็นตัวแทนที่ตอบสนองลักษณะเฉพาะของพื้นที่นั้นๆ (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 3 ตัวอย่างส่วนน้ำไหลผ่านผิวดิน (overland flow element) และส่วนลำธาร (channel element) ของลุ่มน้ำย่อย Walnut Gulch

ที่มา: Goodrich *et al.* (2002)

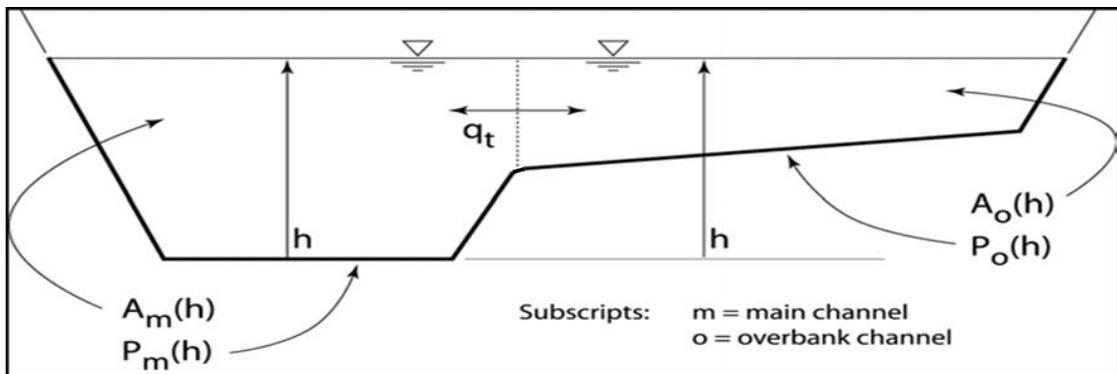


ภาพที่ 4 ส่วนน้ำไหลผ่านผิวดิน (overland flow element) ทั้ง 6 ส่วนที่ประกอบเป็นส่วนเมือง (urban element)

ที่มา: Goodrich *et al.* (2002)

3) ส่วนลำธาร (channel element)

ภาพตัดขวาง (cross section) ของส่วนนี้จะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูแบบจำลองกำหนดให้การไหลของน้ำใต้ดิน (base flow) มีค่าคงที่เท่ากับอัตราการน้ำไหลเข้าพื้นที่ แสดงได้ดังรูปเรขาคณิตภาพตัดด้านขวางลำธาร (ภาพที่ 5) ซึ่งแทนลักษณะการไหลของน้ำและการแทรกซึมน้ำผ่านผิวดิน โดยที่ A คือ พื้นที่ของการไหล P คือ ความยาวตามรอยเปียกของน้ำของเส้นรอบรูปพื้นที่ (wetted perimeter) โดยไม่รวมด้านที่ใช้ร่วมกัน h คือ ความลึกของระดับน้ำ ส่วนอัตราการเคลื่อนย้ายตะกอน (q_t) อาศัยหลักสมมูลมวลในการคำนวณที่ระดับความลึก (h) ในเวลาถัดไป



ภาพที่ 5 รูปเรขาคณิตภาพตัดขวาง (cross section) ของส่วนลำธาร (channel element)

ที่มา: Goodrich *et al.* (2002)

4) ส่วนน้ำขังผิวดิน (pond element)

บางส่วนของพื้นที่ลุ่มน้ำอาจมีส่วนที่เป็นน้ำขังผิวดินอยู่ในส่วนนี้รวมถึงน้ำขังหน้าผิวดิน ทางน้ำที่สร้างขึ้น หรือห้วย หนอง คลอง บึง หากกำหนดให้ปริมาณน้ำไหลออก (outflow) ขึ้นอยู่กับฟังก์ชันระดับความลึกของน้ำอย่างเดียว ดังนั้น ไดนามิกของการกักเก็บน้ำสามารถอธิบายได้จากกฎทรงมวล ดังสมการที่ 1

$$\frac{dV}{dt} = q_I - q_O - A_p f_c \quad (1)$$

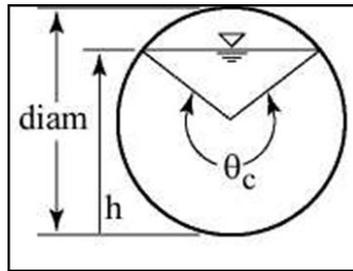
เมื่อ $V = V(h_r)$ ปริมาตรที่กักเก็บน้ำไว้ (I^3)
 $q_I =$ อัตราน้ำไหลเข้า (I^3/T)
 $q_O =$ อัตราน้ำไหลออก (I^3/T)
 $A_p =$ พื้นที่ผิวหน้าข้างหน้าดิน (I^2)
 $f_c =$ อัตราสูญเสียการซึมผ่านผิวดินของน้ำข้างหน้าดิน (I/T)

5) ส่วนน้ำในท่อระบายน้ำ (culvert element)

เขตพื้นที่เมืองจะมีส่วนน้ำในท่อระบายน้ำรวมอยู่ด้วย ในส่วนนี้แบบจำลองกำหนดให้ไม่มีน้ำในห้วย หนอง คลอง บึงเลย แต่กำหนดว่าการไหลน้ำบนผิวดินมาจากท่อแทน ซึ่งเกิดขึ้นตลอดเวลาโดยไม่มีแรงดันและไม่มีน้ำไหลเข้าทางด้านข้าง (ภาพที่ 6) ความสัมพันธ์โดยทั่วไปของปริมาณน้ำท่าและการไหลของน้ำในท่อ อธิบายได้จากสมการ Darcy-Weisbach (De Never, 1970) ดังสมการที่ 2

$$Q = \frac{\alpha A^m}{P^{m-1}} \quad (2)$$

เมื่อ $Q =$ ปริมาณน้ำในท่อต่อหน่วยความกว้าง
 $\alpha = [8gs / f_D]^{1/2}$
 $f_D =$ ปัจจัยความเสียดทานของ Darcy - Weisbach
 $S =$ ความชันของท่อ
 $g =$ แรงดึงดูดของโลก มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที
 $A =$ ขนาดพื้นที่ภาพตัดด้านขวางของท่อ
 $m = 3/2$
 $p =$ ขนาดความยาวเส้นของรอยเป็ยกรอบวงของท่อ



ภาพที่ 6 รูปเรขาคณิตเพียงบางส่วนของส่วนน้ำในท่อระบายน้ำ (culvert element)

ที่มา: Woolhiser *et al.* (1990)

6) ส่วนเชื่อมต่อ (injection element)

ส่วนนี้มีไว้เพื่อนำน้ำและตะกอนจากแหล่งกำเนิดมายังลำธาร มากกว่าเป็นส่วนที่ได้รับน้ำฝน น้ำท่าหรือน้ำไหลใต้ดิน ตัวอย่างของแหล่งกำเนิด เช่น บ่อบำบัดน้ำเสีย แหล่งอุตสาหกรรมหรือแหล่งเกษตรกรรม ข้อมูลที่ใช้จะอยู่ในรูป text files แสดงเวลาเป็นนาทิจ (min) และปริมาณน้ำท่าเป็นลูกบาศก์เมตร (m^3) โดยมีคอลัมน์มากกว่า 5 คอลัมน์ ซึ่งแบ่งตามขนาดอนุภาคตะกอน เพื่อใช้พิจารณาความเข้มข้นตะกอน

3.2 กระบวนการทางอุทกวิทยาในแบบจำลอง KINEROS 2

ขั้นตอนของกระบวนการจำลองลักษณะทางอุทกวิทยาเริ่มต้น โดยมีการกำหนดปริมาณฝนที่ตกลงสู่พื้นดินจะถูกพืชเก็บกักไว้บางส่วนที่เหลือจะไหลลงสู่ผิวดินแล้วมีส่วนหนึ่งไหลซึมลงสู่ชั้นดินหรือบางส่วนยังคงอยู่ตามผิวดิน แล้วรวมตัวกัน ไหลลงสู่ที่ต่ำกว่า จนกระทั่งไปอยู่ในแม่น้ำ ลำน้ำ กลายเป็นน้ำท่าในลำน้ำ สำหรับปริมาณน้ำที่เก็บกักในชั้นดินเมื่อเวลาผ่านไปจะมีการสูญเสียเนื่องจากการคายระเหยของพืช และส่วนหนึ่งจะไหลไปยังชั้นน้ำใต้ดิน กลายเป็นน้ำใต้ดิน ซึ่งจะไหลกลับเข้าสู่แม่น้ำเช่นกัน แต่จะมีความเร็วในการไหลช้ากว่ามาก ซึ่งรายละเอียดของกระบวนการดังกล่าวอธิบายได้ดังนี้

3.2.1 กระบวนการตกของฝน (rainfall)

กระบวนการตกของฝนเป็นกระบวนการทางอุทกวิทยาหนึ่งที่สามารถทำได้ว่าเป็นปัจจัยนำเข้าในแบบจำลอง KINEROS 2 โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนหน่วยเป็นความสูง (มิลลิเมตร) ซึ่งทำการเก็บรวบรวมจากสถานีวัดน้ำฝนที่ครอบคลุมแต่ละส่วนของลุ่มน้ำโดยใช้เทคนิคแทรกค่าเชิงพื้นที่ (interpolation) โดยวิธี Thiessen polygon แล้วใส่เข้าไปในแบบจำลอง กรณีที่มีสถานีวัดน้ำฝนครอบคลุมหลายแห่ง

3.2.2 กระบวนการน้ำพืชยึด (interception)

กระบวนการน้ำพืชยึดเป็นกระบวนการทางอุทกวิทยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการตกของฝน (rainfall) โดยเป็นการสะสมน้ำฝนไว้บนเรือนยอดพืช ปริมาณน้ำพืชยึดถูกควบคุมด้วย 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ปัจจัยแรก คือ ระดับของน้ำที่พืชยึดไว้ได้ ซึ่งสามารถสะท้อนให้เห็นถึงระดับของน้ำฝนที่ตกลงมา ขึ้นอยู่กับปัจจัยชนิดของพืชด้วย และปัจจัยที่สอง คือ ร้อยละการปกคลุมเรือนยอดพืช

3.2.3 กระบวนการแทรกซึมน้ำผ่านผิวดิน (infiltration)

แบบจำลอง KINEROS 2 ได้จำลองลักษณะอุทกวิทยาดินว่าชั้นดินจะมีหนึ่งหรือสองชั้นก็ได้ โดยแสดงถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างการไหลของน้ำผิวดินและการแทรกซึมน้ำผ่านผิวดิน ทั้งนี้ น้ำที่ซึมผ่านผิวดินอาจมาจากฝนที่ตกลงสู่ดินโดยตรงหรือมาจากน้ำที่ขังบนผิวดินจากปริมาณน้ำฝนส่วนเกิน (rainfall excess) จากฝนตกครั้งก่อนก็ได้ ความสามารถในการซึมน้ำของดิน (f_c) ขึ้นอยู่กับอัตราการตกของฝน (r) ณ เวลาใด ๆ พารามิเตอร์ที่ต้องการสำหรับแบบจำลอง KINEROS 2 ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินอิ่มตัว (saturated hydraulic conductivity; K_s) แรงดึงดูดของดิน (integral capillary drive; G) และความพรุนของดิน (soil porosity; Φ) ความสามารถในการซึมน้ำของดินอธิบายได้ตามสมการของ Parlange *et al.* (1982) ดังสมการที่ 3

$$f_c = K_s \left(1 + \frac{\alpha}{\exp(\alpha I / B) - 1} \right) \quad (3)$$

- เมื่อ f_c = ความสามารถในการซึมน้ำของดิน
 K_s = ค่าสัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินอิ่มตัว
 α = พารามิเตอร์แสดงชนิดของดินแต่ละประเภท มีค่าประมาณ 0.85
 I = ความสูงของน้ำที่ซึมลงดิน
 $B = (G + h_w)(\theta_s - \theta_i)$
 G = แรงดึงดูดของดิน (ตารางผนวกที่ 1)
 θ_s = ปริมาณน้ำสูงสุดที่เก็บกักได้
 θ_i = ปริมาณน้ำสูงสุดที่เก็บกักได้ ณ เวลาใดๆ
 h_w = ระดับความสูงของน้ำเหนือผิวดิน

กำหนดให้ h_w มีค่าเท่ากับ 0

$$I^* = \frac{I}{G\Delta\theta} \quad (4)$$

เมื่อ $\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$

ซึ่งค่าแรงดึงดูดของดิน (G) หาได้จาก

$$G = \Psi_B \frac{2 + 3\lambda}{1 + 3\lambda} \quad (5)$$

เมื่อ Ψ_B = soil capillary head

λ = ขนาดของช่องว่างในดิน

เมื่อนำสมการที่ (4) มาแทนในสมการที่ (3) ได้ดังนี้

$$f_{c*} = \frac{\alpha}{\exp(\alpha I^*) - 1} \quad (6)$$

การประมาณอัตราการซึมน้ำของดินสำหรับดินชั้นเดียว (uniform soil) เมื่อความสูงของน้ำที่ซึมนลงดิน (I) เพิ่มขึ้นจนเกินความสามารถในการซึมน้ำของดินที่รับได้ (f_c) จะเกิดน้ำขังหน้าดิน (ponding) ดังที่ได้อธิบายไว้ในสมการที่ 1 ซึ่งจะถูกนำมาคาดคะเนหาปริมาณน้ำซึมนผ่านผิวดิน ณ เวลาใดๆ และปริมาณน้ำฝนส่วนเกิน

ส่วนการประมาณอัตราการซึมน้ำของดินสำหรับดินสองชั้น (two – layer soil profile) ขึ้นอยู่กับลักษณะกายภาพของดิน ความหนาของชั้นดิน และอัตราการตกของฝน โดยแบ่งชั้นดินออกเป็น 2 ชั้นดังนี้

(1) ดินชั้นบน (upper soil control) สามารถประมาณอัตราการซึมน้ำของดินในลักษณะคล้ายกับดินมีชั้นเดียว (uniform soil) ดังที่ได้อธิบายไว้ในสมการที่ 1 เกิดเมื่ออัตราการตกของฝน (r) มากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินอิมตัว (K_s)

(2) ดินชั้นล่าง (lower soil control) อัตราการซึมน้ำของดินในชั้นนี้เกิดเมื่อดินชั้นบนอิมตัวแล้ว กล่าวคือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินอิมตัวของดินชั้นบน (K_{s1}) มากกว่าอัตราการตกของฝน (r) มากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินอิมตัว (K_{s2}) ดังที่ได้อธิบายไว้ในสมการที่ 3 ส่วนน้ำที่ไม่ได้ลงสู่ดินชั้นล่างแต่ถูกกักเก็บไว้จนเต็มช่องว่างในดิน (pore space) ของดินชั้นบนส่งผลให้เกิดเป็นน้ำไหลบ่าหน้าดินขึ้น

อย่างไรก็ดี ในช่วงที่ฝนตกไม่นานอาจทำให้ดินแห้ง มีผลทำให้อัตราการซึมน้ำผ่านผิวดินกลับมามีค่าเท่ากับอัตราการซึมน้ำเริ่มต้นได้ (recovery) กระบวนการนี้เรียกว่า “soil water redistribution” (Smith *et al.*, 1993) สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 7

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\Delta\theta_{i0}}{I} \left[r - K_i - \left[K(\theta_0) + \frac{\beta\rho K_s \Delta\theta_{i0} G(\theta_i, \theta_0)}{I} \right] \right] \quad (7)$$

เมื่อ $\Delta\theta_{i0} = \theta_0 - \theta_i$

θ_0 = ปริมาณน้ำสูงสุดที่เก็บกักได้ ณ เวลาใดๆ

θ_i = ปริมาณน้ำสูงสุดที่เก็บกักเริ่มต้นก่อนเกิดกระบวนการ soil water redistribution

r = อัตราการซึมผ่านผิวดิน

K_i = ค่าสัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินอิ่มตัวของดิน ณ เวลาใดๆ

$K(\theta_0)$ = ค่าสัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินอิ่มตัวของดิน เมื่อมีปริมาณน้ำสูงสุดที่เก็บกักได้ ณ เวลาใดๆ

β = ปัจจัยด้านรูปร่าง

ρ = ปัจจัยด้านความลึก

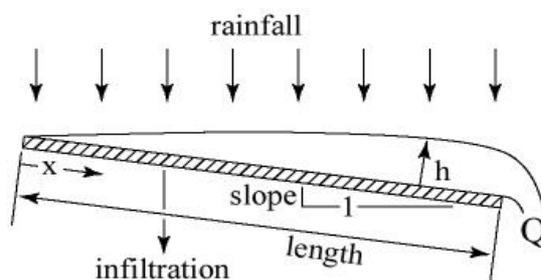
K_s = ค่าสัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินอิ่มตัวของดิน

I = ความสูงของน้ำที่ซึมลงดิน

$G(\theta_i, \theta_0)$ = แรงขับเคลื่อนของการหดบนผิวน้ำดิน

3.2.4 กระบวนการน้ำไหลผ่านผิวดิน (overland flow)

กระบวนการน้ำไหลผ่านผิวดินในแบบจำลอง KINEROS 2 จำลองการไหลของน้ำผ่านผิวดินเป็นแบบ hortanian flow คือ ปริมาณน้ำฝนที่ตกมากกว่าปริมาณน้ำที่ซึมผ่านผิวดิน ($r(t) > K_s$) โดยไม่คิดค่าเฉลี่ยของน้ำไหลด้านข้าง (interflow) น้ำไหลใต้ผิวดิน (subsurface flow) และน้ำไหลใต้ดิน (groundwater flow) ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กระบวนการน้ำไหลผ่านผิวดิน (overland flow)

ที่มา: USDA (2007)

ส่วนน้ำที่ปรากฏอยู่บนผิวดินเรียกว่า น้ำขังผิวดิน (ponding) ซึ่งเป็นส่วนเพิ่มปริมาณน้ำไหลบ่าผิวดิน (runoff) ที่มีทิศทางการไหลตามความลาดชัน สำหรับกลไกการเกิดของน้ำขังผิวดินนั้นเกิดจาก 2 กลไกหลัก อธิบายได้ว่า กลไกแรก เกิดขึ้นเมื่ออัตราการตกของฝนเกินความสามารถในการซึมน้ำของผิวดิน หลังจากนั้นจะเกิดกลไกถัดไป คือน้ำจะไหลไปยังดินชั้นล่างและเก็บน้ำไว้จนเต็มรูพรุนดิน น้ำส่วนเกินจะกลายเป็นน้ำขังผิวดินต่อไป

พื้นที่ขนาดเล็กกระบวนการไหลผ่านผิวดินสามารถแสดงการไหลได้สูงสุดถึง 3 มิติ (three-dimensional process) ส่วนในพื้นที่ขนาดใหญ่สามารถแสดงการไหลของน้ำเป็นแบบ 1 มิติ (one-dimensional process) ซึ่งการไหลเกี่ยวข้องกับพื้นที่ที่ใช้กักเก็บ อธิบายโดยสมการ De Saint Venant equations ซึ่งเป็นสมการยกกำลังง่ายๆ (Woolhiser and Liggett, 1967; Morris and Woolhiser, 1980) ดังสมการที่ 8 และเมื่อกระบวนการน้ำไหลผ่านผิวดินอย่างต่อเนื่อง สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 9

$$Q = ah^m \quad (8)$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำต่อหน่วยความกว้าง

h = ปริมาณน้ำต่อหน่วยพื้นที่

α, m = ค่าพารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับความลาดชัน ความขรุขระของผิวดิน และ flow regime

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x, t) \quad (9)$$

เมื่อ t = เวลา

x = ระยะทางตามแนวความลาดชัน

q = อัตราน้ำไหลเข้าทางด้านข้าง

เมื่อนำสมการที่ (8) มาแทนในสมการที่ (9) ได้ดังนี้

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x, t) \quad (10)$$

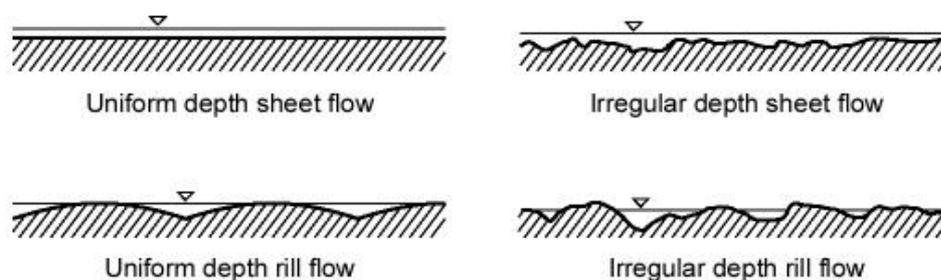
ซึ่งค่าพารามิเตอร์ α และ m หาได้จากสมการ Manning equation ดังนี้

$$\alpha = \frac{1.49 S^{1/2}}{\eta} \quad (11)$$

เมื่อ S = ระดับความลาดชันของพื้นที่ (หน่วยเป็นอัตราส่วน)

η = ค่าคงที่แสดงความต้านทานการไหลของน้ำของสิ่งที่อยู่บนดิน (roughness coefficient) (ตารางผนวกที่ 2)

อย่างไรก็ดี การลดลงของปริมาณน้ำไหลผ่านผิวดินยังขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศเช่นกัน กล่าวคือ พื้นที่ที่มีส่วนพื้นดินมากย่อมมีโอกาสให้เกิดการสูญเสียผ่านกระบวนการซึมผ่านผิวดินมากตามไปด้วย ส่งผลให้ปริมาณน้ำไหลผ่านผิวดินลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนแสดงให้เห็นในกราฟน้ำไหล (hydrograph) ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เอง แบบจำลอง KINEROS 2 จึงกำหนดให้พื้นที่ระหว่างส่วนมีความแตกต่างของระดับความสูงมากที่สุดและปกคลุมไปด้วยน้ำบนผิวดิน (ภาพที่ 8)



ภาพที่ 8 ลักษณะของน้ำไหลผ่านผิวดิน (overland flow) เมื่อพิจารณาตามลักษณะภูมิประเทศ

ที่มา: Wilgoose and Kuczera (1995)

3.2.5 กระบวนการน้ำไหลในลำธาร (channel flow)

การไหลแบบไม่คงตัว (unsteady flow) ในแบบจำลอง KINEROS 2 ได้ใช้สมการพลังงานจลน์อธิบายกระบวนการ กล่าวคือ ในส่วนน้ำไหลในลำธารมีบางเวลาที่จะได้รับน้ำไหลด้านข้างเข้ามาในลำธารจากพื้นที่ตอนบน ส่งผลให้การพิจารณากระบวนการน้ำไหลในลำธารไม่สามารถคิดโดยตรงได้ ดังนั้น ปริมาณน้ำในลำธารที่พื้นที่ใช้กักเก็บ อธิบายได้ดังสมการที่ 12 และเมื่อกระบวนการน้ำไหลในลำธารอย่างต่อเนื่องที่คิดน้ำไหลด้านข้างเข้ามาเกี่ยวข้องสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 13

$$Q = \alpha R^{m-1} A \quad (12)$$

เมื่อ Q = ปริมาณน้ำต่อหน่วยความกว้าง

R = รัศมีชลศาสตร์

A = ขนาดพื้นที่ภาพตัดขวางของลำธาร

α, m = ค่าพารามิเตอร์ขึ้นอยู่กับความลาดชัน ความขรุขระของผิวดิน และ flow regime

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_c(x, t) \quad (13)$$

เมื่อ A = ขนาดพื้นที่ภาพตัดขวางของลำธาร

Q = ปริมาณน้ำต่อหน่วยความกว้าง

$q_c(x, t)$ = ปริมาณน้ำไหลเข้าทางด้านข้างต่อหน่วยความยาว

t = เวลา

x = ระยะทางตามแนวความลาดชัน

เมื่อนำสมการที่ (12) มาแทนในสมการที่ (13) ได้ดังนี้

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha R^{m-1} A \frac{\partial h}{\partial x} = q_c(x, t) \quad (14)$$

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ α และ m หาได้จากสมการ Manning equation ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในสมการที่ 11 และเป็นที่น่าสนใจกว่าสมการของกระบวนการน้ำไหลผ่านผิวดิน (overland flow) และกระบวนการน้ำไหลในลำธาร (channel flow) จะมีรูปแบบของสมการคล้ายกัน แต่ต่างกันที่สมการของกระบวนการน้ำไหลผ่านผิวดินจะแทนที่ A ด้วย h และพิจารณารูปทรงเรขาคณิตด้วย

3.2.6 กระบวนการชะล้างพังทลายของดิน (soil erosion) และการเกิดตะกอน (sedimentation)

แบบจำลอง KINEROS 2 สามารถประมาณค่าการกร่อนดินโดยการเคลื่อนที่ของน้ำบนผิวน้ำดิน ซึ่งเป็นตะกอนที่เกิดจากพลังงานของฝนและตะกอนที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของน้ำ ในพื้นที่ดอน (upland) สมการที่ใช้อธิบายไดนามิกของตะกอน ณ จุดนั้นๆ อธิบายโดยกฎทรงมวล (Bennett, 1974) ดังสมการที่ 15

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} + e(x, t) = q_s(x, t) \quad (15)$$

- เมื่อ C_s = ความเข้มข้นตะกอน (l^3/l^3)
 Q = อัตราการไหลของน้ำท่า (l^3/T)
 A = ขนาดพื้นที่ภาพตัดขวางของการไหล (l^2)
 e = อัตราการชะล้างพังทลายจากผิวหน้าดินในลุ่มน้ำ
 (soil bed erosion rate) (l^2/T)
 q_s = อัตราการไหลของตะกอนที่ไหลเข้าด้านข้างของลำธาร (l^3/T)

สำหรับพื้นที่ดอน e คือ อัตราการชะล้างพังทลายสุทธิ (net erosion) ซึ่งประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ การกัดชะโดยฝนบนพื้นที่ว่างเปล่า และการกัดชะโดยน้ำของตะกอนที่ทับถมอยู่ ขึ้นอยู่กับปฏิกริยาร่วมกันระหว่างแรงเฉือนของน้ำและแรงดึงดูดของโลก อธิบายได้ดังสมการที่ 16

$$e = e_s + e_h \quad (16)$$

- เมื่อ e_s = อัตราการกัดชะโดยฝน (l^2/T)
 e_h = อัตราการกัดชะโดยน้ำไหลบ่าหน้าดิน (l^2/T)

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ e_s อธิบายได้ดังสมการที่ 17

$$\begin{aligned} e_s &= c_f k(h) r^2 \quad ; q > 0 \\ &= 0 \quad ; q < 0 \end{aligned} \quad (17)$$

- เมื่อ c_f = ค่าคงที่ที่เกี่ยวกับดินและสมบัติของพื้นผิว
 $k(h)$ = ปัจจัยการลดลงของการกัดชะโดยฝนเมื่อระดับความลึกของน้ำเพิ่มขึ้น มีค่าระหว่าง 0-1
 r = อัตราการตกของฝน (L^3/T)

และค่าพารามิเตอร์ e_h อธิบายได้ดังสมการที่ 18

$$e_h = c_g (c_m - c_s)A \quad (18)$$

- เมื่อ c_g = ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการเคลื่อนย้ายตะกอน (T^{-1})
 c_m = ความเข้มข้นตะกอน ณ จุดสมมูลของสมรรถนะการเคลื่อนย้าย
 c_s = $c_s(x, t)$ ความเข้มข้นตะกอน ณ เวลาใดๆ
 A = ขนาดพื้นที่ภาพตัดขวางของการไหล (L^2)

สมรรถนะการเคลื่อนย้ายตะกอน (transport capacity) มีความสำคัญต่อการเกิดผลผลิตตะกอน ในแบบจำลอง KINEROS 2 ได้พิจารณาสมรรถนะการเคลื่อนย้ายการเคลื่อนที่ของน้ำแบบตื้นตามสมการของ Govers (1990) ดังสมการที่ 19

$$c_{mx} = \frac{0.05}{d (\gamma_s - 1)^2} \sqrt{\frac{Sh}{g}} (\Omega - \Omega_c) \quad (19)$$

- เมื่อ c_{mx} = สมรรถนะการเคลื่อนย้ายตะกอน
 γ_s = ความหนาแน่นของอนุภาคตะกอนที่แขวนลอยอยู่
 d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (L)
 S = ความเร็วของแรงเฉือน
 h = ระดับความลึกของน้ำ (L)
 g = แรงดึงดูดของโลก มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที
 Ω = ความสามารถของลำธารในการเคลื่อนย้าย
 Ω_c = ค่าคงที่ของความสามารถของลำธารในการเคลื่อนย้าย
 มีค่าเท่ากับ 0.004 เมตรต่อวินาที

ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาค ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและความหนาแน่นของอนุภาค แบบจำลอง KINEROS 2 ได้จำลองการลักษณะการตั้งของอนุภาคให้มาทับถมอยู่ที่ปลายลำธารตามสมการของ Fair and Geyer (1954) ดังสมการที่ 20

$$v_s^2 = \frac{4}{3} \frac{g (\rho_s - 1) d}{c_D} \quad (20)$$

เมื่อ v_s = ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคตะกอน (I^2/T)

c_D = ค่าสัมประสิทธิ์การดึงของอนุภาคตะกอน

ρ_s = ความหนาแน่นของอนุภาคตะกอน

d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคตะกอน (L)

ซึ่งค่า c_D สามารถหาได้จาก Particle Reynolds number (R_n) ได้ดังสมการที่ 21

$$c_D = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_n}} + 0.34 \quad (21)$$

$$\text{เมื่อ } R_n = \frac{v_s d}{\nu}$$

เมื่อ v_s = ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคตะกอน (I^2/T)

ν = ความหนืดของน้ำ (I^2/T)

d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคตะกอน (L)

3.3 การทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 ในโปรแกรมเสริม AGWA เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน

3.3.1 ลักษณะของโปรแกรมเสริม AGWA

เพื่อความสะดวกในการประมาณผลผลิตตะกอน โดยทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 จึงนำโปรแกรมเสริม AGWA ซึ่งเป็น extension หนึ่งใน ArcView 3.3 มาใช้ ภายในมีการเขียนโปรแกรมอธิบายความสัมพันธ์ของกระบวนการน้ำพืชยึด (interception) การแทรกซึมน้ำผ่านผิวดิน (infiltration) น้ำไหลบ่าผิวดิน (surface runoff) และการชะล้างพังทลายดิน (soil erosion) ตามแนวคิดของแบบจำลอง KINEROS 2

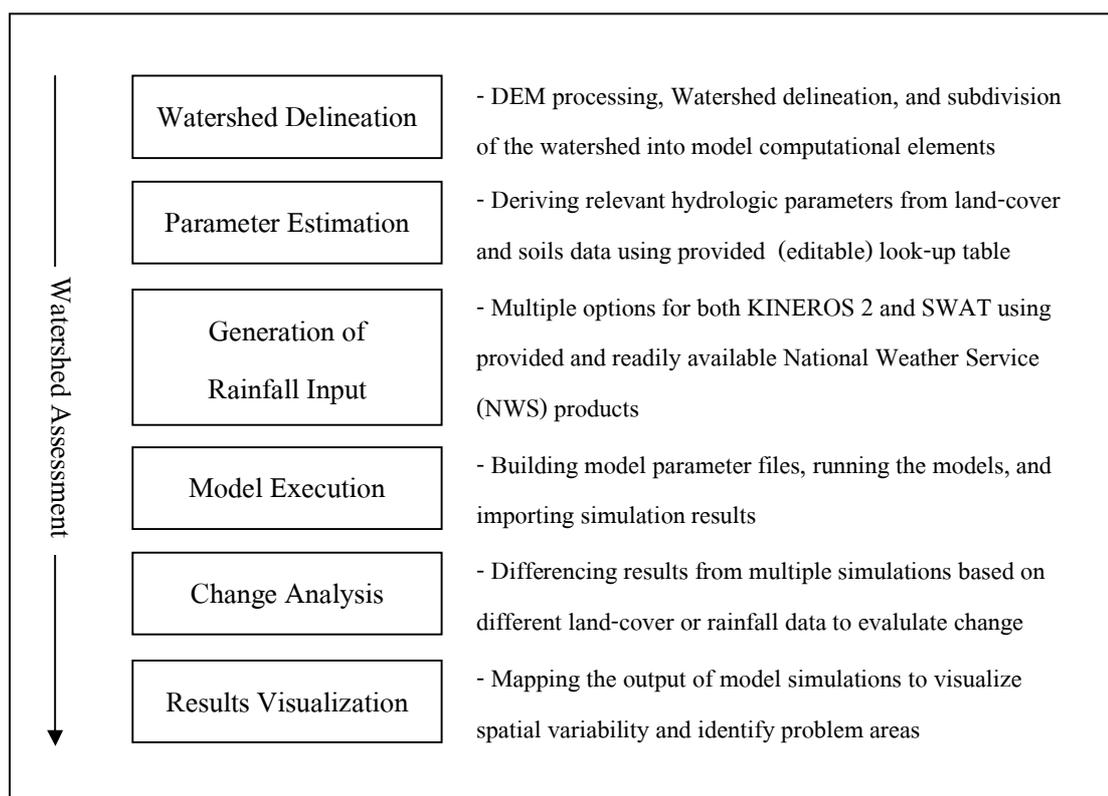
3.3.2 ขั้นตอนการทำงานของแบบจำลอง KINEROS 2 ในโปรแกรมเสริม AGWA

1) เพิ่มข้อมูลนำเข้าและการเตรียมเพิ่มข้อมูล

เพื่อความสะดวกในการประมาณผลผลิตตะกอนโดยทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 จึงมีการนำโปรแกรมเสริม AGWA ใน ArcView 3.3 มาใช้ โดยเพิ่มข้อมูลที่ต้องการสำหรับนำเข้า ได้แก่ เพิ่มข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model; DEM) เพิ่มข้อมูลลักษณะดิน (สามารถเลือกใช้แผนที่ระบบ STATSGO, SSURGO หรือ FAO ก็ได้) เพิ่มข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินและเพิ่มข้อมูลตำแหน่งของสถานีวัดน้ำฝน (raingage station)

2) วิเคราะห์ข้อมูล

ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก ดังภาพที่ 9 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

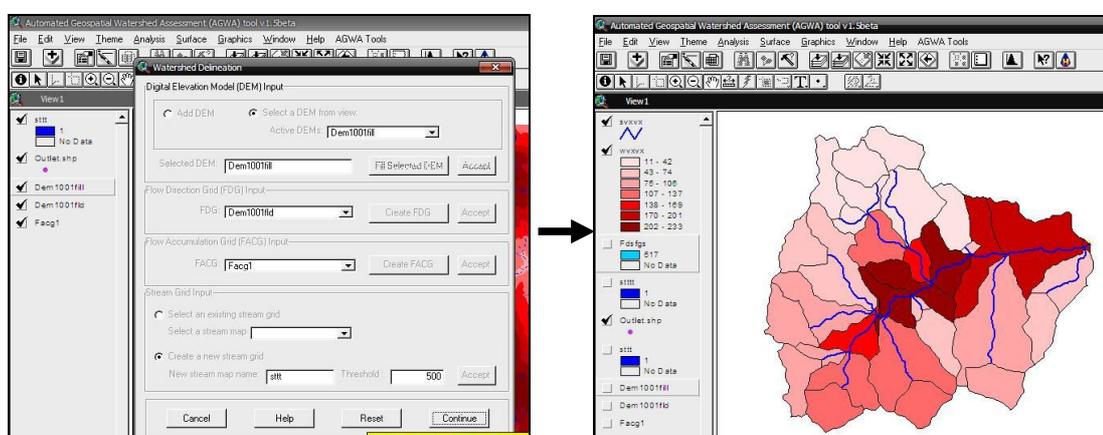


ภาพที่ 9 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลอง KINEROS 2 ใน extension AGWA

ที่มา: Goodrich *et al.* (2002)

(1) ขั้นตอนแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำออกเป็นหน่วยย่อย (watershed delineation)

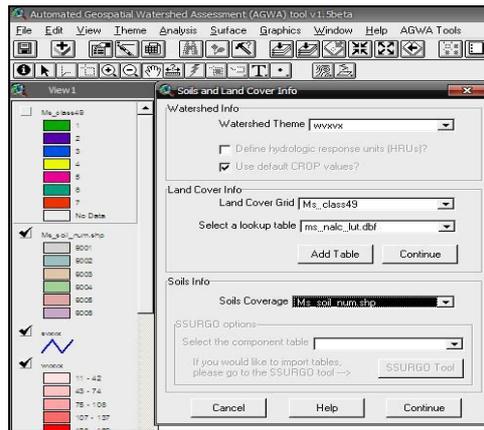
เป็นขั้นตอนแรกที่สำคัญในการจำลองแบบการเกิดผลผลิตตะกอน
 ในแบบจำลอง KINEROS 2 โดยใช้โปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ทำการแบ่งพื้นที่ออกเป็น
 หน่วยย่อย (element) 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนพื้นดิน (plane element) และส่วนลำธาร (channel element)
 โดยยึดทางออกน้ำ (outlet) เป็นหลัก ทั้งนี้เป็นไปตามความต้องการในการแบ่งของผู้ศึกษาจำเป็นต้อง
 คำนึงถึงทิศทางการไหลของน้ำ (flow direction) และการไหลสะสม (flow accumulation) ที่มาจาก
 DEM ที่ถูกต้องในการแบ่งเป็นสำคัญ



ภาพที่ 10 ขั้นตอนแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำออกเป็นหน่วยย่อย (watershed delineation)

(2) ขั้นตอนประมาณค่าพารามิเตอร์ (parameter estimation)

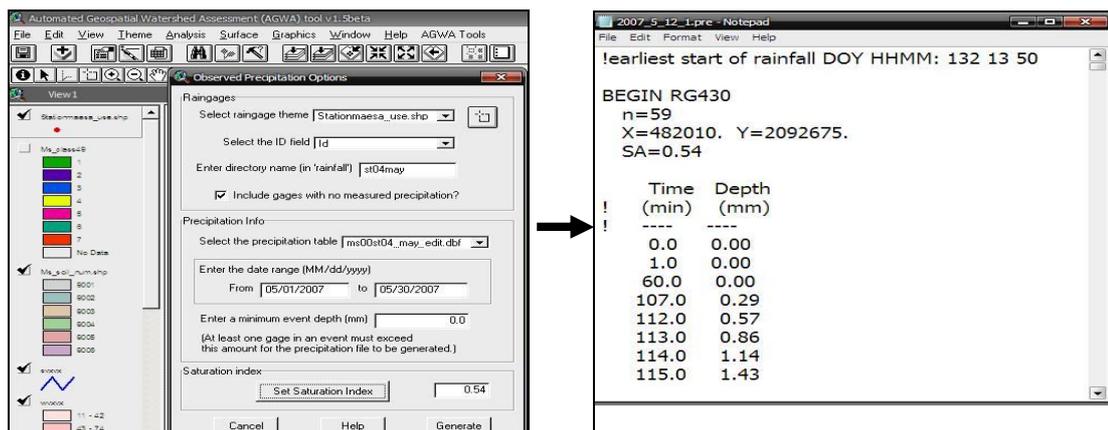
ขั้นตอนนี้เป็นการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ของ
 ลุ่มน้ำ ทั้งลักษณะของดิน เนื้อดิน โครงสร้าง ข้อมูลทางเคมีของดิน ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน
 เป็นต้น ซึ่งค่าตัวแปรที่นำเข้าไปในแบบจำลองใช้ข้อมูลที่เก็บในภาคสนามบางส่วน และจากการตรวจ
 เอกสารในพื้นที่ลุ่มน้ำที่ใกล้เคียงกันหรือพื้นที่ลุ่มน้ำที่มีลักษณะใกล้เคียงกับลุ่มน้ำศึกษา ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ (parameter estimation)

(3) ขั้นตอนสร้างเพิ่มข้อมูลปริมาณน้ำฝน (rainfall generation)

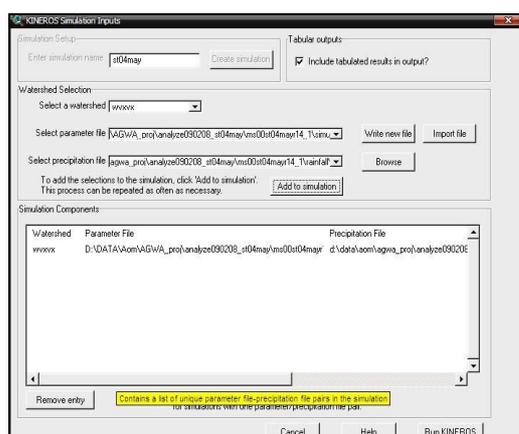
ขั้นตอนนี้ใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนภาคสนามที่วัดได้จากเครื่องวัดน้ำฝนแบบบันทึกอัตโนมัติ (automatic recording rain gauge) จากสถานีวัดน้ำฝนทั้งภายในและภายนอกพื้นที่ลุ่มน้ำ แล้วมาทำการแทรกค่าเชิงพื้นที่ (interpolation) โดยวิธี Thiessen polygon ให้กระจายทั่วพื้นที่ลุ่มน้ำ โดยคำนึงถึงอิทธิพลของตำแหน่งที่ตั้งสถานีวัดน้ำฝนเป็นสำคัญ แล้วจัดทำเพิ่มข้อมูลปริมาณน้ำฝนในรูปแบบที่แบบจำลองกำหนด ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ขั้นตอนสร้างเพิ่มข้อมูลปริมาณน้ำฝน (rainfall generation)

(4) ขั้นตอนประมวลผล (model execution)

หลังจากเตรียมข้อมูลและแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำออกเป็นส่วนย่อยแล้ว ทำการประมวลผลออกมาแสดงในรูปของแผนที่ กราฟ หรือข้อมูลในตารางคุณลักษณะ แสดงตามช่วงเวลาเป็นนาที่ หรือตามส่วนย่อยต่างๆ ของลุ่มน้ำ ที่ถูกแบ่งเป็นส่วนพื้นดินและส่วนลำธารแล้ว ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ขั้นตอนประมวลผล (model execution)

(5) ขั้นตอนเปลี่ยนการวิเคราะห์ข้อมูล (change analysis)

ขั้นตอนนี้หากผู้ศึกษามีความสนใจต้องการวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของสิ่งปกคลุมดิน ลักษณะของดิน ปริมาณน้ำฝน ส่งผลต่อผลผลิตตะกอนก็สามารถเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ได้ ผลลัพธ์ที่ออกมาจะเป็นเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลง (Miller *et al.*, 2002) สามารถนำไปเป็นแนวทางในการจัดการพื้นที่ อีกทั้งในแง่การเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินยังสามารถจำลองภาพเหตุการณ์ (scenarios)/ทางเลือก (alternatives) ในอนาคตได้ เช่น หากพื้นที่ลุ่มน้ำกลายเป็นเมืองทั้งหมด หรือเปลี่ยนรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินไปจากเดิมอย่างสิ้นเชิงจะเกิดผลกระทบอย่างไรกับลักษณะทางอุทกวิทยา เป็นต้น

(6) ขั้นตอนแสดงผลลัพธ์ (results visualization)

ขั้นตอนนี้แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลตามวิธีการ

ข้างต้น ดังภาพที่ 14

Time (min)	Rainfall (mm/h)	Outflow (mm/h)	Outflow (cu m / s)	Total S (kg/s)	0.250m (kg/s)	0.033m (kg/s)	0.004m (kg/s)
0	0.88859	0	0	0	0	0	0
1	0.88859	0	0	0	0	0	0
2	0.88859	0	0	0	0	0	0
3	0.10189	0	0	0	0	0	0
4	0.10189	0	0	0	0	0	0
5	0.10189	0	0	0	0	0	0
6	0.10189	0	0	0	0	0	0
7	0.10189	0	0	0	0	0	0
8	0.10189	0	0	0	0	0	0
9	0.10189	0	0	0	0	0	0
10	0.10189	0	0	0	0	0	0
11	0.10189	0	0	0	0	0	0
12	0.10189	0	0	0	0	0	0
13	0.0516	0	0	0	0	0	0
14	0.0516	0	0	0	0	0	0
15	1.2089	0	0	0	0	0	0
16	0.27507	0	0	0	0	0	0
17	0.27507	0	0	0	0	0	0
18	0.27507	0	0	0	0	0	0
19	0.27507	0	0	0	0	0	0
20	0.27507	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0

ภาพที่ 14 ขั้นตอนแสดงผลลัพธ์ (results visualization)

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง KINEROS 2

แบบจำลอง KINEROS 2 มีการนำมาทดลองใช้อย่างแพร่หลายทั้งในอดีตและปัจจุบัน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง KINEROS 2 ส่วนใหญ่เป็นงานวิจัยที่ทำกันในต่างประเทศ สำหรับงานวิจัยในประเทศไทยมีไม่มากนัก ดังนั้น ผลการศึกษาจึงเป็นการศึกษาในต่างประเทศเสียส่วนใหญ่ และเนื่องจากแบบจำลอง KINEROS 2 เป็นแบบจำลองที่เพิ่งพัฒนาต่อเนื่องมาจากแบบจำลอง KINEROS ในปี ค.ศ. 1995 ดังนั้นงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาไว้จึงมีไม่มากนัก ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวสรุปได้ดังต่อไปนี้

Alan *et al.* (2001) ได้ทำการศึกษาความเหมาะสมผลของความยากง่ายของการเคลื่อนที่ของตะกอนบนพื้นผิวดินบริเวณภูเขาภาคเหนือของประเทศไทย การศึกษาได้คาดคะเนทั้งปริมาณตะกอนทั้งหมด การเคลื่อนย้ายของตะกอน และความเข้มข้นตะกอนในแปลงทดลองบนถนนขนาดเล็ก ผลการศึกษาพบว่า เมื่อทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 แล้วปริมาณและความเข้มข้นตะกอน “ไม่มีความถูกต้องแม่นยำ” เมื่อเวลาเปลี่ยนไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกๆ ที่จุดสูงสุดของปริมาณตะกอน (peak sediment) ก่อนข้างเรียบจะไม่สามารถคาดคะเนได้เลย หลังจาก 15-20

นาที่ ผ่านไป การเคลื่อนย้ายของตะกอนเริ่มลดลง แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง KINEROS 2 ได้ยืดหยุ่นให้การจำลองแบบสามารถตอบสนองกระบวนการทางอุทกวิทยาได้ดียิ่งขึ้น โดยยอมให้มีการเปลี่ยนค่าความยากง่ายของการเกิดตะกอนบนพื้นผิวถนนได้ในฝนตกแต่ละครั้ง นอกจากนี้แล้วการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์การกักชะการเกิดตะกอนจะมีผลให้ความถูกต้องแม่นยำของการเคลื่อนย้ายตะกอนเพิ่มขึ้น 30-40 เปอร์เซ็นต์

Miller *et al.* (2002) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่อผลผลิตตะกอนและปริมาณน้ำท่า โดยการทดลองใช้ ArcView 3.3 และ extension AGWA ในพื้นที่ตอนบนของกลุ่มน้ำ San Pedro กลุ่มน้ำย่อย Sierra Vista ซึ่งตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของเมือง Arizona ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่มีการเปลี่ยนแปลงด้านเศรษฐกิจสังคม ทำให้พื้นที่แห่งนี้จากเดิมที่เคยเป็นฟาร์มปศุสัตว์ เปลี่ยนเป็นแหล่งชลประทานและพื้นที่เมืองแทน ผลการศึกษารายงานได้ว่า เมื่อสตอร์มมีขนาดใหญ่ขึ้นและระยะเวลาการตกของฝน (duration) นานขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอนเพิ่มสูงขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงพื้นที่กลายเป็นพื้นที่เมือง อีกทั้งยังเห็นได้ว่าการชะล้างพังทลายดินและผลผลิตตะกอนมีความเกี่ยวข้องกับความเร็วและปริมาณของน้ำไหลบ่าหน้าดิน กล่าวคือเมื่ออัตราการไหลของน้ำไหลบ่าหน้าดินเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลผลิตตะกอนเพิ่มสูงขึ้นด้วย

Vicente *et al.* (2004) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกลุ่มน้ำตัวแทนในการหาปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอน ในแบบจำลอง KINEROS 2 บริเวณพื้นที่กึ่งแห้งแล้งและเขตทุ่งหญ้า ขนาด 4.4 เฮกเตอร์ ผลการศึกษารายงานได้ว่า เมื่อกำหนดให้มีความซับซ้อนของพื้นที่มากที่สุดจะมีถึง 96 ส่วนลำธาร และมีความซับซ้อนของพื้นที่น้อยที่สุด 5 ส่วนลำธาร โดยเมื่อแบ่งให้พื้นที่ที่มีความซับซ้อนน้อยจะมีผลให้เกิดปริมาณน้ำท่า และผลผลิตตะกอนน้อยลงตามไปด้วย ดังนั้น ในการกำหนดระดับความซับซ้อนของพื้นที่ควรอาศัยทฤษฎีและความเป็นจริงของพื้นที่มากที่สุด

พื้นที่ศึกษา

1. ที่ตั้งและลักษณะภูมิประเทศ

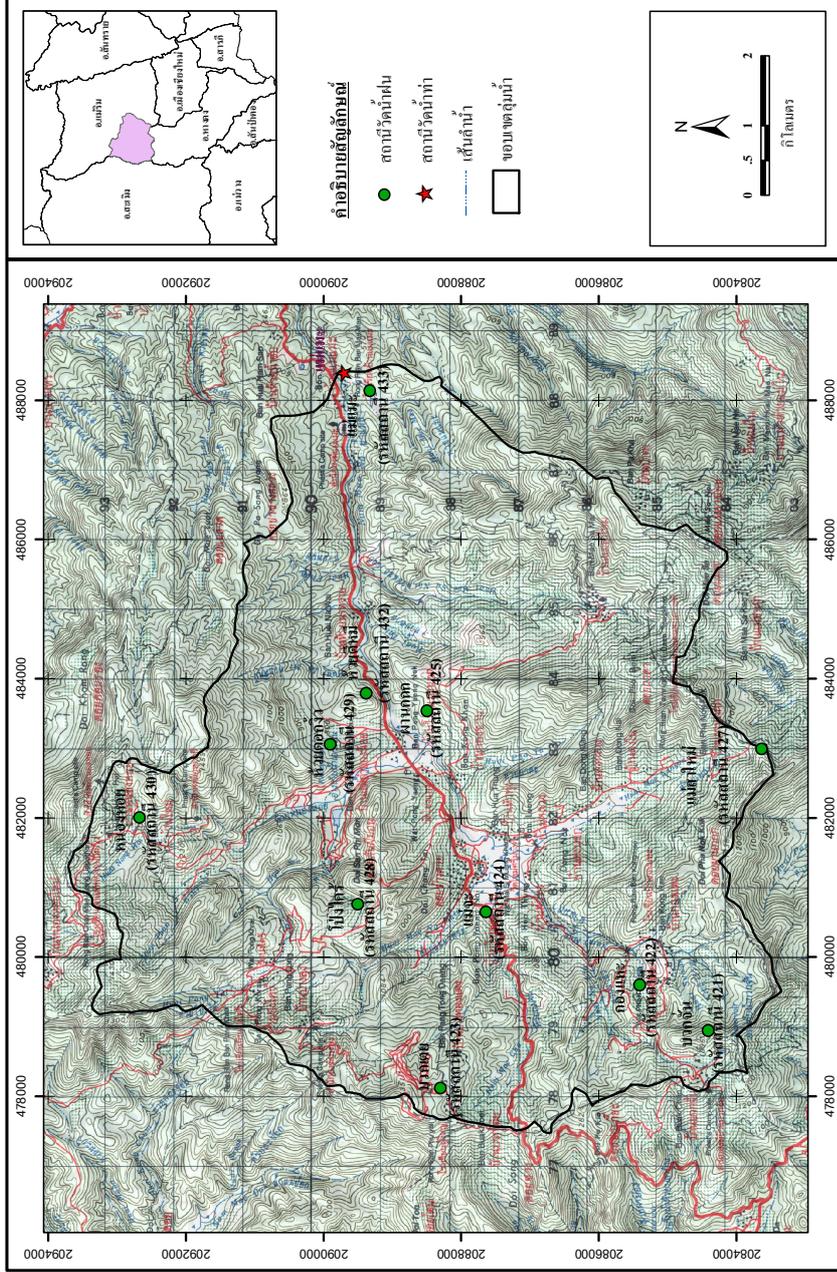
พื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา มีขนาดของพื้นที่ประมาณ 74 ตารางกิโลเมตร อยู่ระหว่างเส้นรุ้งที่ 18°50'-18°57' เหนือ และเส้นแวงที่ 98°47'-98°59' ตะวันออก ระวัง 4746 I ลักษณะภูมิประเทศ โดยทั่วไปเป็นภูเขาสลับซับซ้อน มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางระหว่าง 300-1,700 เมตร ทางทิศตะวันออกเป็นเนินเขาและที่ราบหุบเขาแม่น้ำปิง มีแม่น้ำแม่สาไหลผ่านไปบรรจบกับแม่น้ำปิงที่สบสา ดังภาพที่ 15

2. ลักษณะทางปฐพีวิทยา

พื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา มีลักษณะของดินที่อยู่บริเวณพื้นที่ลาดชัน ลอนคลื่นลาดชัน หุบ และร่องห้วย เป็นดินร่วนปนทราย สีเทา มีสมบัติอุ้มน้ำและซึมน้ำดี บริเวณที่เป็นยอดเขาที่ปกคลุมไปด้วยป่าดิบเขา ดินมีลักษณะเป็นกรดยปานกลาง มีเปอร์เซ็นต์ของอินทรีย์วัตถุสูง การยึดเกาะของเม็ดดินค่อนข้างต่ำ เป็นดินที่ง่ายต่อการถูกชะล้างและพังทลาย บริเวณไหล่เขาต่ำลงมาดินส่วนใหญ่เป็นดินลูกรัง สีน้ำตาลปนแดง มีความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำ เป็นดินที่มีการพังทลายปานกลาง ส่วนดินบริเวณที่ราบเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์มาก แต่มีกรวดทรายบนผิวดินมาก ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดจากการไหลชะของน้ำอย่างรุนแรง (กรมพัฒนาที่ดิน, 2543)

3. ลักษณะพืชพรรณ

สภาพพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่าไม้อยู่ในเขตพื้นที่อุทยานแห่งชาติสุเทพ-ปุย ประเภทของป่ามีหลากหลายชนิดและพรรณพืชผสมผสานกันเป็นบริเวณกว้าง ได้แก่ ป่าดิบเขา ป่าเต็งรัง ป่าเบญจพรรณ และทุ่งหญ้า (กรมพัฒนาที่ดิน, 2543)



ภาพที่ 15 พื้นที่ลุ่มน้ำสาขามแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ และตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดน้ำฝนและน้ำท่า

4. ลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา

สภาพอากาศบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สาจัดเป็นแบบมรสุมเขตร้อน (tropical monsoon) โดยได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งพัดพาความชุ่มชื้นมาจากทะเลจีนใต้ ทำให้ฝนตกชุกตั้งแต่เดือนพฤษภาคมไปจนถึงเดือนตุลาคม และในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งพัดพาความกดอากาศสูงมาจากประเทศจีนทำให้อากาศหนาวเย็นและแห้งแล้ง อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 25.93 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุด 16.55 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 1,532.63 มิลลิเมตรต่อปี บริเวณใกล้ที่ราบปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยประมาณ 1,200 มิลลิเมตรต่อปี และเพิ่มขึ้นเป็น 2,000 มิลลิเมตรต่อปี ใกล้บริเวณดอยปุย (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2544)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. โปรแกรมสารสนเทศภูมิศาสตร์ Arc GIS 9.1 และ ArcView 3.3, extension AGWA
3. โปรแกรม microsoft office 2003
4. ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกด้วยดาวเทียม (Global Positioning System; GPS)
5. เครื่องพิมพ์
6. อุปกรณ์เครื่องเขียน
7. ข้อมูลทุติยภูมิ ได้แก่
 - 7.1 แผนที่ลักษณะภูมิประเทศลำดับชุด L7017 ระวัง 4746 I มาตรฐาน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร พ.ศ. 2548
 - 7.2 แผนที่รูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินเชิงพื้นที่และตัวเลข มาตรฐาน 1:50,000 ของกรมพัฒนาที่ดิน พ.ศ. 2550
 - 7.3 แผนที่ของกลุ่มดิน (soil group) มาตรฐาน 1:50,000 ของกรมพัฒนาที่ดิน พ.ศ. 2543
 - 7.4 แผนที่ธรณีวิทยา มาตรฐาน 1:50,000 ของกรมพัฒนาที่ดิน พ.ศ. 2543
 - 7.5 แผนที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ มาตรฐาน 1:50,000 จัดทำโดยคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ มอบหมายให้มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เป็นผู้ดำเนินการศึกษาวิจัยปี 2525
 - 7.6 ตำแหน่งที่ตั้งสถานีวัดน้ำฝน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่
 - 7.7 ข้อมูลน้ำฝนและข้อมูลผลผลิตตะกอน ซึ่งรวบรวมข้อมูลโดยโครงการวิจัยร่วมระหว่างคณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กับภาควิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยฮาวาย ประเทศสหรัฐอเมริกา

วิธีการ

การทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ มีขั้นตอนการศึกษาสรุปได้ดังภาพที่ 16 มีรายละเอียดดังนี้

1. การรวบรวมข้อมูล

ทำการรวบรวมข้อมูลที่ทำเป็นต่อการศึกษา ดังรายการต่อไปนี้

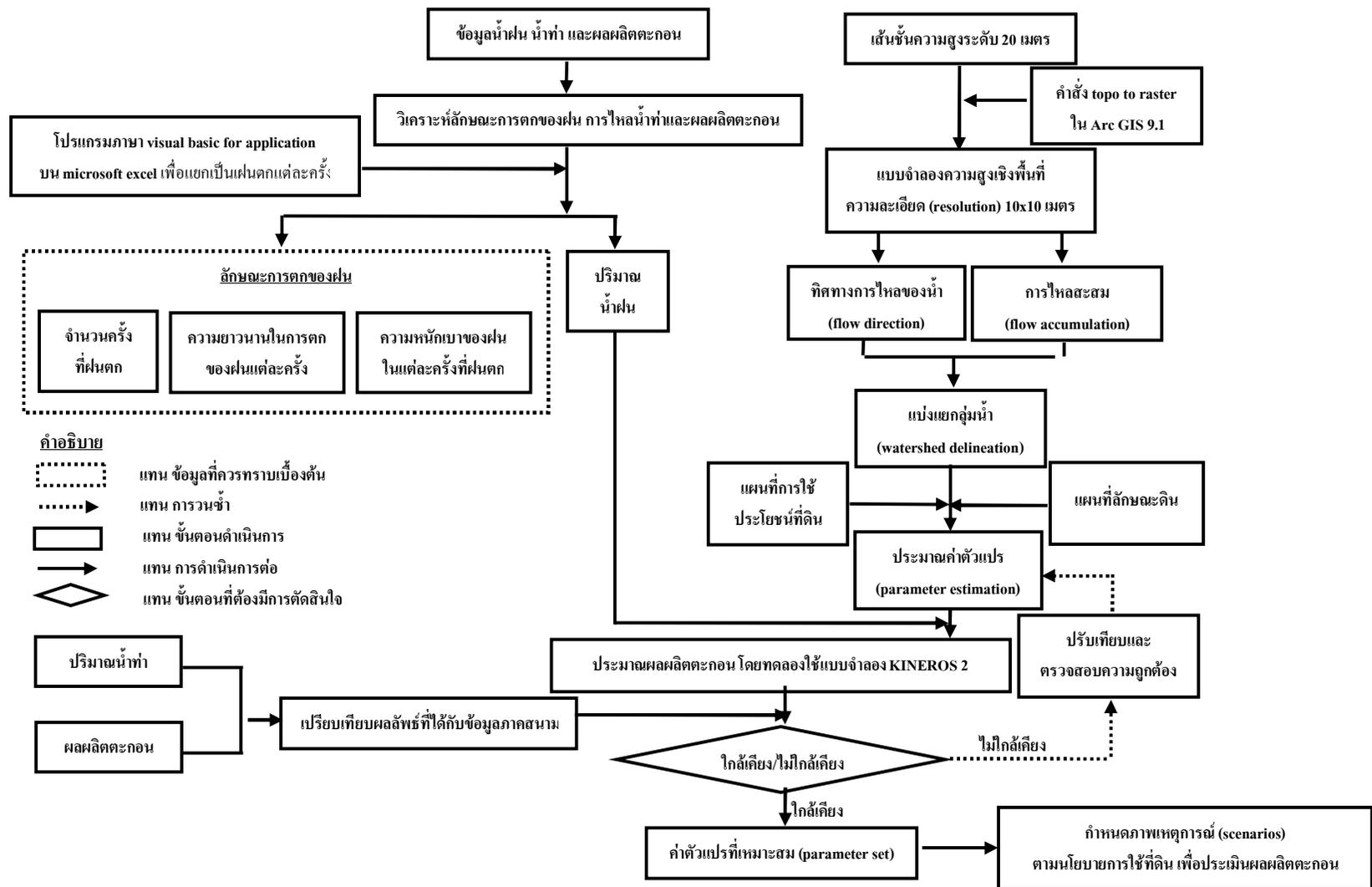
1.1 ข้อมูลเส้นชั้นความสูง (contour map) ขอบเขตพื้นที่ลุ่มน้ำ (boundary map) ลำน้ำ (stream map) จากแผนที่ลักษณะภูมิประเทศลำดับชุด L7017 ระวัง 4746 I มาตรฐาน 1:50,000 ของกรมแผนที่ทหาร พ.ศ. 2548 ในรูปแบบข้อมูลเชิงตัวเลข (digital data)

1.2 แผนที่รูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินเชิงพื้นที่และตัวเลข มาตรฐาน 1:50,000 จากการแปลและประมวลผลด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ของภาพถ่ายดาวเทียม ครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ จัดทำโดยกรมพัฒนาที่ดิน พ.ศ. 2550

1.3 ตำแหน่งที่ตั้งสถานีวัดน้ำฝน (raingage station) จำนวน 11 สถานี จากการใช้เครื่อง GPS และนำตำแหน่งที่ได้เข้าสู่ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ด้วยโปรแกรม Arc GIS 9.1

1.4 ข้อมูลน้ำฝนที่ได้จากเครื่องวัดน้ำฝนแบบบันทึกอัตโนมัติ (automatic recording raingage) ชนิดถ้วยกระดก (tipping bucket) จำนวน 11 สถานี กระจายครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ และข้อมูลผลผลิตตะกอน จากสถานีวัดน้ำท่า 1 สถานี ในปี พ.ศ. 2550 ระยะเวลา 12 เดือน

1.5 ข้อมูลแผนที่ของกลุ่มดิน (soil group) จากแผนที่ดิน มาตรฐาน 1:50,000 ในรูปแบบข้อมูลเชิงตัวเลข จัดทำโดยกรมพัฒนาที่ดิน พ.ศ. 2543 นอกจากนี้ยังมีข้อมูลอันดับดิน (order) ซึ่งรวบรวมข้อมูลโดยโครงการวิจัยร่วมระหว่างคณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กับภาควิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยฮาวาย ประเทศสหรัฐอเมริกา



ภาพที่ 16 ขั้นตอนการศึกษาการทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

1.6 ข้อมูลธรณีวิทยา จากแผนที่ธรณีวิทยา มาตรฐาน 1:50,000 ในรูปแบบข้อมูลเชิงตัวเลข จัดทำโดยกรมพัฒนาที่ดิน พ.ศ. 2543 สำหรับใช้ประกอบการพิจารณาพร้อมกับข้อมูลชุดดินสร้างแผนที่แสดงลักษณะของดินใหม่

1.7 แผนที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ ครอบคลุมบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ จัดทำโดยคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมและคณะรัฐมนตรี สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ มอบหมายให้มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เป็นผู้ดำเนินการศึกษาวิจัย เมื่อปี พ.ศ. 2525 สำหรับใช้ประกอบการวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดินรูปแบบต่างๆ

2. การวิเคราะห์ลักษณะการตกของฝน การไหลของน้ำท่า และผลผลิตตะกอน

การวิเคราะห์ลักษณะการตกของฝน ซึ่งได้แก่ จำนวนครั้งที่ฝนตก (rainfall event) ความยาวนานในการตกของฝนแต่ละครั้ง (duration) ความหนักเบาของฝนในแต่ละครั้งที่ฝนตก (rainfall intensity) ปริมาณน้ำฝน (rainfall amount) โดยโอนถ่ายข้อมูล (download) จาก data logger ของเครื่องวัดน้ำฝนแบบบันทึกอัตโนมัติ ชนิดด้วยกระดก จำนวน 11 สถานี แล้วบันทึกเป็นแฟ้มข้อมูลในโปรแกรม microsoft excel โดยลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด คือ การบันทึกเวลาที่ด้วยกระดกแต่ละครั้ง ซึ่งการกระดก 1 ครั้ง มีปริมาณน้ำฝนเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร การแยกข้อมูลการตกของฝนแต่ละครั้ง (storm rainfall data) กำหนดโดยใช้ระยะเวลาความแตกต่างของการกระดกของด้วยเกิน 60 นาทีเป็นตัวแยก การคำนวณทั้งหมดดำเนินการโดยเขียน โปรแกรมด้วยภาษา visual basic for application บน microsoft excel เพื่อช่วยให้เกิดความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีจำนวนมาก

ส่วนการวิเคราะห์ลักษณะการไหลของน้ำท่า และผลผลิตตะกอน พิจารณาในเชิงปริมาณ (amount) และลักษณะความผันแปรแต่ละช่วงเวลาของการเกิดผลผลิตตะกอน (shape) โดยใช้ข้อมูลภาคสนามจากสถานีวัดน้ำท่า จำนวน 1 สถานี ที่ทำการเก็บข้อมูลปริมาณน้ำท่าหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร และปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดแบบต่อเนื่อง โดยติดตั้งเครื่องมือวัดปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมดอัตโนมัติ ซึ่งอาศัยหลักการส่องผ่านของแสงวัดเป็นความขุ่น แล้วทำการสุ่มตัวอย่างน้ำหลายๆ ครั้ง ไปอบแห้งเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นกับน้ำหนักตะกอนอบแห้ง ดังสมการที่ 22 ของ (Alan, 2007)

$$\text{TSS} = 1.1592 \times \text{NTU}^{1.0148} \quad (R^2 = 0.9717) \quad (22)$$

เมื่อ TSS = ปริมาณตะกอนแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 NTU = ค่าความขุ่นจากเครื่องวัดอัตโนมัติ

หมายเหตุ สมการความสัมพันธ์นี้ จัดทำขึ้นในเดือนมกราคม 2550

โดยโครงการวิจัยร่วมระหว่างคณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กับ
 ภาควิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยฮาวาย ประเทศสหรัฐอเมริกา

3. การเลือกสตอร์มฝนเพื่อใช้ในแบบจำลอง

หลังจากวิเคราะห์ลักษณะการตกของฝน การไหลของน้ำท่าและผลผลิตตะกอนเรียบร้อยแล้ว ทำการพิจารณาเลือกสตอร์มฝนที่ทำการศึกษา โดยวิธีพล็อตกราฟเทียบกับความเข้มข้นตะกอน หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อวินาที และปริมาณน้ำท่า หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีหลักเกณฑ์ในการเลือก คือ สตอร์มที่เลือกศึกษาต้องเป็นสตอร์มเดี่ยวๆ (single storm) มีการตอบสนองต่อการตกของฝนอย่างชัดเจน และเลือกให้กระจายครอบคลุมตลอดทั้งปี

4. การเตรียมเพิ่มข้อมูลเพื่อนำเข้าแบบจำลอง KINEROS 2

ขั้นตอนนี้เป็นกรเตรียมเพิ่มข้อมูลเพื่อนำเข้าแบบจำลอง KINEROS 2 ในรูปแบบข้อมูลเชิงพื้นที่และตัวเลข เพื่อเข้าสู่ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ด้วยโปรแกรม ArcView 3.3 รายละเอียดดังนี้

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะสภาพภูมิประเทศ

นำข้อมูลสภาพภูมิประเทศ ได้แก่ เส้นชั้นระดับความสูงของพื้นที่ ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ที่มีความห่างของเส้นระดับชั้นความสูง 20 เมตร (ภาพผนวกที่ 1) มาสร้างแบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model; DEM) ที่มีความละเอียด (resolution) ขนาด 10x10 เมตร (ภาพผนวกที่ 2) โดยใช้คำสั่ง topo to raster ของโปรแกรม Arc GIS 9.1 หลังจากนั้นใช้คำสั่ง fill เพื่อปรับแก้ทางอุทกวิทยาให้กับข้อมูล DEM และสร้างชั้นข้อมูลทิศทางการไหล

ของน้ำ (flow direction) (ภาพผนวกที่ 3) โดยใช้คำสั่ง flow direction และสร้างชั้นข้อมูลการไหลสะสม (flow accumulation) (ภาพผนวกที่ 4) โดยใช้คำสั่ง flow accumulation ตามลำดับ

4.2 การวิเคราะห์ลักษณะของดิน

นำข้อมูลกลุ่มดิน (soil group) (ภาพผนวกที่ 5) ข้อมูลธรณีวิทยา (ภาพผนวกที่ 6) จากกรมพัฒนาที่ดิน พ.ศ. 2543 และข้อมูลอันดับดิน (order) ซึ่งรวบรวมข้อมูลโดยโครงการวิจัยร่วมระหว่าง คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กับภาควิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยฮาวาย ประเทศสหรัฐอเมริกา มาจัดทำแผนที่ลักษณะของดินใหม่ (ภาพผนวกที่ 7) เนื่องจากข้อมูลในแต่ละแหล่งมีการเก็บข้อมูลภาคสนามไม่ละเอียดมากนัก และเพื่อความละเอียดของผลการศึกษาตลอดจนความถูกต้องของข้อมูลให้มากยิ่งขึ้น หลังจากนั้นทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับดินทั้งทางลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีของดินให้มีความเหมาะสมกับพื้นที่ลุ่มน้ำ โดยพิจารณาจากข้อมูลภาคสนามและข้อมูลในเอกสารที่มีอยู่ในตารางคุณลักษณะ (attribute) ของแผนที่ลักษณะของดินใหม่ที่จัดทำขึ้น โดยมีรหัสลักษณะดิน (SNUM) เชื่อมกับข้อมูลดังกล่าวข้างต้น (ตารางผนวกที่ 3) ซึ่งค่าพารามิเตอร์เกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดิน ดังตารางผนวกที่ 4 ถึงตารางผนวกที่ 7

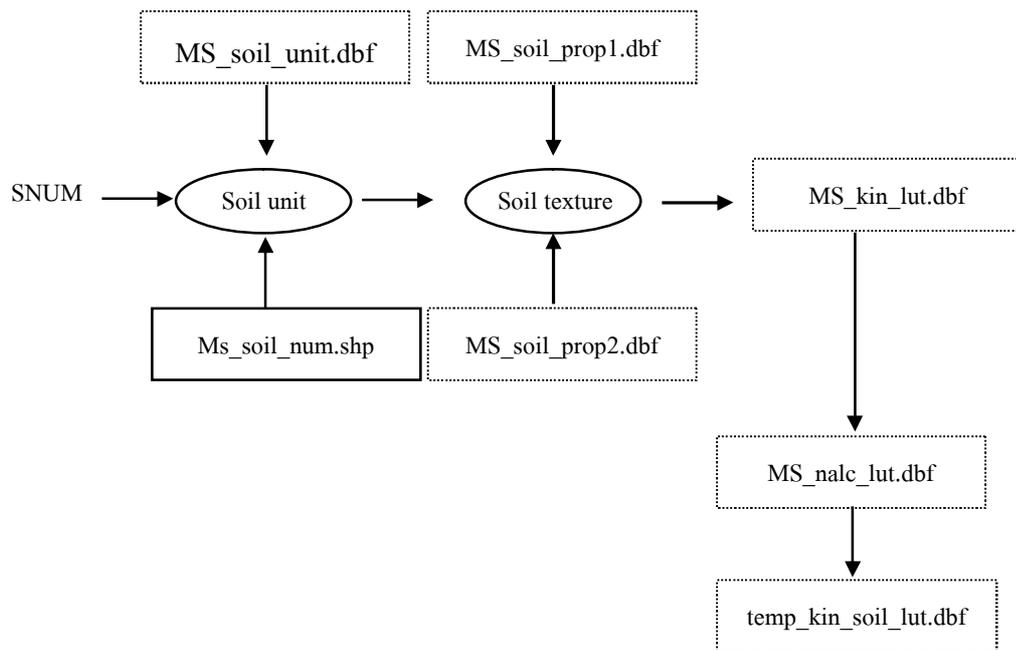
4.3 การวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดิน

นำแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน จากกรมพัฒนาที่ดิน พ.ศ. 2550 มาจัดประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินใหม่ โดยพิจารณาจากความสะดวกในการประมวลผลและความเหมาะสมกับข้อมูลพื้นฐานที่มีอยู่ เพื่อนำมาจัดทำแผนที่รูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน (ภาพผนวกที่ 8) ในรูปแบบ grid file นำเข้าแบบจำลอง KINEROS 2 โดยมีความละเอียดขนาด 10x10 เมตร ในการนี้สามารถจัดประเภทรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินใหม่ได้ 7 ประเภท ดังนี้

รหัส	ประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน
1	นาข้าว (พื้นที่ปลูกข้าวไร่)
2	ป่ารอสภาพฟื้นฟู
3	ป่าสมบูรณ์ (รวมถึงป่าไม่ผลัดใบ ป่าผลัดใบและสวนป่า)
4	พืชไร่ผสม (รวมถึงทุ่งหญ้าหรือทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ ไม้เตี้ยๆ เป็นต้น)
5	ไม้ผลผสม
6	พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง (รวมถึงพื้นที่โล่ง สนามหญ้า สวนสาธารณะ สนามกอล์ฟ ถนน ที่ฝังศพ เป็นต้น)
7	พื้นที่แหล่งน้ำ

ทั้งนี้ แผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินใหม่ที่จัดทำขึ้นต้องทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินที่ส่งผลต่อลักษณะทางอุทกวิทยาใส่ในตารางคุณลักษณะ ซึ่งประกอบด้วยค่าร้อยละการปกคลุมเรือนยอดของพืช ปริมาณน้ำพืชยึดหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อชั่วโมง สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning สัดส่วนพื้นที่ที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ ตามกลุ่มดินทางอุทกวิทยาและประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน ดังตารางผนวกที่ 8

หลังจากวิเคราะห์ลักษณะของดินและวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ที่ดินแล้ว นำโปรแกรมเสริม AGWA มาประมวลผลข้อมูลด้วยคำสั่ง run landcover and soils parameterization เตรียมเพิ่มข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง ดังตารางผนวกที่ 9 เพื่อนำไปประมาณผลผลิตตะกอน โดยมีการดึงใช้เพิ่มข้อมูลตามลำดับ ดังภาพที่ 17



หมายเหตุ แทนเพิ่มข้อมูลเชิงพื้นที่ แทนเพิ่มข้อมูลในรูปแบบตาราง

MS_soil_num.shp	แทนเพิ่มข้อมูลลักษณะดิน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่
MS_soil_unit.dbf	แทนเพิ่มข้อมูลความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับหน่วยดิน เนื้อดิน ชุดที่ 1
MS_soil_prop1.dbf	แทนเพิ่มข้อมูลความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับหน่วยดิน เนื้อดิน ชุดที่ 2
MS_soil_prop2.dbf	แทนเพิ่มข้อมูลความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับรหัสลักษณะดิน ร้อยละของดินแต่ละชั้น บนแผนที่ลักษณะดินที่จัดทำขึ้นใหม่
MS_kin_lut.dbf	แทนเพิ่มข้อมูลความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับลักษณะของดิน
MS_nalc_lut.dbf	แทนเพิ่มข้อมูลความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ที่ดิน
temp_kin_soil_lut.dbf	แทนตัวอย่างเพิ่มข้อมูลที่แบบจำลองได้เตรียมไว้เพื่อประมาณผลผลิตตะกอนของสตอร์มฝนที่ตก
SNUM	แทนรหัสลักษณะดินใหม่ที่จัดทำขึ้น

ภาพที่ 17 ลำดับการทดลองใช้ extension AGWA คำสั่ง run landcover and soils parameterization เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับดิน

4.4 การเตรียมเพิ่มข้อมูลน้ำฝนเพื่อใช้ในแบบจำลอง

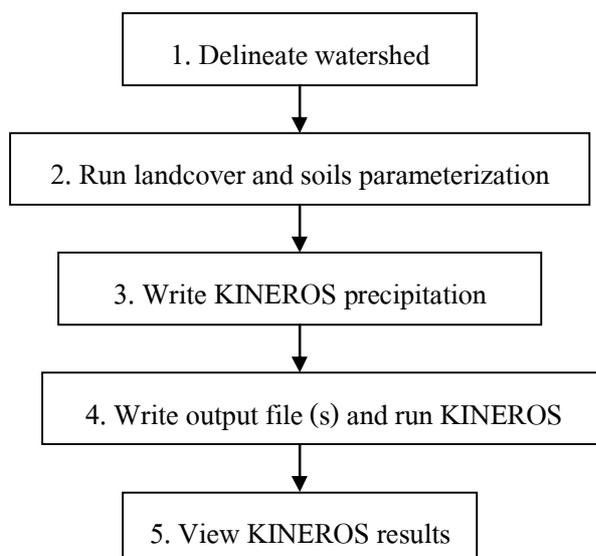
นำสโตรมฝนที่เลือกมาจัดรูปแบบเพิ่มข้อมูลน้ำฝนเพื่อใช้ในแบบจำลองด้วยคำสั่ง write KINEROS precipitation (ตารางผนวกที่ 10) ทั้งนี้ ปริมาณน้ำฝนที่ใช้นำเข้าแบบจำลอง จำเป็นต้องพิจารณาอิทธิพลของตำแหน่งสถานีวัดน้ำฝน โดยนำสัดส่วนมาประกอบ โดยใช้วิธีการแทรกค่าเชิงพื้นที่ ด้วยวิธี Theissen polygon (ภาพผนวกที่ 9) ก่อนนำเข้าแบบจำลอง ในที่นี้ กำหนดให้สถานีวัดน้ำฝนที่มีอิทธิพลต่อการเกิดตะกอน มีระยะห่างจากขอบเขตส่วนย่อย (buffer) เท่ากับ 2 กิโลเมตร ดังตารางผนวกที่ 11

5. การแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำและส่วนย่อย (element)

การประมาณผลผลิตตะกอนโดยใช้แบบจำลอง KINEROS 2 จำเป็นต้องมีการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำเป็นส่วนย่อย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนพื้นดิน (plane element) และส่วนลำธาร (channel element) โดยการทดลองใช้โปรแกรมเสริม AGWA ด้วยคำสั่ง delineate watershed ทั้งนี้ ใช้เพิ่มข้อมูลลักษณะสภาพภูมิประเทศที่ได้เตรียมไว้เพื่อนำเข้าแบบจำลอง KINEROS 2 ในข้อ 3 มาเป็นข้อมูลพื้นฐานประกอบการพิจารณา โดยกำหนดทางออกน้ำ (outlet) 1 จุด และกำหนดให้มีพื้นที่รับน้ำต่ำสุดที่ถือว่าเป็นส่วนลำธาร (contributing area; CSA) มีค่าร้อยละ 2.50 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ทำให้ผลการแบ่งส่วนย่อยละเอียดมากที่สุดเท่าที่แบบจำลองสามารถประมวลผลได้

6. การประมาณผลผลิตตะกอนจากแบบจำลอง KINEROS 2

เมื่อเตรียมเพิ่มข้อมูลลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะของดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลน้ำฝน พื้นที่ลุ่มน้ำย่อยและส่วนย่อย ตลอดจนประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้สำหรับประมวลผลตามวิธีการในข้อ 4 และ 5 แล้ว ทำการประมาณผลผลิตตะกอนในแต่ละสโตรมที่เลือกศึกษาให้ครอบคลุมทั้งปี โดยมีขั้นตอนการใช้คำสั่งใน extension AGWA ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ขั้นตอนการใช้คำสั่งใน extension AGWA เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน

7. การเปรียบเทียบผลผลิตตะกอนที่ประมาณได้จากแบบจำลอง KINEROS 2

หลังจากประมาณผลผลิตตะกอนในแต่ละสตอร์มแล้ว ทำการปรับเทียบ (calibration) ผลผลิตตะกอนที่ประมาณได้กับข้อมูลผลผลิตตะกอนจากภาคสนาม โดยปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้ผลลัพธ์ที่ประมาณได้จากแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลภาคสนามมากที่สุด ทั้งในเชิงปริมาณ (amount) จุดสูงสุด (peak) และลักษณะความผันแปรแต่ละช่วงเวลาของการเกิดผลผลิตตะกอน กระทำไปเรื่อยๆ จนได้ชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสม (parameter set) ในแต่ละสตอร์ม โดยพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบ (model efficiency; EFF) ของ Nash and Sutcliffe (1970) เป็นสมการเป้าหมาย ซึ่งค่า EFF ที่ได้ต้องมีค่าสูงสุด (maximum target) โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลผลผลิตตะกอนที่ตรวจวัดในภาคสนามรายสตอร์ม เป็นข้อมูลสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง ดังสมการที่ 23

$$EFF = 1 - \frac{\sum (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (23)$$

เมื่อ	EFF	คือ	ค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบ
	\hat{y}_i	คือ	ค่าที่ตรวจวัดได้จริง
	y_i	คือ	ค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลอง
	\bar{y}_i	คือ	ค่าเฉลี่ยของค่าที่ตรวจวัดได้จริง

8. การทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินตามภาพเหตุการณ์ (scenarios) ที่แตกต่างกันต่อผลผลิตตะกอน

หลังจากได้ชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ประมาณผลผลิตตะกอนแล้ว ทำการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินโดยกำหนดภาพเหตุการณ์ตามนโยบายการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อลดผลผลิตตะกอน คือ

8.1 คาดการณ์เมื่อมีการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นไปตามนโยบายที่กำหนดในแต่ละพื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ (ภาพผนวกที่ 10) ตามแนวทางการกำหนดพื้นที่ตามคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เมื่อปี พ.ศ. 2525

8.2 คาดการณ์เมื่อมีการใช้ประโยชน์ที่ดินชัดเจนเหมาะสมตามระดับความลาดชัน (ภาพผนวกที่ 11) ตามแนวทางการกำหนดพื้นที่ตามคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ เมื่อปี พ.ศ. 2525

หลังจากนั้นนำค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับสภาพปัจจุบัน เพื่อเป็นข้อมูลให้เห็นแนวทางในการจัดการพื้นที่ลุ่มน้ำที่เหมาะสมในอนาคต

ผลและวิจารณ์

การทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ครั้งนี้ ได้นำข้อมูลปริมาณน้ำฝนในแต่ละครั้งที่ฝนตก ในปี พ.ศ. 2550 ที่ได้จากเครื่องวัดน้ำฝนแบบบันทึกอัตโนมัติ (automatic recording rain gauge) ชนิดถ้วยกระดก (tipping bucket) จำนวน 11 สถานี ที่ตั้งกระจายครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ มาวิเคราะห์หาผลผลิตตะกอนในแต่ละครั้งที่ฝนตก (รายสตอร์ม) ประมวลผลผ่านโปรแกรมเสริม AGWA แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องกับข้อมูลที่ตรวจวัดในภาคสนาม อีกทั้งได้วิเคราะห์ลักษณะการตกของฝน การไหลของน้ำท่าและผลผลิตตะกอน ได้ผลการศึกษา ดังนี้

1. ลักษณะการตกของฝน การไหลของน้ำท่า และผลผลิตตะกอนที่ตรวจวัดได้

1.1 ลักษณะการตกของฝน

การวิเคราะห์ลักษณะการตกของฝน ซึ่งได้แก่ จำนวนครั้งที่ฝนตก (rainfall event) ความยาวนานในการตกของฝนแต่ละครั้ง (duration) ความหนักเบาของฝนในแต่ละครั้งที่ฝนตก (rainfall intensity) ปริมาณน้ำฝน (rainfall amount) พบว่า มีจำนวนครั้ง (storm) ของฝนที่ตกรายปี ทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำประมาณ 340 ครั้ง โดยจำนวนครั้งของฝนที่ตกรายปีสูงสุด 363 ครั้ง และต่ำสุด 301 ครั้ง วัดที่สถานีวัดน้ำฝนกองแหะและสถานีวัดน้ำฝนแม่แะ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจำนวนครั้งของฝนที่ตกรายเดือน พบว่า จำนวนครั้งของฝนที่ตกรายเดือนสูงสุดเท่ากับ 70 ครั้ง ในเดือนกันยายน ที่สถานีวัดน้ำฝนกองแหะ และเดือนที่มีจำนวนครั้งของฝนรายเดือนต่ำสุดคือ เดือนธันวาคม มกราคม กุมภาพันธ์ เนื่องจากเป็นเดือนที่ทุกสถานีวัดน้ำฝนไม่มีฝนตกเลย ดังตารางผนวกที่ 12

ความยาวนานของฝนในแต่ละครั้งที่ฝนตก (storm) ของแต่ละสถานีวัดน้ำฝน เพื่อสะดวกต่อความเข้าใจจึงได้แบ่งระดับความยาวนานของฝนออกเป็น 7 ระดับ คือ น้อยกว่า 0.5, 0.5-1.0, >1.0-2.0, >2.0-3.0, >3.0-6.0, >6.0-12.0 และมากกว่า 12.0 ชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า แต่ละครั้งที่ฝนตกทุกสถานีวัดน้ำฝนส่วนใหญ่มีความยาวนานของฝนไม่เกิน 0.5 ชั่วโมง มีมากถึงประมาณร้อยละ 53.0-59.0 ของจำนวนครั้งที่ฝนตกทั้งหมด รองลงมา คือ ความยาวนานของฝน 0.5-

1.0 ชั่วโมง พบประมาณร้อยละ 13.0-18.0 ของจำนวนครั้งที่ฝนตกทั้งหมด ความยาวนานของฝน >1.0-2.0 ชั่วโมง พบประมาณร้อยละ 11.0-16.0 ของจำนวนครั้งที่ฝนตกทั้งหมด ตามลำดับ ส่วนฝนที่มีความยาวนานของฝน >2.0-3.0 ชั่วโมง และ >3.0-6.0 ชั่วโมง มีร้อยละที่พบใกล้เคียงกัน คือ ประมาณร้อยละ 3.0-6.0 ของจำนวนครั้งที่ฝนตกทั้งหมด นอกนั้นเป็นความยาวนานของฝน >6.0-12.0 ชั่วโมง พบประมาณร้อยละ 1.0-3.0 ของจำนวนครั้งที่ฝนตกทั้งหมด และความยาวนานของฝนมากกว่า 12.0 ชั่วโมงแทบไม่เกิดขึ้นเลย และเมื่อพิจารณาเป็นรายสถานีวัดน้ำฝน พบว่า สถานีวัดน้ำฝนที่มีจำนวนครั้งที่เกิดการเกิดความยาวนานในการตกของฝนแต่ละครั้งสูงสุด ไม่เกิน 0.5 ชั่วโมง พบที่สถานีวัดน้ำฝนห้วยดีหมี มีค่าประมาณร้อยละ 59.88 ของจำนวนครั้งที่ฝนตกทั้งหมด และสถานีวัดน้ำฝนที่มีจำนวนครั้งที่เกิดการเกิดความยาวนานในการตกของฝนแต่ละครั้งต่ำสุด คือ ความยาวนานในการตกของฝนแต่ละครั้งมากกว่า 12.0 ชั่วโมง พบที่สถานีวัดน้ำฝนกองแหะ โป่งไคร้ และหนองหอย มีค่าประมาณร้อยละ 0.28 ของจำนวนครั้งที่ฝนตกทั้งหมด ดังตารางผนวกที่ 13

ความหนักเบาของฝนในแต่ละครั้งของแต่ละสถานีวัดน้ำฝน เพื่อสะดวกต่อความเข้าใจ จึงได้แบ่งระดับความยาวนานของฝนออกเป็น 5 ช่วง คือ น้อยกว่า 10.0, 10.0-30.0, >30.0-60.0, >60.0-100.0 และมากกว่า 100.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ พบว่า ส่วนใหญ่ความหนักเบาของฝนที่ตกแต่ละครั้งในทุกสถานีวัดน้ำฝนมีความหนักเบาน้อยกว่า 10.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง มีมากถึงประมาณร้อยละ 50.0-99.0 ของจำนวนครั้งที่ฝนตกทั้งหมด รองลงมา คือ ความหนักเบา 10.0-30.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบประมาณร้อยละ 47.0 ของจำนวนครั้งที่ฝนตกทั้งหมด ความหนักเบา >30.0-60.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบประมาณร้อยละ 2.0 ของจำนวนครั้งที่ฝนตกทั้งหมด นอกนั้นเป็นฝนตกที่มีความหนักเบามากกว่า 60.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบน้อยมากหรือแทบไม่เกิดขึ้นเลย และเมื่อพิจารณาเป็นรายสถานีวัดน้ำฝน พบว่า ที่ระดับความหนักเบาเฉลี่ยของฝนที่ตกแต่ละครั้งน้อยกว่า 10.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง สถานีวัดน้ำฝนแม่จ๊ะ มีร้อยละในการเกิดสูงสุด คือ ประมาณร้อยละ 99.71 ของจำนวนครั้งที่ฝนตกทั้งหมด ต่ำสุดพบที่สถานีบวกละเอียด ประมาณร้อยละ 50.29 ของจำนวนครั้งที่ฝนตกทั้งหมด สำหรับที่ระดับความหนักเบาของฝนที่ตกแต่ละครั้ง 10.0-30.0 และ >30.0-60.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบว่าสถานีวัดน้ำฝนผานกกก มีร้อยละในการเกิดสูงสุด คือ ประมาณร้อยละ 46.86 และ 2.29 ของจำนวนครั้งที่ฝนตกทั้งหมด ต่ำสุดพบที่สถานีแม่จ๊ะประมาณร้อยละ 0.29 ของจำนวนครั้งที่ฝนตกทั้งหมด ส่วนที่ระดับความหนักเบาของฝนที่ตกแต่ละครั้ง >60.0-100.0 และมากกว่า 100.0 มิลลิเมตรต่อชั่วโมงทุกสถานีวัดน้ำฝนแทบไม่พบการเกิดเลย ดังตารางผนวกที่ 14

ปริมาณน้ำฝนรายปีที่ตรวจวัดจาก 11 สถานี ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา พบว่า มีค่าเฉลี่ยรายปีประมาณ 1,580 มิลลิเมตร โดยมีปริมาณน้ำฝนรายปีเฉลี่ยสูงสุดประมาณ

1,840 มิลลิเมตร และเฉลี่ยต่ำสุดประมาณ 1,337 มิลลิเมตร วัดที่สถานีวัดน้ำฝนผานกกกและสถานีวัดน้ำฝนแม่สาใหม่ ตามลำดับ โดยเดือนที่มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยจากทุกสถานีสูงสุด คือ เดือนพฤษภาคม วัดได้ประมาณ 384 มิลลิเมตร และเดือนที่มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยจากทุกสถานีต่ำสุด คือ เดือนธันวาคม มกราคม กุมภาพันธ์ เนื่องจากเป็นเดือนที่ทุกสถานีวัดน้ำฝนไม่มีฝนตกเลย (ตารางผนวกที่ 15) และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำฝนคาบ 30 ปี บริเวณพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2544) ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย ระหว่าง 1,100-1,400 มิลลิเมตร พบว่า ปริมาณน้ำฝนรายปีของสถานีวัดน้ำฝนส่วนใหญ่ในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลฝนคาบ 30 ปี แต่มีค่ามากกว่าเนื่องจากพื้นที่ลุ่มน้ำตั้งอยู่บนพื้นที่ที่มีระดับความสูงมาก จึงทำให้มีปริมาณน้ำฝนที่สูงกว่าข้อมูลฝนของภาคเหนือ

อิทธิพลหลักที่ทำให้ลักษณะการตกของฝนในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ มีปริมาณน้ำฝนดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น เนื่องจากอิทธิพลของลมมรสุม 2 ฤดู คือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และตะวันออกเฉียงเหนือ มีสมบัติทางด้านความชื้นแตกต่างกัน (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2544) กล่าวคือ ในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงตุลาคมบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สาอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จึงทำให้บริเวณดังกล่าวมีโอกาสได้รับปริมาณน้ำฝนมาก ตรงกันข้ามในเดือนพฤศจิกายนถึงเมษายน เป็นระยะของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งเป็นมวลอากาศเย็นและมีความชื้นในอากาศน้อยพัดเข้ามา ทำให้ปริมาณน้ำฝนที่เขตลุ่มน้ำบนภูเขาของพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สาได้รับจึงลดน้อยลง

1.2 ลักษณะการไหลของน้ำท่า และผลผลิตตะกอน

ลักษณะการไหลของน้ำท่าที่ตรวจวัดได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับลักษณะการตกฝน กล่าวคือ เมื่อปริมาณน้ำฝนมากแล้วปริมาณน้ำท่าก็มีมากตามไปด้วย และหากพิจารณา ลักษณะความผันแปรแต่ละช่วงเวลาของการเกิดผลผลิตตะกอน พบว่า มีความสอดคล้องกับลักษณะการไหลของน้ำท่ามากกว่าลักษณะการตกของฝน กล่าวคือ เมื่อปริมาณน้ำท่าเพิ่มสูงขึ้นแล้วผลผลิตตะกอนที่เกิดขึ้นสูงตามไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลแรงน้ำไหลบ่าหน้าดินที่กัดชะหน้าดินและเคลื่อนย้ายตะกอน แสดงว่า น้ำไหลบ่าหน้าดิน (surface runoff) มีอิทธิพลต่อการเกิดผลผลิตตะกอนที่ถูกกัดชะได้ดี สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการศึกษาวิจัยไม่ได้นำค่าพลังงานของฝน (rainfall erosivity) และความหนักเบาของฝนสูงสุดใน 30 นาที (I_{30max}) มาวิเคราะห์ค่าสูง-ต่ำ ทำให้ไม่สามารถบอกถึงอิทธิพลของลักษณะการตกของฝนให้ชัดเจนได้ อีกประการหนึ่งผลผลิตตะกอนที่เกิดขึ้นยังมีความสัมพันธ์กับสภาพภูมิประเทศ กล่าวคือ ผลผลิตตะกอนที่เกิดขึ้นไม่ได้ไหลมาใน

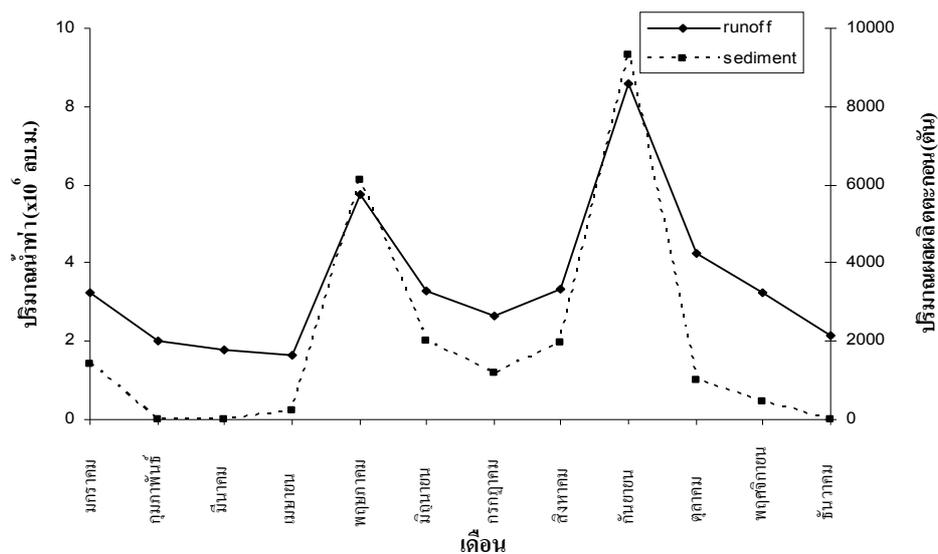
คราวเดียว เพียงแต่ไหลด้วยแรงพัดพาน้ำไหลบ่าหน้าดินหรือการหลากของน้ำ ที่มาปรากฏเป็นน้ำไหลในลำธารมากกว่า ดังภาพผนวกที่ 12 ถึงภาพผนวกที่ 23

เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำท่ารายเดือน พบว่า เดือนกุมภาพันธ์ มีนาคม และธันวาคม มีแนวโน้มการเกิดผลผลิตตะกอนค่อนข้างใกล้เคียงกันและมีค่าเกือบคงที่ เนื่องจากในเดือนดังกล่าวไม่มีฝนตกเลย ทำให้ผลผลิตตะกอนที่วัดได้เกิดจากการกัดชะของในลำธารเท่านั้น ไม่มีส่วนที่เกิดจากพลังงานการกัดชะของฝน ต่อมาเมื่อฝนเริ่มตกในปลายเดือนเมษายนผลผลิตตะกอนเริ่มมีให้เห็นชัดเจนมากขึ้น โดยเดือนกันยายนมีปริมาณน้ำท่าสูงสุดถึง 8.60×10^6 ลูกบาศก์เมตรสอดคล้องกับปริมาณผลผลิตตะกอนที่มีค่า 9,327.88 ตัน รองลงมา คือ เดือนพฤษภาคม มีปริมาณน้ำท่าสูงสุดเท่ากับ 5.77×10^6 ลูกบาศก์เมตร และมีปริมาณผลผลิตตะกอนเท่ากับ 6,103.74 ตัน ส่วนเดือนมีนาคมมีปริมาณน้ำท่าต่ำสุด 1.80×10^6 ลูกบาศก์เมตรและมีปริมาณผลผลิตตะกอนเท่ากับ 1.42 ตัน ดังตารางที่ 1 และภาพที่ 19

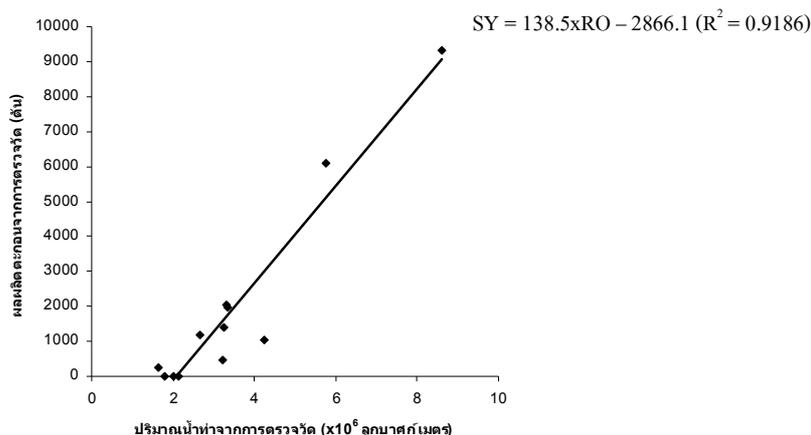
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำท่ากับผลผลิตตะกอนในแต่ละเดือน พบว่า มีแนวโน้มความสัมพันธ์ที่ชัดเจนเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 กล่าวคือ เมื่อปริมาณน้ำท่าเพิ่มมากขึ้นแล้ว ผลผลิตตะกอนก็มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย มีค่า R^2 เท่ากับ 0.9186 ในรูปแบบสมการแบบเส้นตรง ดังนั้น ความผันแปรที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยปริมาณน้ำท่า อธิบายได้ว่า ปัจจัยปริมาณน้ำท่ามีอิทธิพลทำให้เกิดผลผลิตตะกอนมากถึงร้อยละ 91.86 นอกจากนั้นร้อยละ 8.14 เป็นอิทธิพลจากปัจจัยตัวอื่น เช่น พืชพรรณและสิ่งปกคลุมดิน ความยากง่ายต่อการชะล้างพังทลายของดิน เป็นต้น ดังภาพที่ 20

ตารางที่ 1 ปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอนรายเดือนจากสถานีตรวจวัดน้ำท่า บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550

เดือน	ปริมาณน้ำท่า ($\times 10^6$ ลูกบาศก์เมตร)	ผลผลิตตะกอน (ตัน)
มกราคม	3.24	1,413.54
กุมภาพันธ์	2.01	1.98
มีนาคม	1.80	1.42
เมษายน	1.64	233.24
พฤษภาคม	5.77	6,103.74
มิถุนายน	3.31	2,027.62
กรกฎาคม	2.67	1,193.14
สิงหาคม	3.35	1,982.80
กันยายน	8.60	9,327.88
ตุลาคม	4.23	1,024.75
พฤศจิกายน	3.22	471.38
ธันวาคม	2.14	1.51



ภาพที่ 19 แนวโน้มปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอน ที่ตรวจวัดได้จากภาคสนาม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำทำกับผลผลิตตะกอนรายเดือน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550

2. สตอร์มฝนที่เลือกศึกษา

ผลการศึกษา พบว่า สตอร์มที่เลือกศึกษากระจายครอบคลุมเดือนที่มีฝนตกคือ เดือน พฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม มีทั้งหมด 14 สตอร์มเดี่ยว โดยแบ่งเป็นเดือนพฤษภาคม 2 สตอร์ม เดือน มิถุนายน 4 สตอร์ม เดือนกรกฎาคม 2 สตอร์ม เดือนสิงหาคม 1 สตอร์ม เดือนกันยายน 4 สตอร์ม เดือนตุลาคม 1 สตอร์ม ดังตารางที่ 2

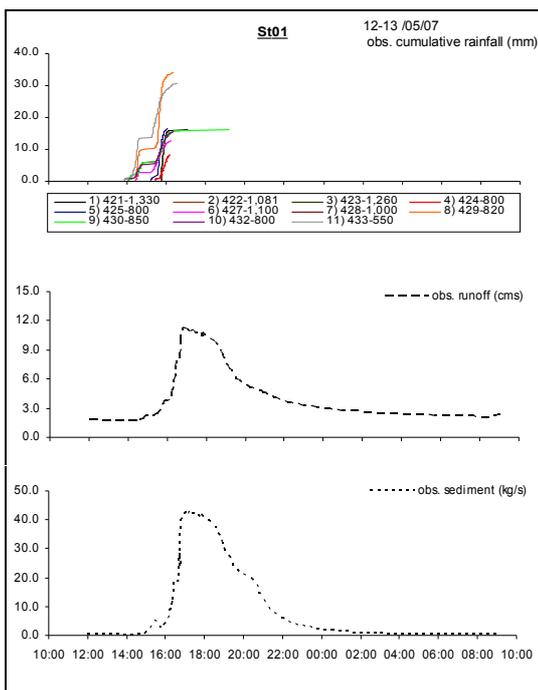
จากการศึกษาสตอร์มฝนที่เลือก ทำให้ทราบว่าควรเลือกช่วงข้อมูลผลผลิตตะกอนช่วงเวลาใด เมื่อพิจารณาแล้วพบว่า ช่วงเวลาที่เริ่มเกิดผลผลิตตะกอนเกิดหลังจากฝนตกไปแล้วระยะเวลาหนึ่ง และมีความสอดคล้องเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณน้ำฝน แสดงว่า ปริมาณน้ำฝนเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดผลผลิตตะกอนในพื้นที่ กล่าวคือ เมื่อมีฝนตกก็เกิดตะกอนในลำธารขึ้น อาจมากน้อยแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะการตกของฝน เมื่อปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นผลผลิตตะกอนก็เพิ่มขึ้นไปด้วย โดยปริมาณน้ำฝนในแต่ละสถานีของสตอร์มที่เลือกศึกษามีค่าอยู่ระหว่าง 0.28-57.70 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำทำมีค่าอยู่ระหว่าง 7.16×10^4 - 7.69×10^5 ลูกบาศก์เมตร ผลผลิตตะกอนมีค่าอยู่ระหว่าง 81.41-597.48 ตัน ในขณะที่มีความเข้มข้นตะกอนสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 7.23-59.78 กิโลกรัมต่อวินาที ดังภาพที่ 21

ตารางที่ 2 ปริมาณน้ำฝน น้ำท่า ผลผลิตตะกอน และความเข้มข้นตะกอนสูงสุด ในแต่ละสถานีที่เลือกศึกษา บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

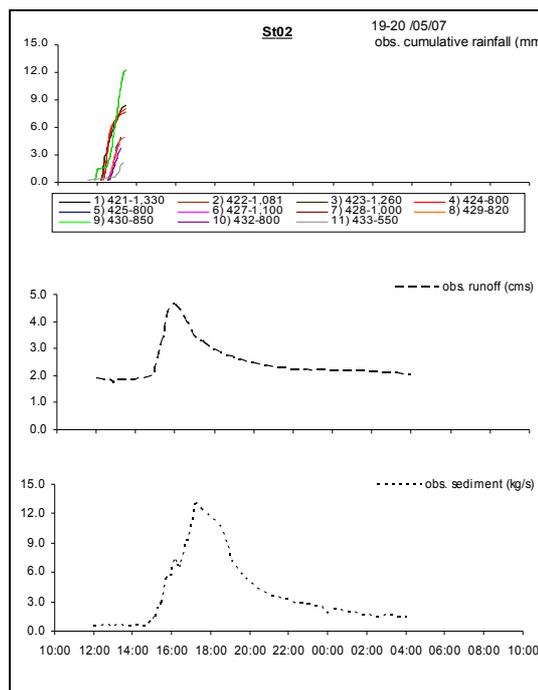
สถานี ที่	วัน เดือน ปี	รหัสสถานีวัดน้ำฝน (ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง (เมตร))											ปริมาณ น้ำฝนเฉลี่ย ทุกสถานี*	ปริมาณ น้ำท่า (ลบ.ม.)	ปริมาณ ผลผลิต ตะกอน (ตัน)	ความเข้มข้น ตะกอน สูงสุด (กก./วินาที)
		421 (1,330)	422 (1,081)	423 (1,260)	424 (800)	425 (800)	427 (1,100)	428 (1,000)	429 (820)	430 (850)	432 (800)	433 (550)				
1	12/05/07	16.37	8.55	16.12	8.55	16.77	13.08	16.29	34.43	16.29	15.83	30.98	17.57	2.84x10 ⁵	597.48	43.40
2	19/05/07	8.64	8.00	8.65	8.27	5.14	4.45	12.57	5.20	12.57	4.02	2.43	7.27	1.44x10 ⁵	218.98	13.14
3	02/06/07	-	-	-	-	-	-	11.43	9.07	11.14	2.43	-	8.52	1.23x10 ⁵	86.18	7.23
4	04/06/07	16.94	10.20	16.94	10.20	35.18	9.68	2.00	12.55	2.00	8.85	24.31	13.53	1.25x10 ⁵	321.48	50.74
5	16/06/07	10.20	10.20	46.45	13.16	13.37	7.32	3.14	11.56	3.14	8.58	2.17	11.75	1.40x10 ⁵	225.06	25.33
6	27/06/07	13.79	13.79	57.70	13.74	12.57	5.75	18.86	10.11	18.86	6.71	2.17	15.82	2.71x10 ⁵	422.55	38.23
7	18/07/07	8.82	8.82	46.50	13.17	12.37	4.45	10.00	12.65	10.00	4.83	0.28	11.99	7.16x10 ⁴	81.41	7.80
8	29/07/07	7.45	7.45	3.13	11.74	6.81	6.02	1.14	23.85	1.14	7.51	3.26	7.23	9.13x10 ⁴	107.47	13.51
9	01/08/07	22.89	22.89	26.18	30.06	22.26	20.14	10.29	26.15	10.29	20.12	10.84	20.19	2.85x10 ⁵	213.59	22.50
10	04/09/07	13.79	13.79	57.53	16.03	22.15	14.13	14.95	11.73	18.86	11.00	24.03	19.82	3.23x10 ⁵	429.67	54.05
11	06/09/07	14.24	14.24	30.00	14.17	10.83	9.37	10.44	11.14	7.57	10.39	9.75	12.92	3.16x10 ⁵	155.93	15.28
12	13/09/07	9.93	9.93	29.91	7.16	-	-	7.60	8.87	7.43	3.49	4.10	9.82	2.31x10 ⁵	272.28	36.56
13	14/09/07	8.82	8.82	6.24	10.31	32.47	8.89	5.24	8.97	17.71	4.83	0.81	10.28	2.74x10 ⁵	287.75	30.12
14	05/10/07	42.55	42.55	25.93	42.55	34.71	18.83	20.97	35.95	38.00	25.48	30.23	32.53	7.69x10 ⁵	494.25	59.78

หมายเหตุ - คือ ไม่มีฝนตกในช่วงเวลาดังกล่าว

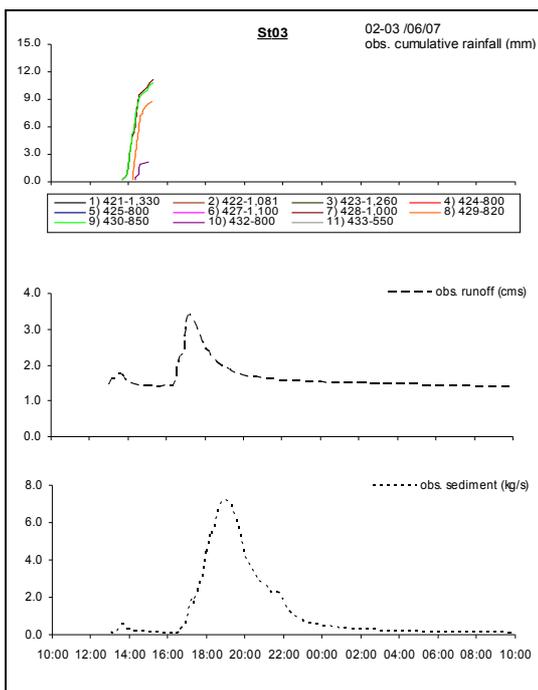
* คือ ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยโดยวิธี Theissen polygon



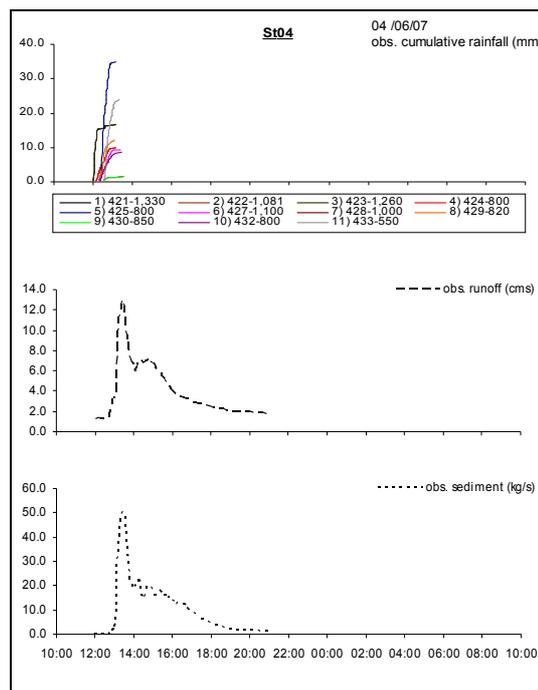
(ก) สตอร์มที่ 01 วันที่ 12 พ.ค. 50



(ข) สตอร์มที่ 02 วันที่ 19 พ.ค. 50

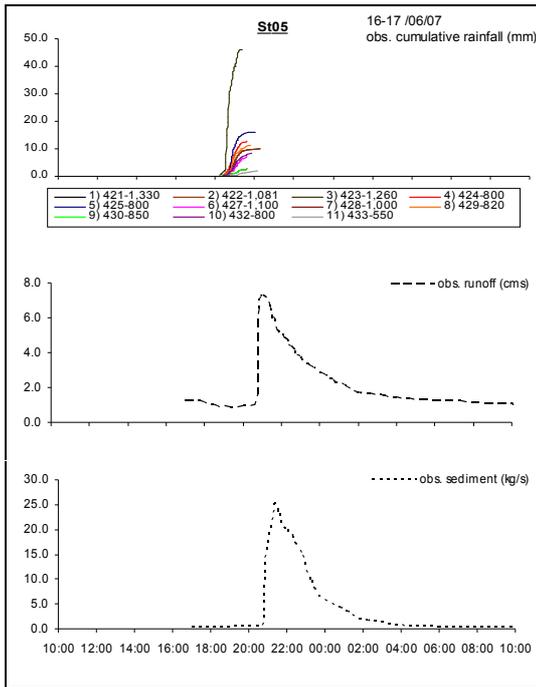


(ค) สตอร์มที่ 03 วันที่ 02 มิ.ย. 50

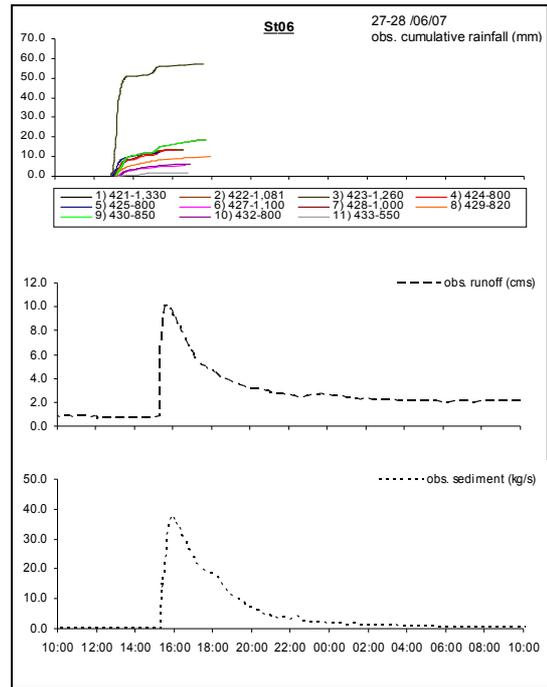


(ง) สตอร์มที่ 04 วันที่ 04 มิ.ย. 50

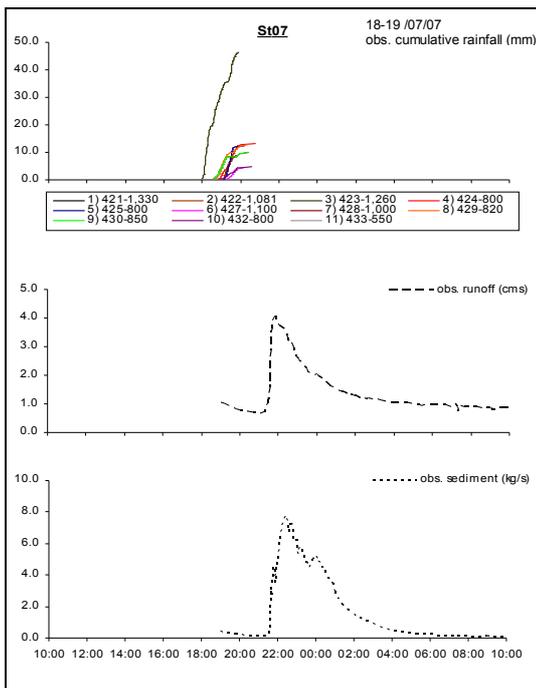
ภาพที่ 21 ปริมาณน้ำฝนสะสม น้ำท่า และผลผลิตตะกอน ที่ตรวจวัดได้จากภาคสนาม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550



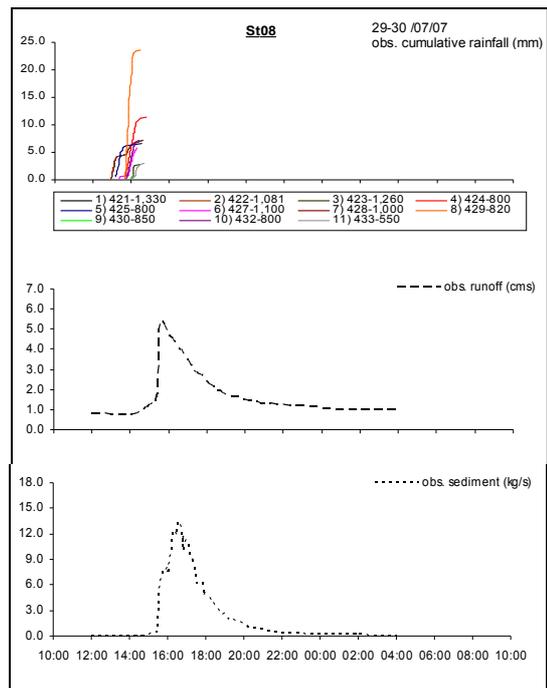
(จ) สตอร์มที่ 05 วันที่ 16 มิ.ย. 50



(ฉ) สตอร์มที่ 06 วันที่ 27 มิ.ย. 50

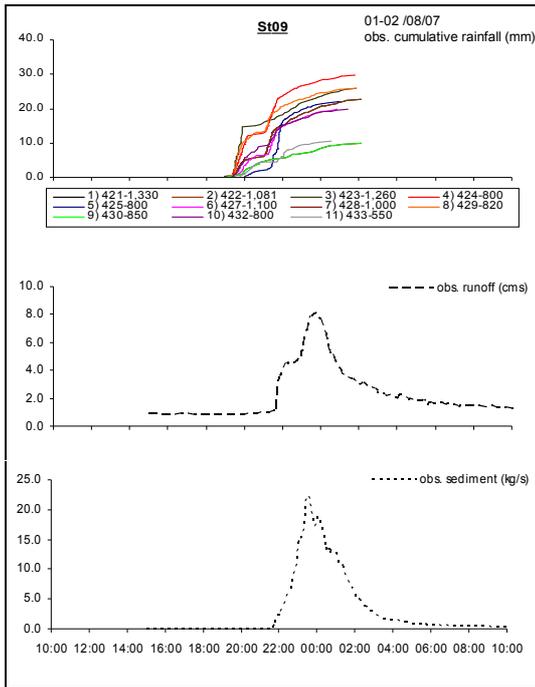


(ช) สตอร์มที่ 07 วันที่ 18 ก.ค. 50

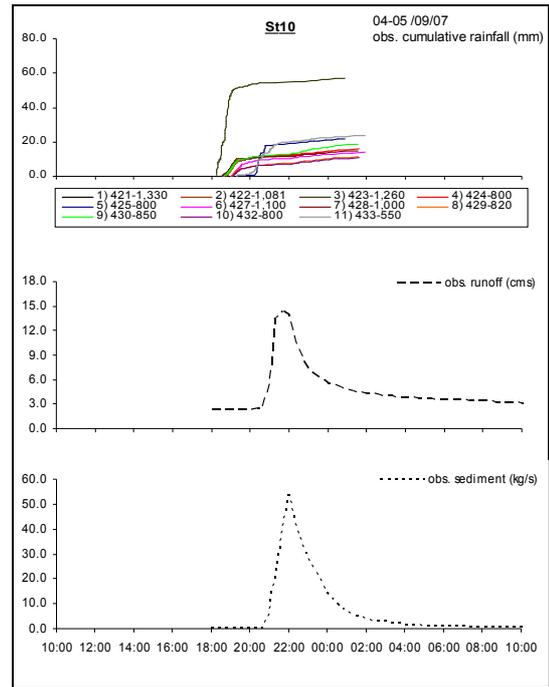


(ซ) สตอร์มที่ 08 วันที่ 29 ก.ค. 50

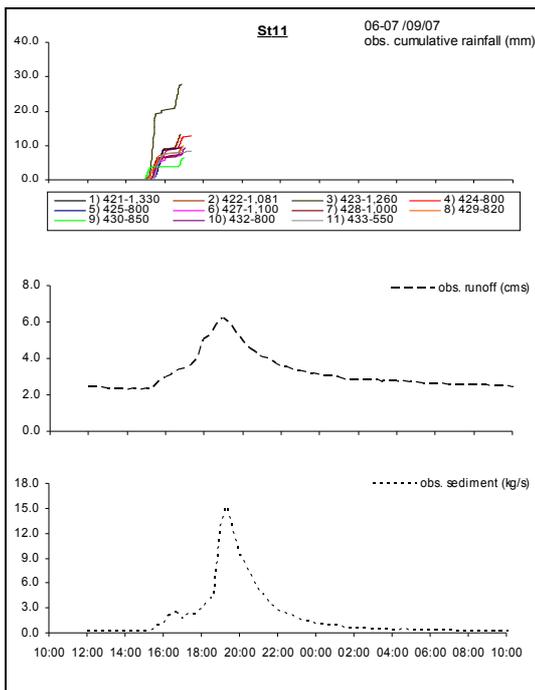
ภาพที่ 21 (ต่อ)



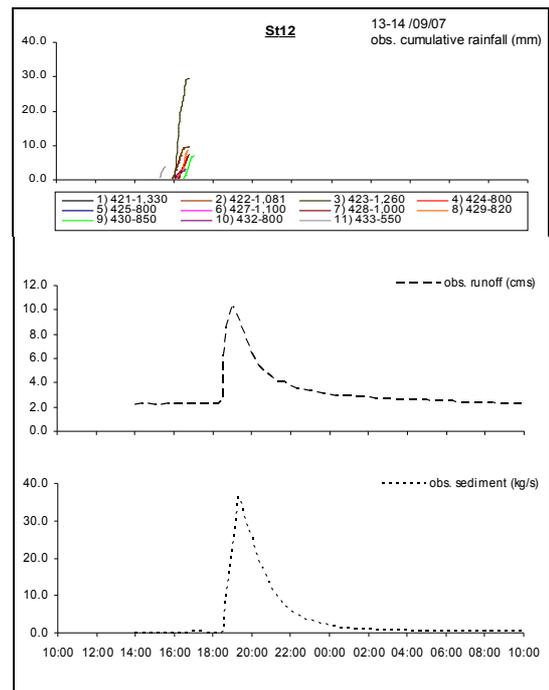
(ฉ) สตอร์มที่ 09 วันที่ 01 ส.ค. 50



(ญ) สตอร์มที่ 10 วันที่ 04 ก.ย. 50

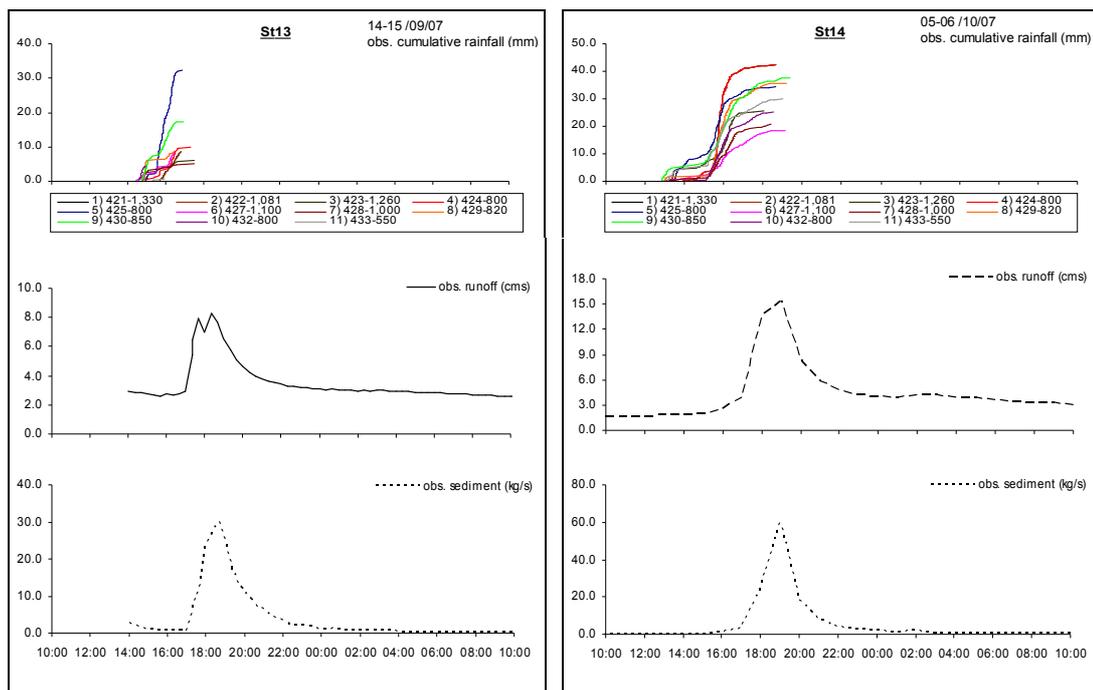


(ฎ) สตอร์มที่ 11 วันที่ 06 ก.ย. 50



(ฏ) สตอร์มที่ 12 วันที่ 13 ก.ย. 50

ภาพที่ 21 (ต่อ)



(ฐ) สตอร์มที่ 13 วันที่ 14 ก.ย. 50

(ฐ) สตอร์มที่ 14 วันที่ 05 ต.ค. 50

ภาพที่ 21 (ต่อ)

จากตารางที่ 2 และภาพที่ 21 พบว่า ปริมาณน้ำฝนที่ตรวจวัดได้ที่สถานีวัดน้ำฝนมีความแตกต่างกันในแต่ละสตอร์ม โดยส่วนใหญ่แล้วในฝนตกครั้งหนึ่งๆ มีสถานีวัดน้ำฝนเพียงหนึ่งสถานีหรือสองสถานีเท่านั้นที่มีปริมาณน้ำฝนมากกว่าสถานีอื่นอย่างเด่นชัด ซึ่งเป็นสถานีที่มีอิทธิพลต่อการเกิดผลผลิตตะกอน อย่างไรก็ตาม การเกิดผลผลิตตะกอนยังขึ้นกับอิทธิพลของลมฟ้าอากาศ สมบัติของดินทั้งกายภาพและชีวภาพ พืชพรรณ กิจกรรมของมนุษย์ และลักษณะภูมิประเทศ และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของลักษณะภูมิประเทศ เช่น ระดับความสูง ทิศด้านลาด ที่มีอิทธิพลต่อผลผลิตตะกอนที่ตรวจวัดได้ พบว่า บริเวณพื้นที่ที่มีระดับความสูงมากกว่ามีปริมาณน้ำฝนที่ตกมากกว่าบริเวณที่มีพื้นที่ต่ำกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของวิชา (2535) ที่พบว่า บริเวณที่เป็นที่ราบนั้น ลมสามารถพัดพาไอน้ำไปได้ไกลกว่าในพื้นที่ที่มีภูเขาหรือพื้นที่ที่มีความขรุขระของสภาพภูมิประเทศ เช่นเดียวกับเกษม (2539) อธิบายว่า พื้นที่ที่อยู่ในระดับสูงมักมีฝนตกมากกว่าในพื้นที่ต่ำ ส่งผลให้ปริมาณน้ำท่ามากขึ้น ส่วนทิศด้านลาดที่อยู่ทางเหนือจะมีความชุ่มชื้นมากกว่าทิศใต้และทิศตะวันตก

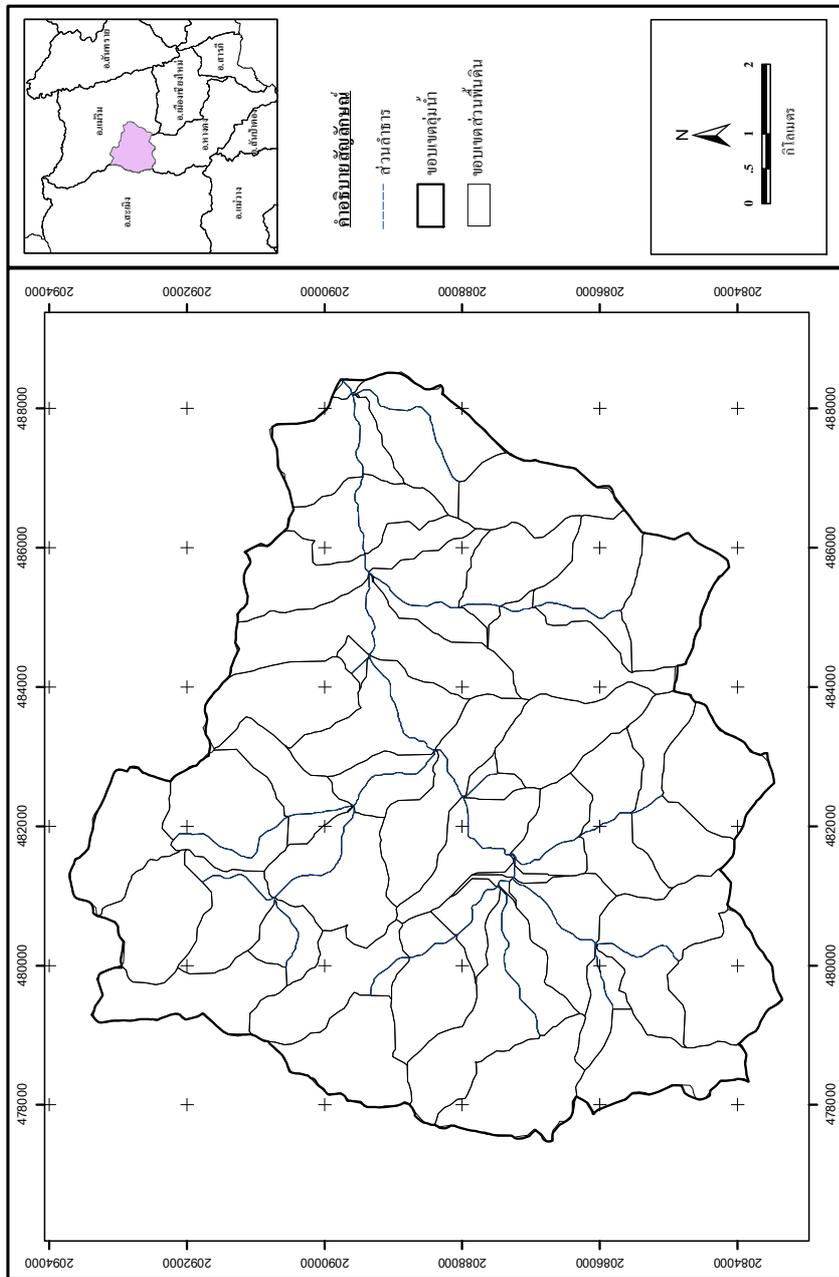
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลของบริเวณที่มีฝนตกมากและอยู่ใกล้กับลำธาร จะเกิดผลผลิตตะกอนสูง สังเกตได้จากข้อมูลตรวจวัดจากสถานีวัดน้ำฝนที่อยู่ใกล้กับลำธาร ได้แก่ สถานีวัดน้ำฝนแม่จะ ผานกกก ห้วยดีหมี และแม่แะ ในวันที่มีฝนตกมากข้อมูลผลผลิตตะกอนที่ตรวจวัดได้มีค่ามากตามไปด้วย เนื่องจากปัจจัยปริมาณน้ำฝนเป็นปัจจัยบ่งบอกถึงพลังงานจลน์ที่สามารถทำให้เม็ดดินแตกกระจายและถูกพัดพาตะกอนออกจากพื้นที่โดยน้ำที่ไหลบ่าหน้าดิน กล่าวคือ ปริมาณน้ำฝนยิ่งมากยิ่งมีความสามารถในการชะล้างพังทลายของดินได้มากตามไปด้วย ประกอบกับหากบริเวณที่ฝนตกอยู่ใกล้ลำธารจะส่งผลให้ระยะทางในการเคลื่อนที่ของตะกอนลงสู่ลำธารสั้นลง มีการทับถมตะกอนบนดินน้อย อีกทั้งในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สามมีลักษณะพืชพรรณเป็นป่าดิบเขาและป่าเบญจพรรณที่ขึ้นปกคลุมมีความหนาแน่นเรือนยอดแผ่ปกคลุมสูง ทำให้พลังงานที่เกิดจากการตกของฝนลดลงโดยชั้นของเรือนยอดดังกล่าว โดยการลดแรงตกกระทบจากเม็ดฝนต่อผิวดินมีน้อย ตะกอนที่เกิดจึงมาจากพลังการกัดเซาะโดยน้ำในลำธารมากกว่าพลังการกัดเซาะโดยฝน

3. ปริมาณน้ำท่า ผลผลิตตะกอน และความเข้มข้นตะกอนสูงสุดที่ได้จากแบบจำลอง KINEROS 2

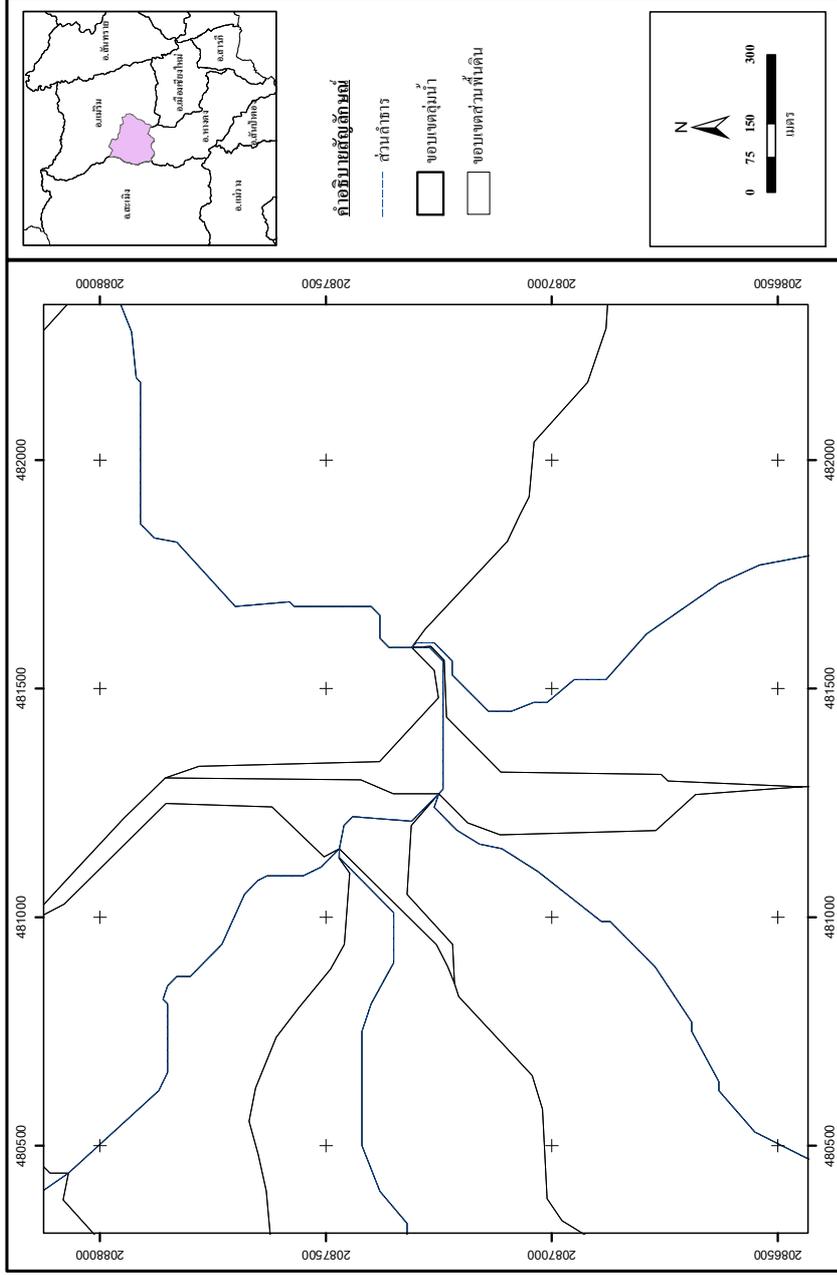
3.1 พื้นที่ลุ่มน้ำและส่วนย่อย

สภาพภูมิประเทศที่วิเคราะห์ไว้ข้างต้น ได้แก่ ชั้นข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model; DEM) ที่มีความละเอียดขนาด 10x10 เมตร ชั้นข้อมูลทิศทางการไหลของน้ำ (flow direction) และชั้นข้อมูลการไหลสะสม (flow accumulation) มาแบ่งส่วนย่อยโดยการทดลองใช้โปรแกรมเสริม extension AGWA คำสั่ง delineate watershed กำหนดทางออกน้ำ (outlet) 1 จุด และกำหนดให้มีพื้นที่รับน้ำต่ำสุดที่ถือว่าเป็นส่วนลำธาร (contributing area; CSA) มีค่าร้อยละ 2.50 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ทำให้ผลการแบ่งส่วนย่อยละเอียดมากที่สุดเท่าที่แบบจำลองสามารถประมวลผลได้ หลังจากประมวลผล พบว่า สามารถแบ่งเป็นส่วนย่อย (spatial unit) แยกเป็นส่วนพื้นดิน (plane element) มีจำนวนเท่ากับ 78 ส่วน และส่วนลำธาร (channel element) มีจำนวนเท่ากับ 33 ส่วน ดังภาพที่ 22

ผลการศึกษา พบว่า ส่วนพื้นดินที่แบบจำลองจำแนกได้มีขนาดใหญ่ที่สุดประมาณ 2.20 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 2.96 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ และเล็กที่สุดมีขนาดประมาณ 0.03 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 0.03 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ และเฉลี่ยมีขนาดประมาณ 0.95 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 1.28 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ในขณะที่ ส่วนลำธารแบบจำลองจำแนกได้ยาวที่สุดประมาณ 2,464 เมตร สั้นที่สุดประมาณ 223 เมตร และเฉลี่ยประมาณ 1,121 เมตร อย่างไรก็ตาม การแบ่งส่วนย่อยโดยแบบจำลองนี้ ยังมีบางส่วนพื้นดินที่มีความผิดพลาด (error) เนื่องจากตามธรรมชาติลักษณะการเกิดลำธาร (channel) ในบางช่วงเกิดบริเวณใกล้เคียงกัน ทำให้เมื่อนำมาเตรียมข้อมูลในรูปแบบ grid file เพื่อนำเข้าแบบจำลองเกิดการซ้อนทับกัน ส่งผลให้การแบ่งส่วนย่อยบางส่วนพื้นดินเกิดการขนานไปกับแนวลำธาร ไม่สมจริงตามที่จะเป็น (ภาพที่ 23) ปัญหาในส่วนนี้ผู้ศึกษาได้แก้ปัญหาโดยการแบ่งส่วนย่อยเอง ซึ่งพิจารณาจากชั้นข้อมูลเส้นชั้นความสูง (contour) และชั้นข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model; DEM) แล้วนำเข้าโปรแกรมเสริม ผลปรากฏว่าไม่สามารถนำเข้าได้ แสดงว่าโปรแกรมไม่อนุญาตให้ผู้ให้แบ่งส่วนย่อยเอง ผู้ศึกษาจึงจำเป็นต้องยอมใช้ส่วนย่อยที่แบ่งโดยโปรแกรมเสริมมาใช้ในการประมาณผลผลิตตะกอนต่อไป



ภาพที่ 22 ส่วนพื้นดินและส่วนลำธาร ที่ถูกแบ่งเพื่อใช้วิเคราะห์ในแบบจำลอง KINEROS 2
บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขแม่ส่า จังหวัดเชียงใหม่

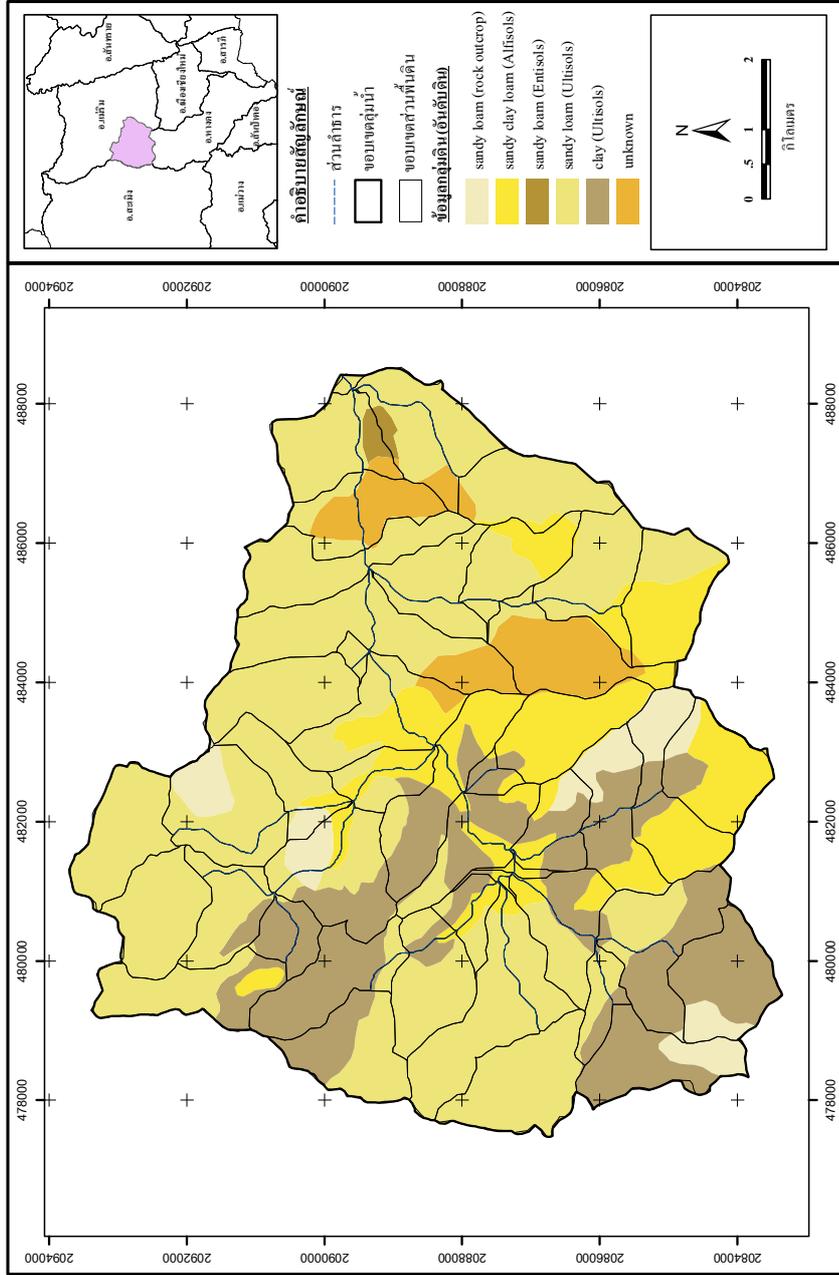


ภาพที่ 23 การแบ่งส่วนย่อยที่ผิดพลาด (error) โดยทาดลองใช้โปรแกรมเสริม extension AGWA

พื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ที่ถูกแบ่งเป็นส่วนย่อยแล้วนำมาซ้อนทับชั้นข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ในปี พ.ศ. 2550 พบว่า ในแต่ละส่วนพื้นดินที่แบ่งได้ส่วนใหญ่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นป่าสมบูรณ์ โดยส่วนพื้นดินที่มีขนาดใหญ่ที่สุดมีการใช้ประโยชน์ที่ดินเป็นป่าสมบูรณ์มากถึงร้อยละ 92.00 ของพื้นที่ส่วน หรือประมาณ 2.02 ตารางกิโลเมตร นอกจากนี้เป็นรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทอื่น และเมื่อพิจารณาการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทนี้ทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำมีขนาดประมาณ 51.12 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 69.01 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ รองลงมา คือ ไม้ผลผสม มีขนาดประมาณ 11.19 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 15.11 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ และ พืชไร่ผสม มีขนาดประมาณ 8.23 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 11.11 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ตามลำดับ มีเพียงส่วนน้อยที่เป็นนาข้าว ป่ารอสภาพฟื้นฟู พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง และพื้นที่แหล่งน้ำ มีขนาดพื้นที่รวมกันประมาณ 3.53 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 4.76 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ดังภาพที่ 24 และเมื่อนำพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สาที่ถูกแบ่งแล้ว มาซ้อนทับข้อมูลลักษณะของดินใหม่ ส่วนพื้นดินที่แบ่งได้ส่วนใหญ่มีลักษณะของดินเป็นแบบเดียวกันทั้งพื้นที่ส่วน โดยส่วนพื้นดินที่มีขนาดใหญ่ที่สุดมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) ทั้งพื้นที่ส่วน และเมื่อพิจารณาทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำลักษณะของดินส่วนใหญ่เป็นดินร่วนปนทราย (sandy loam) มีขนาดประมาณ 43.00 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 58.05 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ รองลงมา คือ ดินเหนียว (clay) มีขนาดประมาณ 15.34 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 20.71 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ดินร่วนเหนียวปนทรายแป้ง (sandy clay loam) มีขนาดประมาณ 11.48 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 15.50 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ และไม่สามารถจำแนกลักษณะของดินได้ (unknown) มีขนาดประมาณ 4.26 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 5.75 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ตามลำดับ ดังภาพที่ 25

3.2 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์

การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ให้มีความเหมาะสมกับสภาพของพื้นที่ลุ่มน้ำ เพื่อความถูกต้องและแม่นยำของการคาดการณ์ของแบบจำลอง KINEROS 2 ประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดผลผลิตตะกอนในส่วนพื้นดินและส่วนลำธาร ทั้งนี้ เพื่อทดสอบว่าพารามิเตอร์ตัวใดที่มีความอ่อนไหว (sensitivity) ต่อการเกิดผลผลิตตะกอนมากที่สุด (ตารางที่ 3) กล่าวคือ เมื่อค่าพารามิเตอร์ใดมีค่าเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ผลผลิตตะกอนที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงในทิศทางเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเลือกสตรอม์ฝนตัวอย่างในเดือนมิถุนายน ตกวันที่ 4 มิถุนายน พ.ศ. 2550 เวลา 12:00:00 น. ถึง เวลา 13:35:00 น. ศึกษาความอ่อนไหวต่อการเกิดผลผลิตตะกอน โดยพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ (เท่าของค่าตั้งต้น) แต่ละตัวกับความเข้มข้นตะกอนสูงสุด (peak sediment flow) ที่ประมาณได้จากแบบจำลอง ในรูปแบบกราฟลอการิทึม (logarithm) ซึ่งมีจุดสูงสุดของความเข้มข้นตะกอน เท่ากับ 50.60 กิโลกรัมต่อวินาที ดังภาพที่ 26 และภาพที่ 27



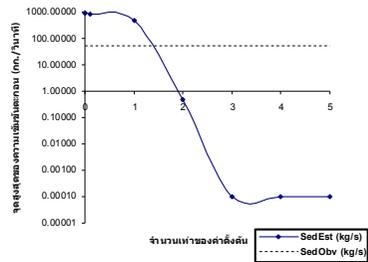
ภาพที่ 25 ลักษณะของดินในแต่ละส่วนพื้นที่ บริเวณพื้นที่คูน้ำสาขามแม่ต๋า จังหวัดเชียงใหม่

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2543) และ Alan (2007)

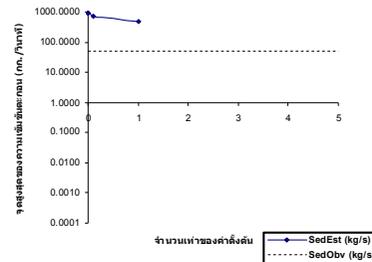
ตารางที่ 3 ร้อยละความคลาดเคลื่อนของการประมาณความเข้มข้นตะกอนสูงสุด

หน่วย: ร้อยละ

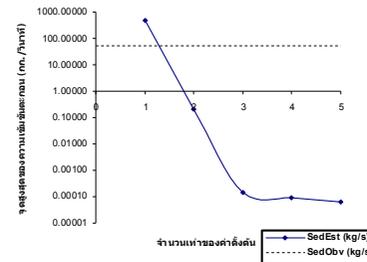
พารามิเตอร์	อัตราการผลิตค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ (เท่าของค่าตั้งต้น)								
	ค่าตั้งต้น	0.001	0.01	0.1	1	2	3	4	5
<u>ส่วนพื้นดิน (plane element)</u>									
- ปริมาณน้ำพีชียด์สูงสุด หน่วยเป็นมิลลิเมตร	1.76	77.56	75.12	69.38	-3.29	-99.90	-100.00	-100.00	-100.00
- ร้อยละการปกคลุมเรือนยอด	69.31	78.69	82.03	40.17	-3.29	-	-	-	-
- สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning	0.024	-	-	-	-3.29	-99.96	-100.00	-100.00	-100.00
- ร้อยละพื้นที่ที่ซึมผ่านไม่ได้	0.005	-	-3.29	-3.29	-3.29	-3.29	-3.29	-3.29	-3.29
- สัมประสิทธิ์การกักชะของฝน	0.117	-4.12	-4.11	-4.04	-3.29	-2.45	-1.62	-0.78	0.06
- สัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่อดินอิ่มตัว	165.89	-	-	-	-3.29	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00
- ค่าเฉลี่ยแรงดึงดูดน้ำของดิน หน่วยเป็นมิลลิเมตร	26.00	351.86	351.10	347.76	-3.29	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00
- สัมประสิทธิ์ความผันแปรของ K_s	0.53	-11.51	-11.51	-11.51	-3.29	7.99	24.71	11211.36	29.39
<u>ส่วนลำธาร (channel element)</u>									
- ความกว้างของลำธาร หน่วยเป็นเมตร	1.74	194.28	194.65	220.79	-3.29	-82.50	-96.89	-99.92	-100.00
- ความลึกของลำธาร หน่วยเป็นเมตร	0.60	-3.29	-3.29	-3.29	-3.29	-3.29	-3.29	-3.29	-3.29
- สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning	0.035	-	-	585.54	-3.29	-98.32	-100.00	-100.00	-100.00
- สัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่อดินอิ่มตัว	210.00	187.30	184.78	166.15	-3.29	-100.00	-100.00	-100.00	-100.00
- ค่าเฉลี่ยแรงดึงดูดน้ำของดิน หน่วยเป็นมิลลิเมตร	101.00	12.23	12.20	11.89	-3.29	-22.68	-29.92	-38.56	-44.00



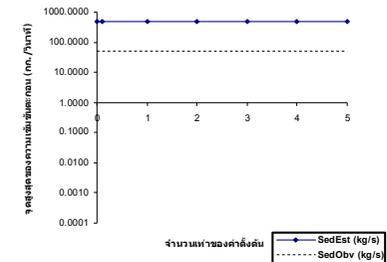
ปริมาณน้ำที่ขีดยึดสูงสุด (มิลลิเมตร)



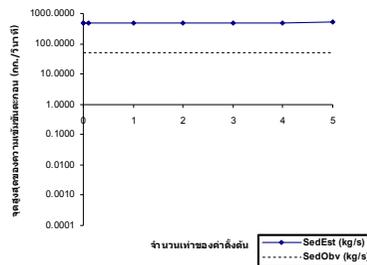
ร้อยละการปกคลุมเรือนยอด



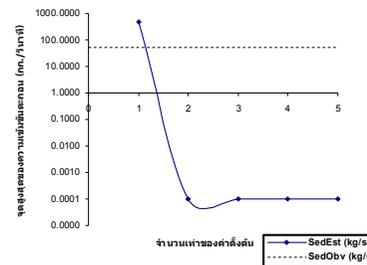
สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning



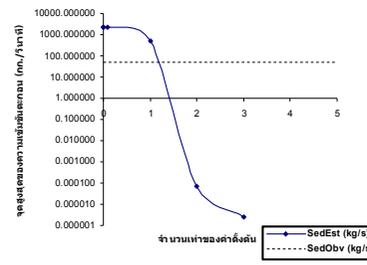
ร้อยละพื้นที่ที่ซึมผ่านไม่ได้



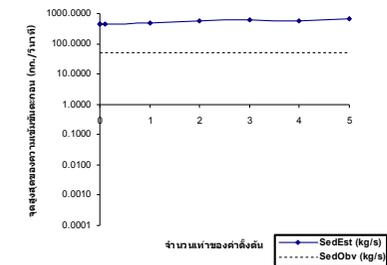
สัมประสิทธิ์การกักตะของฝน



สัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่อดินอิ่มตัว

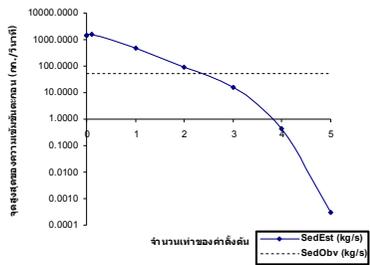


ค่าเฉลี่ยแรงดึงดูดน้ำของดิน

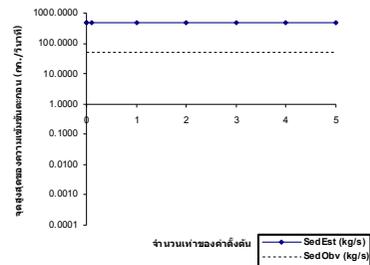


สัมประสิทธิ์ความผันแปรของ K_s

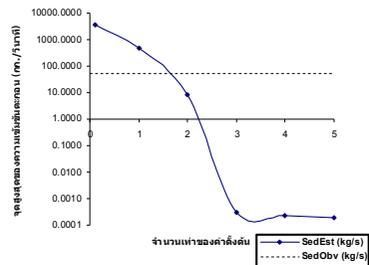
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนค่าตั้งต้นของพารามิเตอร์ในส่วนพื้นดิน กับความเข้มข้นตะกอนสูงสุด



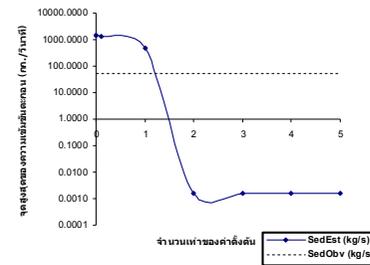
ความกว้างของลำธาร



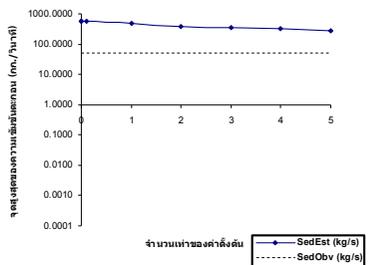
ความลึกของลำธาร



สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning



สัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่อดินอิ่มตัว



ค่าเฉลี่ยแรงดึงดูดน้ำของดิน

ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพารามิเตอร์ของพารามิเตอร์ในส่วนลำธาร กับความเข้มข้นตะกอนสูงสุด

จากภาพที่ 26 ภาพที่ 27 และตารางที่ 3 พบว่า พารามิเตอร์แต่ละตัวมีความอ่อนไหวต่อการเกิดผลผลิตตะกอนแตกต่างกัน คือ พารามิเตอร์ส่วนพื้นดิน ได้แก่ ร้อยละพื้นที่ที่ซึมผ่านไม่ได้ สัมประสิทธิ์ความผันแปรของ K_s และสัมประสิทธิ์การกัดเซาะของฝน มีความอ่อนไหวต่อการเกิดผลผลิตตะกอนน้อยที่สุด กล่าวคือ เมื่อค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงส่งผลให้ผลผลิตตะกอนที่เกิดขึ้นมีความเปลี่ยนแปลงน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย ในขณะที่พารามิเตอร์ปริมาณน้ำพีชียด์สูงสุด ร้อยละการปกคลุมเรือนยอด สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning สัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่อดินอิ่มตัว และค่าเฉลี่ยแรงดึงดูดน้ำของดิน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าส่งผลให้ผลผลิตตะกอนที่เกิดขึ้นมีความเปลี่ยนแปลงมาก โดยหากมีค่ามากขึ้นผลผลิตตะกอนที่ประมาณได้มีค่าน้อยลงจนถึงจุดๆ หนึ่งแล้วจะคงที่ โดยพารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวมากที่สุดในส่วนพื้นดิน คือ ค่าเฉลี่ยแรงดึงดูดน้ำของดิน รองลงมา คือ สัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่อดินอิ่มตัว ปริมาณน้ำพีชียด์สูงสุด สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning และร้อยละการปกคลุมเรือนยอด ตามลำดับ

สำหรับส่วนลำธาร พารามิเตอร์ความลึกของลำธารและค่าเฉลี่ยแรงดึงดูดน้ำของดินมีความอ่อนไหวต่อการเกิดผลผลิตตะกอนน้อยที่สุด กล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าส่งผลให้ผลผลิตตะกอนที่เกิดขึ้นมีความเปลี่ยนแปลงน้อยหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย ในขณะที่พารามิเตอร์ความกว้างของลำธาร เมื่อพารามิเตอร์มีค่ามากขึ้นผลผลิตตะกอนที่ประมาณได้ยังมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ ส่วนพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning และสัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่อดินอิ่มตัว เมื่อพารามิเตอร์มีค่ามากขึ้นผลผลิตตะกอนที่ประมาณได้มีค่าน้อยลงจนถึงจุดๆ หนึ่งแล้วคงที่สามารถสรุปได้ว่า พารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวมากที่สุดในส่วนลำธาร คือ ความกว้างของลำธาร รองลงมา คือ สัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่อดินอิ่มตัว และสัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ตามลำดับ โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ได้ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในแบบจำลอง KINEROS 2 ที่มีผลต่อการเกิด
ผลผลิตตะกอน ทั้งส่วนพื้นดินและส่วนลำธาร

พารามิเตอร์	ความสัมพันธ์	
	ค่าพารามิเตอร์	ความเข้มข้นตะกอน (กก./วินาที)
<u>ส่วนพื้นดิน (plane element)</u>		
- ปริมาณน้ำพีชชีดสูงสุด	↑	↓
- ร้อยละการปกคลุมเรือนยอด	↑	↓
- สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning	↑	↓
- ร้อยละพื้นที่ที่ซึมผ่านไม่ได้	↑	↓
- สัมประสิทธิ์การกักตะกอนของฝน	↑	↑
- สัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่อดินอิ่มตัว	↑	↓
- ค่าเฉลี่ยแรงดึงดูดน้ำของดิน	↑	↓
- สัมประสิทธิ์ความผันแปรของ K_s	↑	คงที่
<u>ส่วนลำธาร (channel element)</u>		
- ความกว้างของลำธาร	↑	↓
- ความลึกของลำธาร	↑	↓
- สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning	↑	↓
- สัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่อดินอิ่มตัว	↑	↓
- ค่าเฉลี่ยแรงดึงดูดน้ำของดิน	↑	↓

จากตารางที่ 4 พบว่า ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งส่วนพื้นดิน และส่วนลำธารมีผลต่อการเกิดผลผลิตตะกอนแตกต่างกัน โดยพารามิเตอร์ส่วนพื้นดิน ได้แก่ ปริมาณน้ำพีชชีดสูงสุด ร้อยละการปกคลุมเรือนยอด สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ร้อยละพื้นที่ที่ซึมผ่านไม่ได้ ค่าเฉลี่ยแรงดึงดูดน้ำของดิน และสัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่อดินอิ่มตัว มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับผลผลิตตะกอน กล่าวคือ เมื่อมีค่าเพิ่มมากขึ้นแล้ว ผลผลิตตะกอนที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง ส่วนสัมประสิทธิ์การกักตะกอนของฝน มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับผลผลิตตะกอน กล่าวคือ เมื่อมีค่าเพิ่มมากขึ้นแล้ว ผลผลิตตะกอนที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย สำหรับส่วนลำธาร พารามิเตอร์ส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับผลผลิตตะกอน ได้แก่ ความกว้างของลำธาร ความลึกของลำธาร สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning ค่าเฉลี่ยแรงดึงดูดน้ำของดิน กล่าวคือ เมื่อมีค่าเพิ่มมากขึ้นแล้ว ผลผลิตตะกอนที่เกิดขึ้นมีค่าลดลง

อย่างไรก็ตาม ในการปรับค่าพารามิเตอร์ให้มีความเหมาะสมกับสภาพของพื้นที่ลุ่มน้ำตามหลักเกณฑ์แล้วควรปรับพารามิเตอร์ตัวที่มีความอ่อนไหวต่อการเกิดผลผลิตตะกอนมากที่สุด ผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับทุกค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง KINEROS 2 ผลปรากฏว่า เมื่อพิจารณาทุกสตอร์มที่เลือกศึกษาแล้วพารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวมากที่สุดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า คือ สัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่อดินอิ่มตัว ผลการปรับเทียบพารามิเตอร์ในแต่ละสตอร์มของแต่ละพารามิเตอร์ ปรากฏดังตารางที่ 5

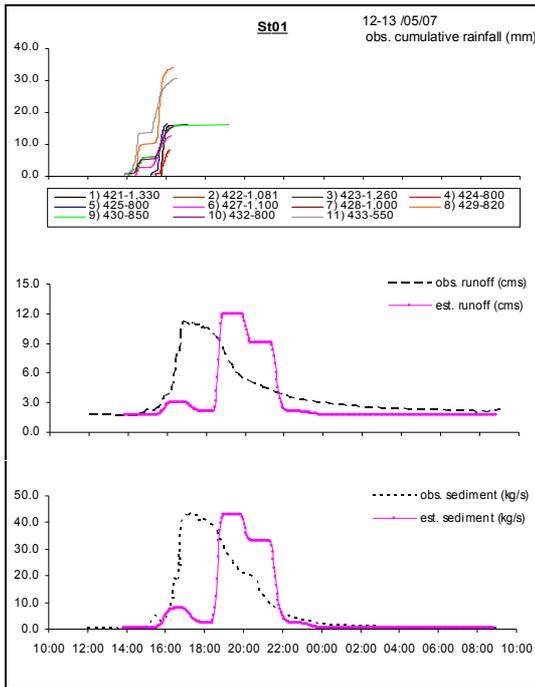
ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเทียบแล้ว เพื่อประมาณผลผลิตตะกอนในแบบจำลอง KINEROS 2

พารามิเตอร์	ค่า
<u>ส่วนพื้นดิน (plane element)</u>	
- ปริมาณน้ำพืชยึดสูงสุด หน่วยเป็นมิลลิเมตร	1.784
- ร้อยละการปกคลุมเรือนยอด หน่วยเป็นร้อยละ	69.797
- สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning	0.024
- ร้อยละพื้นที่ที่ซึมผ่านไม่ได้ หน่วยเป็นร้อยละ	0.005
- สัมประสิทธิ์การกัดชะของฝน	0.117
- สัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่อดินอิ่มตัว หน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อชั่วโมง	
- ดินเหนียว (clay)	25.355
- ดินร่วนปนทราย (sandy loam)	102.612
- ดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy loam clay)	131.539
- ค่าเฉลี่ยแรงดึงดูดน้ำของดิน หน่วยเป็นมิลลิเมตร	26.003
- สัมประสิทธิ์ความผันแปรของ K_s	0.531
<u>ส่วนลำธาร (Channel element)</u>	
- ความกว้างของลำธาร หน่วยเป็นเมตร	1.744
- ความลึกของลำธาร หน่วยเป็นเมตร	0.601
- สัมประสิทธิ์ความขรุขระของ Manning	0.035
- สัมประสิทธิ์การนำน้ำของดินเมื่อดินอิ่มตัว (K_s) หน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อชั่วโมง	210.000
- ค่าเฉลี่ยแรงดึงดูดน้ำของดิน หน่วยเป็นมิลลิเมตร	101.000

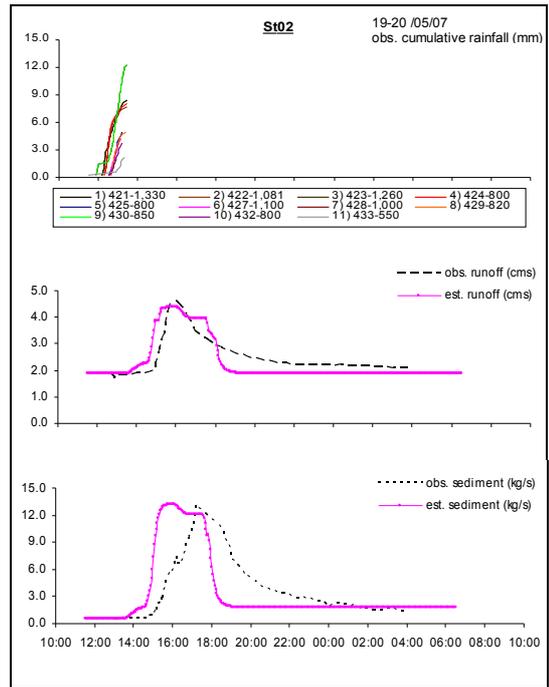
3.3 ปริมาณน้ำท่าที่ประมาณได้จากแบบจำลอง

เมื่อได้ชุดพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมสำหรับใช้ประมาณผลผลิตตะกอนแล้ว ก่อนทำการประมาณผลผลิตตะกอนจำเป็นต้องประมาณปริมาณน้ำท่าให้มีความถูกต้องก่อน เนื่องจากปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอนที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์ดังกล่าวในข้อ 1.2 หลังจากนั้นจึงนำเพิ่มข้อมูลลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะของดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลน้ำฝน ทำการประมาณปริมาณน้ำท่าก่อนจากฝนทั้ง 14 สถานี ที่เลือกไว้ดังกล่าวในข้อ 2 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เปรียบเทียบแล้วบนส่วนพื้นดินและส่วนลำธาร ได้ผลการศึกษาปรากฏดังภาพที่ 28 และตารางที่ 6

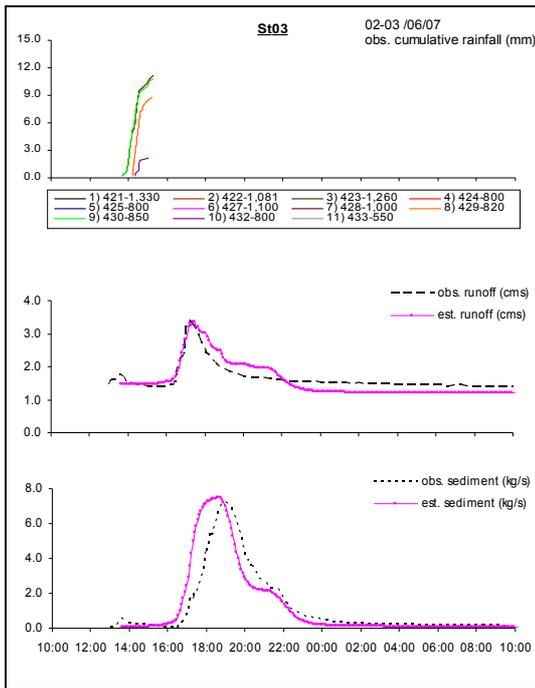
จากผลการศึกษาในตารางที่ 6 และภาพที่ 28 อธิบายได้ว่าแบบจำลอง KINEROS 2 สามารถประมาณปริมาณน้ำท่าได้ในเชิงปริมาณและลักษณะความผันแปรแต่ละช่วงเวลาของการเกิดปริมาณน้ำท่า ได้ และส่วนใหญ่ประเมินได้ต่ำกว่าค่าตรวจวัด และเมื่อพิจารณาปริมาณน้ำท่าในแต่ละสถานี พบว่า ส่วนใหญ่ในช่วงปลายฤดูฝน ระหว่างเดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคม มีปริมาณน้ำท่ามากกว่าในช่วงต้นและกลางฤดูฝน เนื่องจากเป็นช่วงที่มีฝนตกหนักประกอบการมีน้ำไหลสะสมในลำธารมากกว่าช่วงอื่นๆ ทำให้มีปริมาณน้ำท่าที่ตรวจวัดได้สูงตามไปด้วย ซึ่งมีสถานีที่เลือกศึกษาทั้งหมด 5 สถานี โดยในวันที่ 13 กันยายน มีปริมาณน้ำท่าวัดได้ 2.44×10^5 ลูกบาศก์เมตร ประมาณได้จากแบบจำลอง 2.31×10^5 ลูกบาศก์เมตร มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณโดยได้ผลต่ำกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 6.24 รองลงมา คือ ในวันที่ 10 ตุลาคม มีปริมาณน้ำท่าวัดได้ 1.65×10^5 ลูกบาศก์เมตร ประมาณได้จากแบบจำลอง 2.74×10^5 ลูกบาศก์เมตร มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณโดยได้ผลสูงกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 31.25 ส่วนในวันที่ 4 กันยายน มีปริมาณน้ำท่าวัดได้น้อยที่สุดเท่ากับ 1.12×10^5 ลูกบาศก์เมตร ประมาณได้จากแบบจำลอง 3.23×10^5 ลูกบาศก์เมตร มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณโดยได้ผลสูงกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 65.07 ตามลำดับ



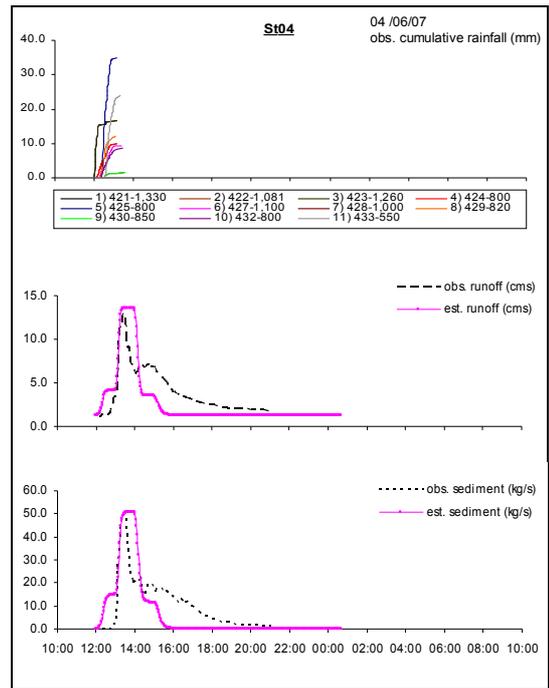
(ก) สตอร์มที่ 01 วันที่ 12 พ.ค. 50



(ข) สตอร์มที่ 02 วันที่ 19 พ.ค. 50

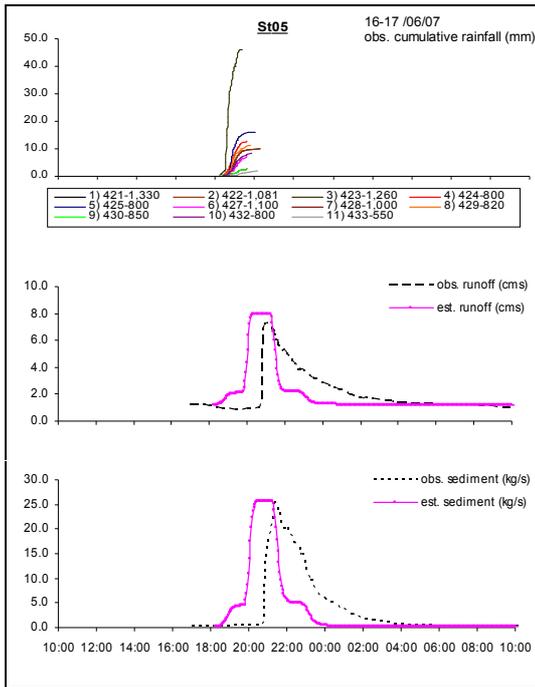


(ค) สตอร์มที่ 03 วันที่ 02 มิ.ย. 50

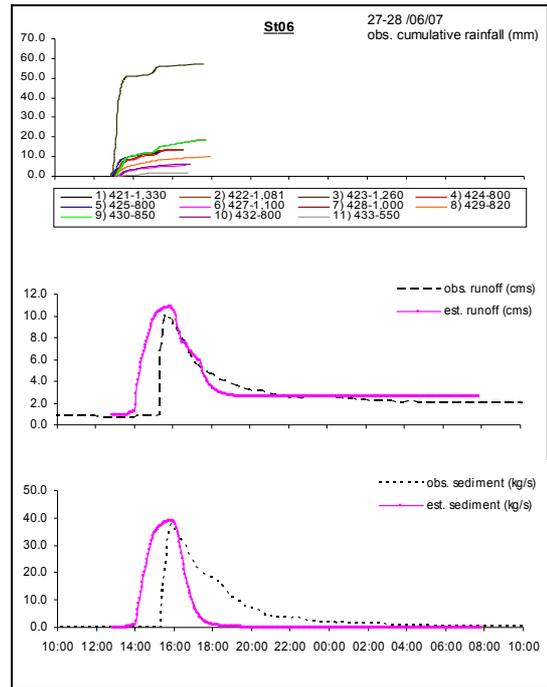


(ง) สตอร์มที่ 04 วันที่ 04 มิ.ย. 50

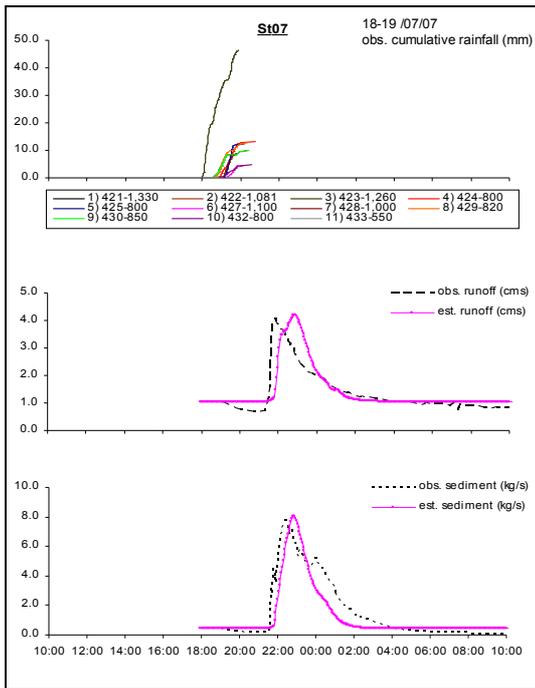
ภาพที่ 28 ปริมาณน้ำฝน น้ำท่า และความเข้มข้นตะกอนที่ประมาณได้จากแบบจำลอง KINEROS 2 เปรียบเทียบกับที่ตรวจวัดได้ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550



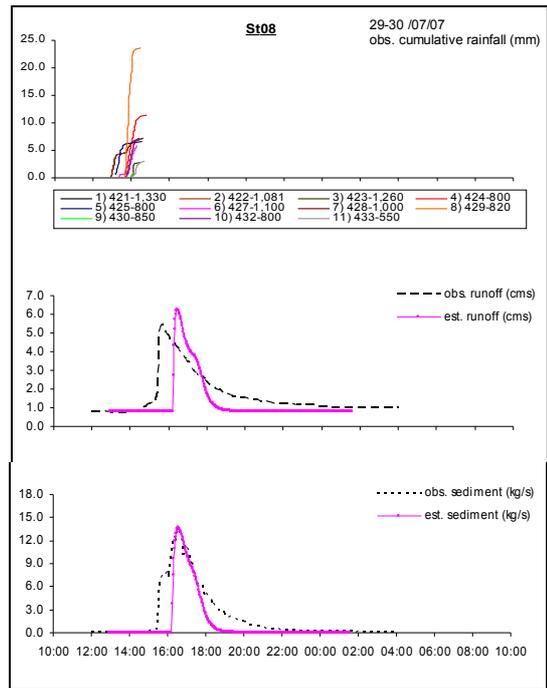
(จ) สตอร์มที่ 05 วันที่ 16 มิ.ย. 50



(ฉ) สตอร์มที่ 06 วันที่ 27 มิ.ย. 50

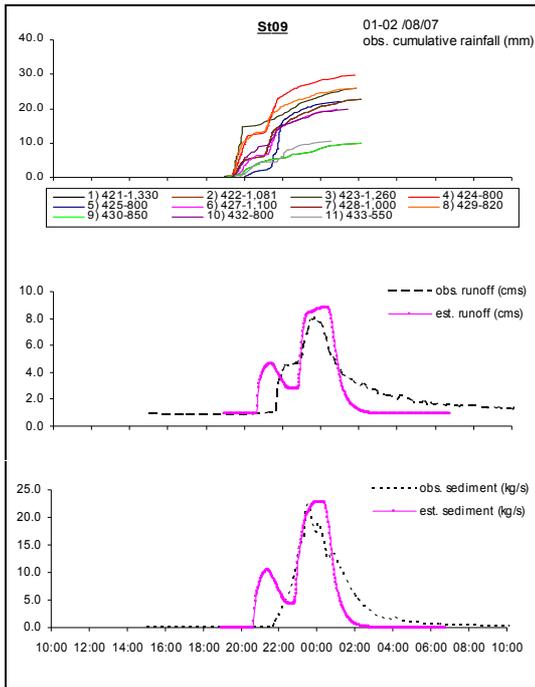


(ช) สตอร์มที่ 07 วันที่ 18 ก.ค. 50

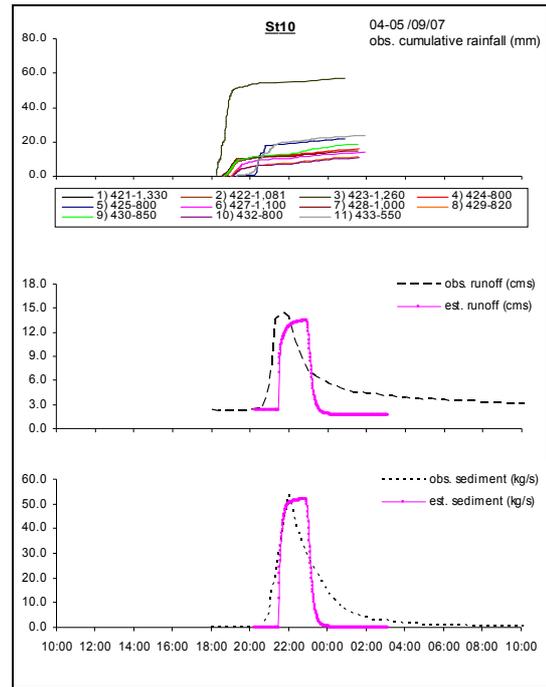


(ซ) สตอร์มที่ 08 วันที่ 29 ก.ค. 50

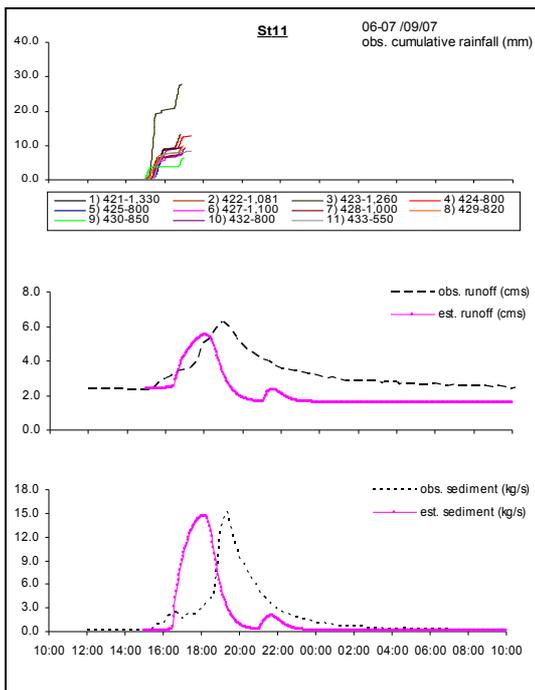
ภาพที่ 28 (ต่อ)



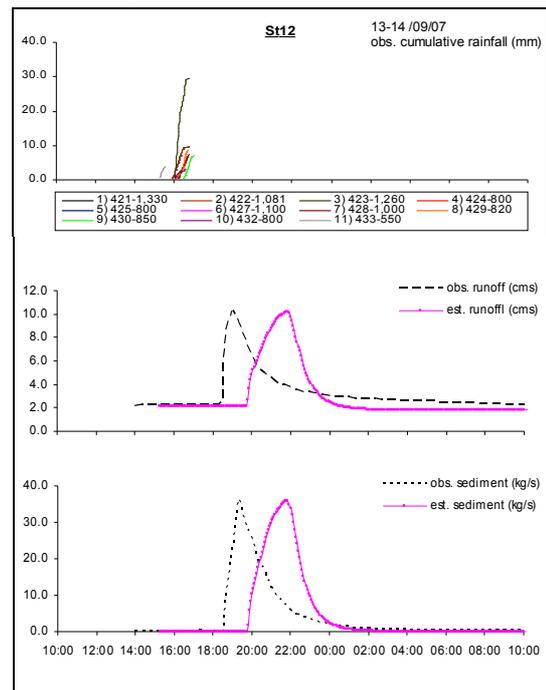
(ฉ) สตอร์มที่ 09 วันที่ 01 ส.ค. 50



(ญ) สตอร์มที่ 10 วันที่ 04 ก.ย. 50

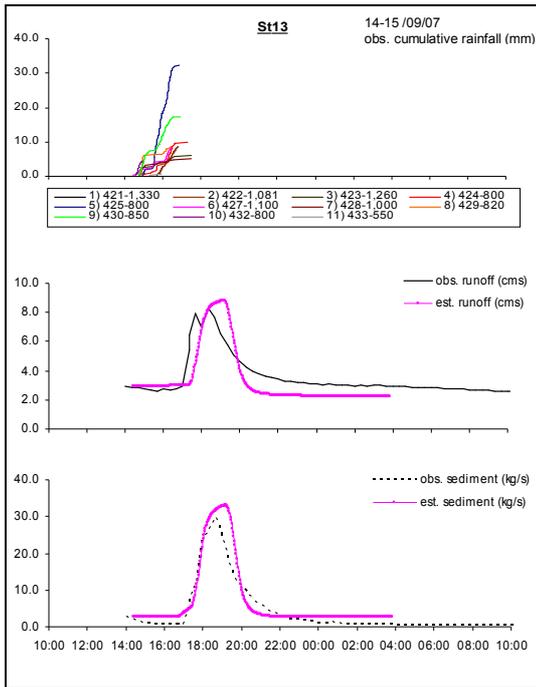


(ฎ) สตอร์มที่ 11 วันที่ 06 ก.ย. 50

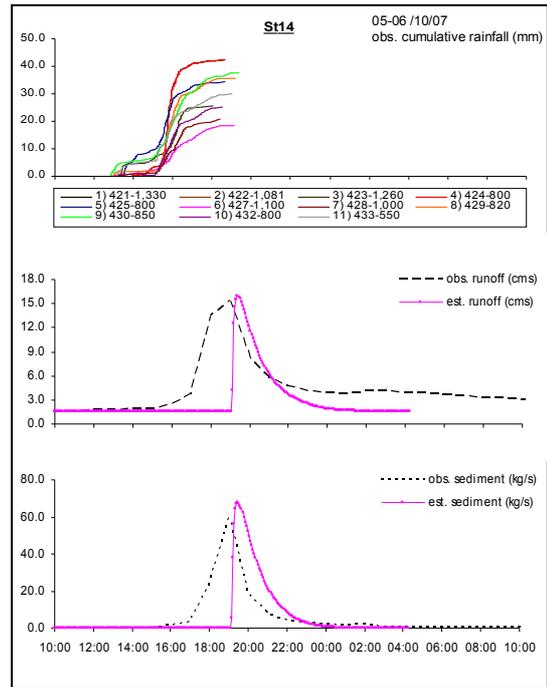


(ฏ) สตอร์มที่ 12 วันที่ 13 ก.ย. 50

ภาพที่ 28 (ต่อ)



(ฐ) สตอร์มที่ 13 วันที่ 14 ก.ย. 50



(ฐ) สตอร์มที่ 14 วันที่ 05 ต.ค. 50

ภาพที่ 28 (ต่อ)

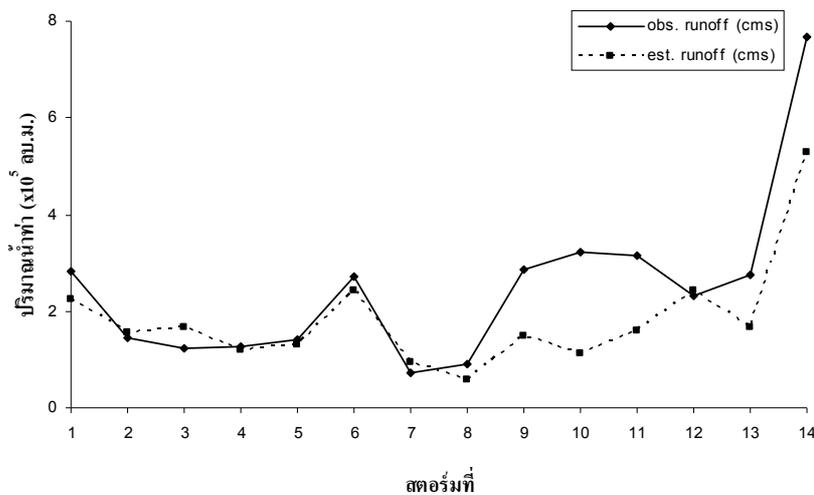
ตารางที่ 6 ปริมาณน้ำท่า ผลผลิตตะกอน ความเข้มข้นตะกอนสูงสุด ที่ประมาณได้โดยใช้แบบจำลอง KINEROS 2

สตอร์ม ที่	วัน เดือน ปี	ข้อมูลจากการตรวจวัด				ผลจากการประมาณโดยแบบจำลอง			ความคลาดเคลื่อนจากการประมาณ (ร้อยละ)		
		ปริมาณ น้ำฝนเฉลี่ย ทุกสถานี	ปริมาณ น้ำท่า	ผลผลิต ตะกอน	ความเข้มข้น ตะกอนสูงสุด	ปริมาณ น้ำท่า	ผลผลิต ตะกอน	ความเข้มข้น ตะกอนสูงสุด	ปริมาณ น้ำท่า	ผลผลิต ตะกอน	ความเข้มข้น ตะกอนสูงสุด
		(มม.)	(ลบ.ม.)	(ตัน)	(กก./วินาที)	(ลบ.ม.)	(ตัน)	(กก./วินาที)			
1	12/05/07	17.57	2.84x10 ⁵	597.48	43.40	2.25x10 ⁵	491.17	43.13	-20.61	-17.79	-0.62
2	19/05/07	7.27	1.44x10 ⁵	218.98	13.14	1.56x10 ⁵	226.87	13.17	8.50	3.60	0.23
3	02/06/07	8.52	1.23x10 ⁵	86.18	7.23	1.65x10 ⁵	95.86	7.48	34.93	11.24	3.46
4	04/06/07	13.53	1.25x10 ⁵	321.48	50.74	1.20x10 ⁵	277.06	50.66	-3.42	-13.82	-0.16
5	16/06/07	11.75	1.40x10 ⁵	225.06	25.33	1.30x10 ⁵	197.73	25.75	-6.55	-12.14	1.66
6	27/06/07	15.82	2.71x10 ⁵	422.55	38.23	2.43x10 ⁵	315.07	39.08	-10.15	-25.44	2.22
7	18/07/07	11.99	7.16x10 ⁴	81.41	7.80	9.32x10 ⁴	76.57	8.08	30.18	-5.94	3.59
8	29/07/07	7.23	9.13x10 ⁴	107.47	13.51	5.91x10 ⁴	60.00	13.69	35.28	-44.17	1.33
9	01/08/07	20.19	2.85x10 ⁵	213.59	22.50	1.50x10 ⁵	210.02	22.74	-47.16	-1.67	1.07
10	04/09/07	19.82	3.23x10 ⁵	429.67	54.05	1.12x10 ⁵	295.92	51.78	65.07	-31.13	-4.20
11	06/09/07	12.92	3.16x10 ⁵	155.93	15.28	1.59x10 ⁵	115.21	14.69	49.43	-26.12	-3.86
12	13/09/07	9.82	2.31x10 ⁵	272.28	36.56	2.44x10 ⁵	305.44	35.95	-6.24	12.18	-1.67
13	14/09/07	10.28	2.74x10 ⁵	287.75	30.12	1.65x10 ⁵	343.14	33.05	39.69	19.25	9.73
14	05/10/07	32.53	7.69x10 ⁵	494.25	59.78	5.28x10 ⁵	390.09	67.87	-31.25	-21.07	13.53

ช่วงต้นฤดูฝน ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนมิถุนายน มีสตอร์มที่เลือกศึกษาทั้งหมด 6 สตอร์ม จากการศึกษาพบว่า ในวันที่ 12 มิถุนายน มีปริมาณน้ำท่าวัดได้ 2.84×10^5 ลูกบาศก์เมตร ประมาณได้จากแบบจำลอง 2.55×10^5 ลูกบาศก์เมตร มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณโดยได้ผลต่ำกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 20.61 รองลงมา คือ ในวันที่ 27 มิถุนายน มีปริมาณน้ำท่าวัดได้ 2.71×10^5 ลูกบาศก์เมตร ประมาณได้จากแบบจำลอง 2.43×10^5 ลูกบาศก์เมตร มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณโดยได้ผลต่ำกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 10.15 ส่วนในวันที่ 2 มิถุนายน มีปริมาณน้ำท่าวัดได้น้อยที่สุดเท่ากับ 1.23×10^5 ลูกบาศก์เมตร ประมาณได้จากแบบจำลอง 1.65×10^5 ลูกบาศก์เมตร มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณโดยได้ผลสูงกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 34.93 ตามลำดับ

สำหรับช่วงกลางฤดูฝน ระหว่างเดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคม มีสตอร์มที่เลือกศึกษาทั้งหมด 3 สตอร์ม จากการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำท่าในช่วงนี้มีค่าไม่มากนัก โดยในวันที่ 1 สิงหาคม มีปริมาณน้ำท่าวัดได้ 1.50×10^5 ลูกบาศก์เมตร ประมาณได้จากแบบจำลอง 2.85×10^5 ลูกบาศก์เมตร มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณโดยได้ผลสูงกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 47.16 รองลงมา คือ ในวันที่ 18 กรกฎาคม มีปริมาณน้ำท่าวัดได้ 9.32×10^4 ลูกบาศก์เมตร ประมาณได้จากแบบจำลอง 7.16×10^4 ลูกบาศก์เมตร มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณโดยได้ผลต่ำกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 30.18 ส่วนในวันที่ 29 กรกฎาคม มีปริมาณน้ำท่าวัดได้น้อยที่สุด 5.91×10^4 ลูกบาศก์เมตร ประมาณได้จากแบบจำลอง 9.13×10^4 ลูกบาศก์เมตร มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณโดยได้ผลสูงกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 35.28 ตามลำดับ

เมื่อนำปริมาณน้ำท่าที่ประมาณได้และตรวจวัดจากภาคสนามมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกัน พบว่า มีแนวโน้มความสัมพันธ์ที่ชัดเจนเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือสามารถประมาณปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง KINEROS 2 ได้ใกล้เคียงกับปริมาณน้ำท่าที่ตรวจวัดจากภาคสนาม ดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าที่ประมาณได้กับที่ตรวจวัดจากภาคสนาม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550

3.4 ผลผลิตตะกอนและความเข้มข้นตะกอนสูงสุดที่ประมาณได้จากแบบจำลอง

เมื่อนำเพิ่มข้อมูลลักษณะภูมิประเทศ ลักษณะของดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลน้ำฝน ทำการประมาณค่าผลผลิตตะกอนจากฝนทั้ง 14 สตอร์ม ที่เลือกไว้ดังกล่าวในข้อ 2 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเทียบแล้วบนส่วนพื้นดินและส่วนลำธาร ได้ผลการศึกษาดังที่กล่าวไว้แล้ว ดังภาพที่ 28 และตารางที่ 6

จากผลการศึกษาในตารางที่ 6 และภาพที่ 28 อธิบายได้ว่าแบบจำลอง KINEROS 2 สามารถประมาณผลผลิตตะกอนได้ในเชิงปริมาณ ลักษณะความผันแปรแต่ละช่วงเวลาของการเกิดผลผลิตตะกอนและความเข้มข้นตะกอนสูงสุด (peak sediment flow) ได้ และส่วนใหญ่ประเมินได้ต่ำกว่าค่าตรวจวัด เมื่อพิจารณาผลผลิตตะกอนในแต่ละสตอร์มในช่วงต้นฤดูฝน ระหว่างเดือนพฤษภาคมถึงเดือนมิถุนายน มีสตอร์มที่เลือกศึกษาทั้งหมด 6 สตอร์ม จากการศึกษาพบว่า ในช่วงนี้มีผลผลิตตะกอนสูงกว่าช่วงเวลาอื่นๆ โดยในวันที่ 12 มิถุนายน มีผลผลิตตะกอนวัดได้ 597.48 ตัน ประมาณได้จากแบบจำลอง 491.17 ตัน มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณ โดยได้ผลต่ำกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 17.79 วัดความเข้มข้นตะกอนสูงสุดที่ประมาณจากแบบจำลองได้ 43.13 กิโลกรัมต่อวินาที ในขณะที่วัดจริงได้ 43.40 กิโลกรัมต่อวินาที รองลงมา คือ ตะกอนที่เกิดในวันที่ 27 มิถุนายน มีผลผลิตตะกอนวัดได้ 422.55 ตัน ประมาณได้จากแบบจำลอง 315.07 ตัน มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณ โดยได้ผลต่ำกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 25.44 วัดความเข้มข้นตะกอน

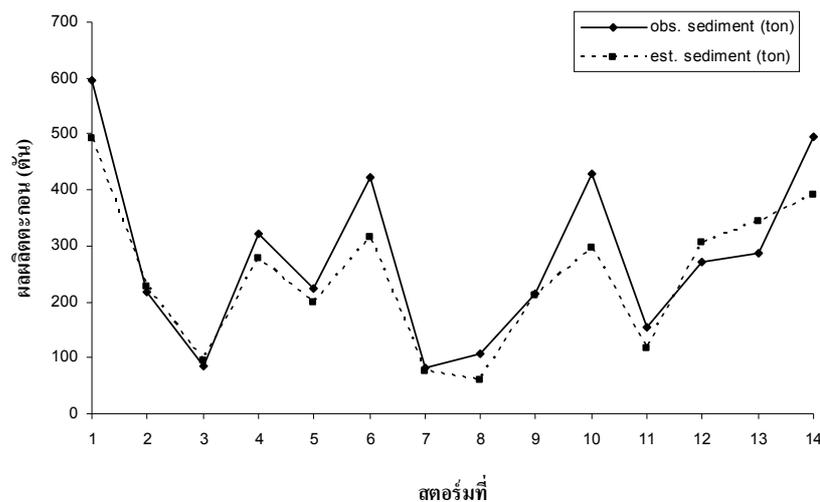
สูงสุดที่ประมาณจากแบบจำลองได้ 39.08 กิโลกรัมต่อวินาที ในขณะที่วัดจริงได้ 38.23 กิโลกรัมต่อวินาที ส่วนวันที่ 2 มิถุนายน เป็นสตอร์มที่มีผลผลิตตะกอนน้อยที่สุดในช่วงต้นฤดูฝน วัดได้ 86.18 ตัน ประมาณได้จากแบบจำลอง 95.86 ตัน มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณ โดยได้ผลสูงกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 5.94 วัดความเข้มข้นตะกอนสูงสุดที่ประมาณจากแบบจำลองได้ 7.48 กิโลกรัมต่อวินาที ในขณะที่วัดจริงได้ 7.23 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ

สำหรับในช่วงกลางฤดูฝน ระหว่างเดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคม มีสตอร์มที่เลือกศึกษาทั้งหมด 3 สตอร์ม จากการศึกษาพบว่า ผลผลิตตะกอนในช่วงนี้มีค่าไม่มากนัก โดยในวันที่ 1 สิงหาคม มีผลผลิตตะกอนวัดได้ 213.59 ตัน ประมาณได้จากแบบจำลอง 210.02 ตัน มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณ โดยได้ผลต่ำกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 1.67 วัดความเข้มข้นตะกอนสูงสุดที่ประมาณจากแบบจำลองได้ 22.74 กิโลกรัมต่อวินาที ในขณะที่วัดจริงได้ 22.50 กิโลกรัมต่อวินาที รองลงมา คือ ตะกอนที่เกิดในวันที่ 29 กรกฎาคม มีผลผลิตตะกอนวัดได้ 107.47 ตัน ประมาณได้จากแบบจำลอง 60.00 ตัน มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณ โดยได้ผลต่ำกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 44.17 วัดความเข้มข้นตะกอนสูงสุดที่ประมาณจากแบบจำลองได้ 13.69 กิโลกรัมต่อวินาที ในขณะที่วัดจริงได้ 13.51 กิโลกรัมต่อวินาที และในวันที่ 18 กรกฎาคม มีผลผลิตตะกอนวัดได้ 81.41 ตัน ประมาณได้จากแบบจำลอง 76.57 ตัน มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณ โดยได้ผลต่ำกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 5.94 วัดความเข้มข้นตะกอนสูงสุดที่ประมาณจากแบบจำลองได้ 8.08 กิโลกรัมต่อวินาที ในขณะที่วัดจริงได้ 7.80 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ

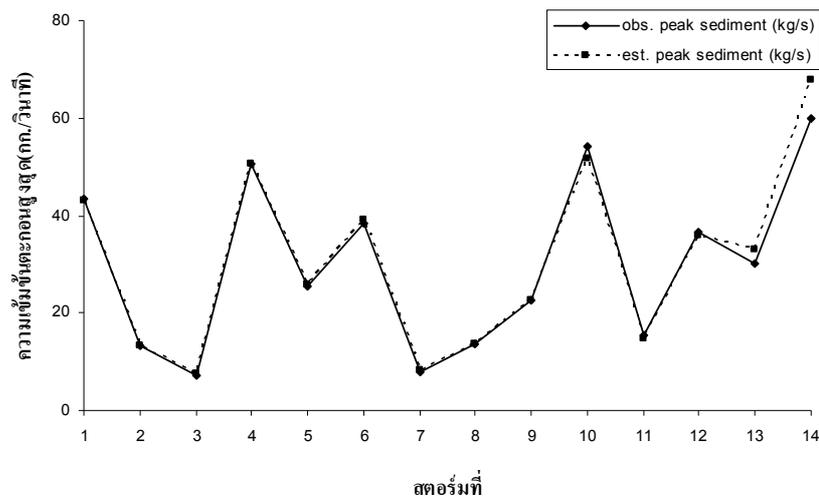
ช่วงปลายฤดูฝน ระหว่างเดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคม มีสตอร์มที่เลือกศึกษาทั้งหมด 5 สตอร์ม เมื่อพิจารณาผลผลิตตะกอน พบว่า ในช่วงนี้เริ่มมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากช่วงกลางฤดูฝน ทั้งนี้ อาจเนื่องจากลักษณะการตกของฝนในประเทศไทยเป็นฝนทิ้งช่วง กล่าวคือ ฝนตกในช่วงต้นฤดูฝน และทิ้งช่วงการตกในช่วงกลางฤดูฝน และกลับมาตกอีกครั้งหนึ่งในช่วงปลายฤดูฝน โดยในวันที่ 5 ตุลาคม มีผลผลิตตะกอนวัดได้ 494.25 ตัน ประมาณได้จากแบบจำลอง 390.09 ตัน มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณ โดยได้ผลต่ำกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 21.07 วัดความเข้มข้นตะกอนสูงสุดที่ประมาณจากแบบจำลองได้ 67.87 กิโลกรัมต่อวินาที ในขณะที่วัดจริงได้ 59.78 กิโลกรัมต่อวินาที รองลงมา คือ ในวันที่ 4 กันยายน มีผลผลิตตะกอนวัดได้ 429.67 ตัน ประมาณได้จากแบบจำลอง 295.92 ตัน มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณ โดยได้ผลต่ำกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 31.13 วัดความเข้มข้นตะกอนสูงสุดที่ประมาณจากแบบจำลองได้ 51.78 กิโลกรัมต่อวินาที ในขณะที่วัดจริงได้ 54.05 กิโลกรัมต่อวินาที ส่วนในวันที่ 6 กันยายน เป็นสตอร์มที่มีผลผลิตตะกอนน้อยที่สุดในช่วงปลายฤดูฝน มีผลผลิตตะกอนวัดได้ 155.93 ตัน ประมาณได้จากแบบจำลอง 155.21

ต้น มีความคลาดเคลื่อนจากการประมาณโดยได้ผลต่ำกว่าข้อมูลที่ตรวจวัด ร้อยละ 26.12 วัดความเข้มข้นตะกอนสูงสุดที่ประมาณจากแบบจำลองได้ 14.69 กิโลกรัมต่อวินาที ในขณะที่วัดจริงได้ 15.28 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ

เมื่อนำผลผลิตตะกอนที่ประมาณได้และตรวจวัดจากภาคสนามมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกัน พบว่า มีแนวโน้มความสัมพันธ์ที่ชัดเจนเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ สามารถประมาณผลผลิตตะกอนจากแบบจำลอง KINEROS 2 ได้ใกล้เคียงกับผลผลิตตะกอนที่ตรวจวัดจากภาคสนาม และเมื่อนำความเข้มข้นตะกอนสูงสุดที่ประมาณได้และตรวจวัดจากภาคสนามมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกัน พบว่า มีแนวโน้มความสัมพันธ์ที่ชัดเจนเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ สามารถประมาณความเข้มข้นตะกอนสูงสุดจากแบบจำลอง KINEROS 2 ได้ใกล้เคียงกับผลผลิตตะกอนที่ตรวจวัดจากภาคสนาม ดังภาพที่ 30 และ 31 ตามลำดับ



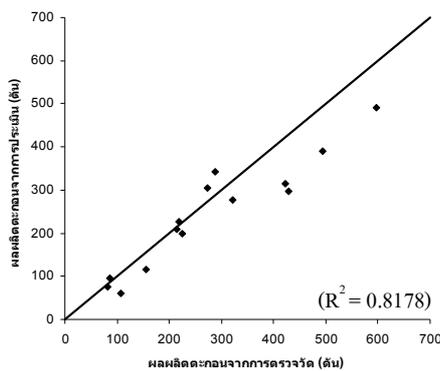
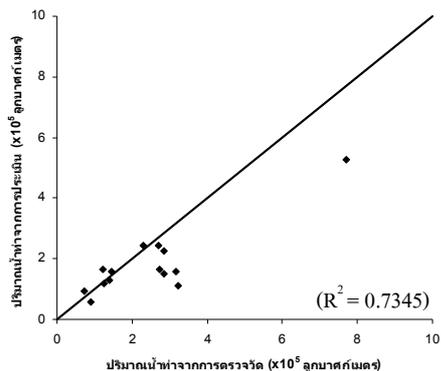
ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบผลผลิตตะกอนที่ประมาณได้กับที่ตรวจวัดจากภาคสนาม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550



ภาพที่ 31 การเปรียบเทียบความเข้มข้นตะกอนสูงสุดที่ประมาณได้กับที่ตรวจวัดจากภาคสนาม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550

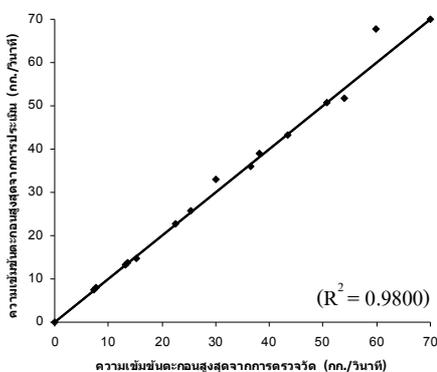
3.5 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำโดยนำปริมาณน้ำท่า ผลผลิตตะกอน และความเข้มข้นตะกอนสูงสุด ในแต่ละสตอร์มที่เลือกศึกษาทั้ง 14 สตอร์ม ที่ตรวจวัดจากภาคสนามและประมาณจากการทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 มาหาประมาณค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบ (model efficiency; EFF) ตามสมการของ Nash and Sutcliffe (1970) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ผลการศึกษาพบว่า เมื่อนำแบบจำลอง KINEROS 2 มาทดลองใช้สามารถประมาณความเข้มข้นตะกอนสูงสุดได้ถูกต้องแม่นยำมากกว่าค่าอื่น โดยสามารถประมาณได้ดีถึงร้อยละ 98.00 รองลงมา คือ สามารถประมาณผลผลิตตะกอนได้ดีร้อยละ 81.78 ในขณะที่สามารถประมาณปริมาณน้ำท่าได้เพียงร้อยละ 73.45 โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากการประมาณกับข้อมูลตรวจวัดจากภาคสนาม ดังภาพที่ 32



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลปริมาณน้ำทำ

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลผลผลิตตะกอน



(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลความเข้มข้นตะกอนสูงสุด

ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากการประมาณได้และตรวจวัดจากภาคสนาม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550

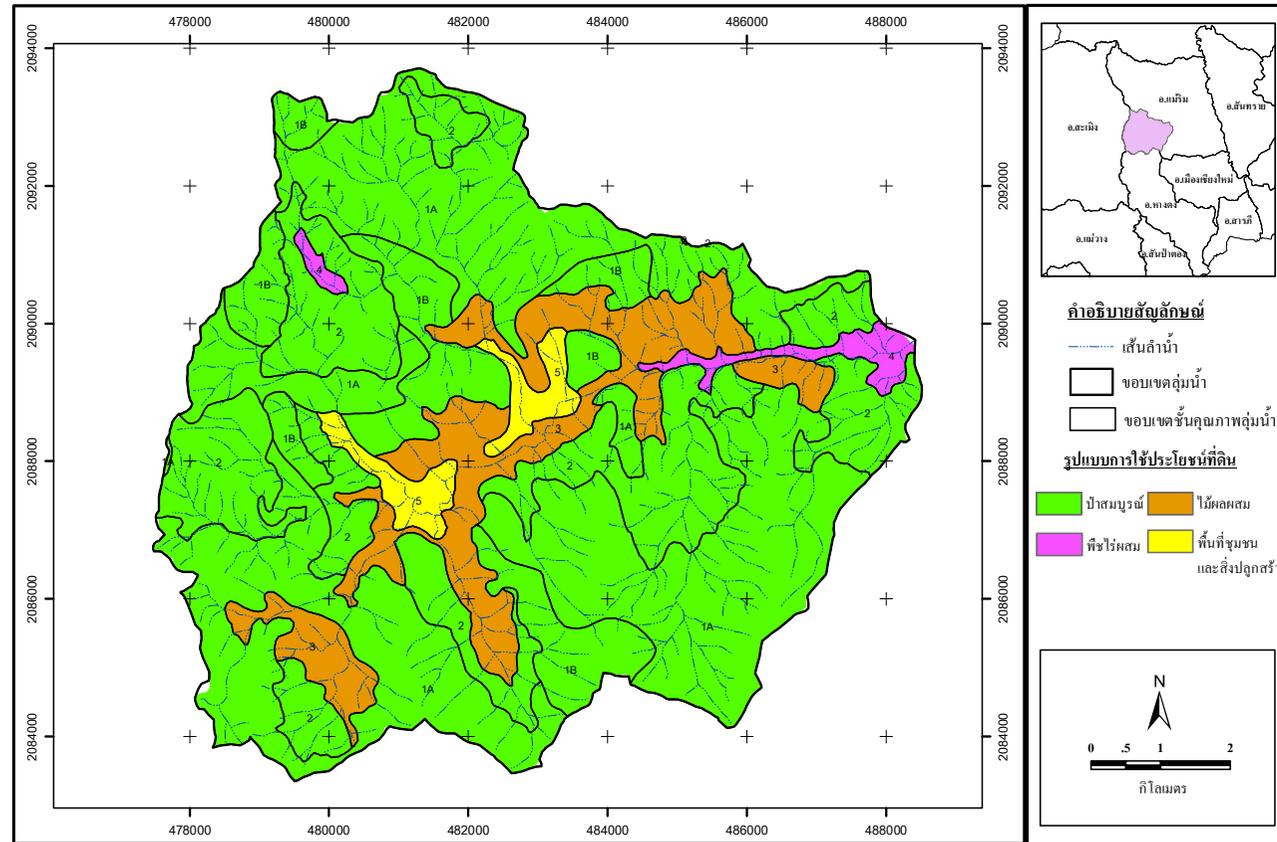
เนื่องจากผลการศึกษาที่กล่าวไว้ข้างต้นสามารถประมาณผลผลิตตะกอนได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้น ในการประยุกต์ใช้ประกอบการตัดสินใจในการวางแผนจัดการพื้นที่ลุ่มน้ำควรมีความตระหนักให้มาก เพื่อสามารถเตรียมตัวรองรับกับสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม จากสาเหตุดังกล่าว ผู้ศึกษาคาดว่าน่ามีสาเหตุเกิดจากขนาดของส่วนพื้นที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีขนาดใหญ่เกินไปที่ทำให้การประมาณผิดพลาดจากความเป็นจริง แต่เนื่องจากการประมาณค่าให้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับข้อมูลจริงที่ตรวจวัดได้จากภาคสนามนั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลเพียงพอสำหรับการเปรียบเทียบ แต่เนื่องจากข้อมูลที่มีการตรวจวัดในภาคสนามมีการตรวจวัดที่ทางออกน้ำ (outlet) เพียงแห่งเดียวเท่านั้น คือ สถานีแม่แะ ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบแบบจำลองรายลุ่มน้ำย่อยได้ ดังนั้น เพื่อความถูกต้องและความสะดวกในการเปรียบเทียบแบบจำลองผู้ศึกษาจึงเลือกศึกษาแบบเดิม คือ กำหนดเพียงลุ่มน้ำเดียว

4. การทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินตามภาพเหตุการณ์ (scenarios) ที่แตกต่างกันต่อผลผลิตตะกอน

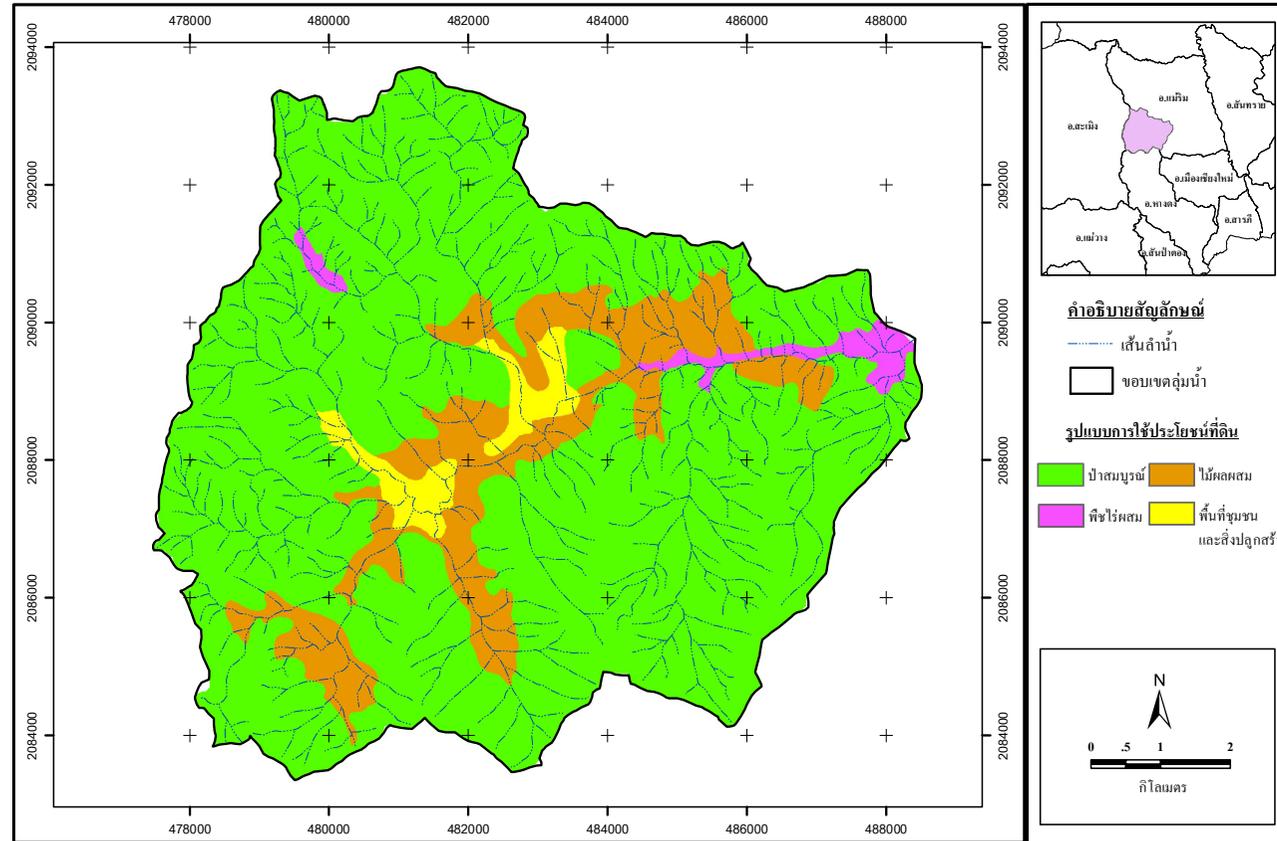
4.1 การใช้ประโยชน์ที่ดินที่เป็นไปตามนโยบายการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ

การกำหนดการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์การจัดการลุ่มน้ำ ถือว่าการกำหนดตามชั้นคุณภาพลุ่มน้ำเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ได้ผล หากพิจารณาแนวทางการกำหนดพื้นที่ตามคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2525) ประกอบ ที่กล่าวไว้ว่า ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 1A และ 1B เหมาะเป็นพื้นที่ต้นน้ำลำธาร ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 2 เหมาะกับทำกิจการป่าไม้ เหมือนแร่ แต่ต้องมีมาตรการควบคุมอย่างเข้มงวด ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 3 เหมาะกับปลูกไม้ยืนต้น ไม้ผล ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 4 เหมาะกับทำพืชไร่ และชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 5 เหมาะกับการเกษตร ทำนา นั่นดังภาพที่ 33 การคาดการณ์นี้จึงกำหนดให้พื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 1A, 1B และ 2 เป็นป่าสมบูรณ์ พื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 3 เป็นไม้ผลผสม พื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 4 เป็นพืชไร่ผสม และพื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 5 เป็นพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง ดังภาพที่ 34

จากการศึกษา พบว่า ส่วนใหญ่พื้นที่ลุ่มน้ำเป็นพื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 1A มีขนาดประมาณ 33.88 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 45.73 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ รองลงมาคือ พื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 2 มีขนาดประมาณ 17.74 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 23.95 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ พื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 4 มีขนาดประมาณ 10.21 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 13.79 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ พื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 1B มีขนาดประมาณ 8.71 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 11.76 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ พื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 5 มีขนาดประมาณ 2.16 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 2.92 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ และพื้นที่ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำที่ 3 พบน้อยที่สุด มีขนาดประมาณ 1.37 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 1.85 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ดังตารางที่ 7



ภาพที่ 33 การใช้ประโยชน์ที่ดินซ้อนทับชั้นคุณภาพลุ่มน้ำตามนโยบายการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่



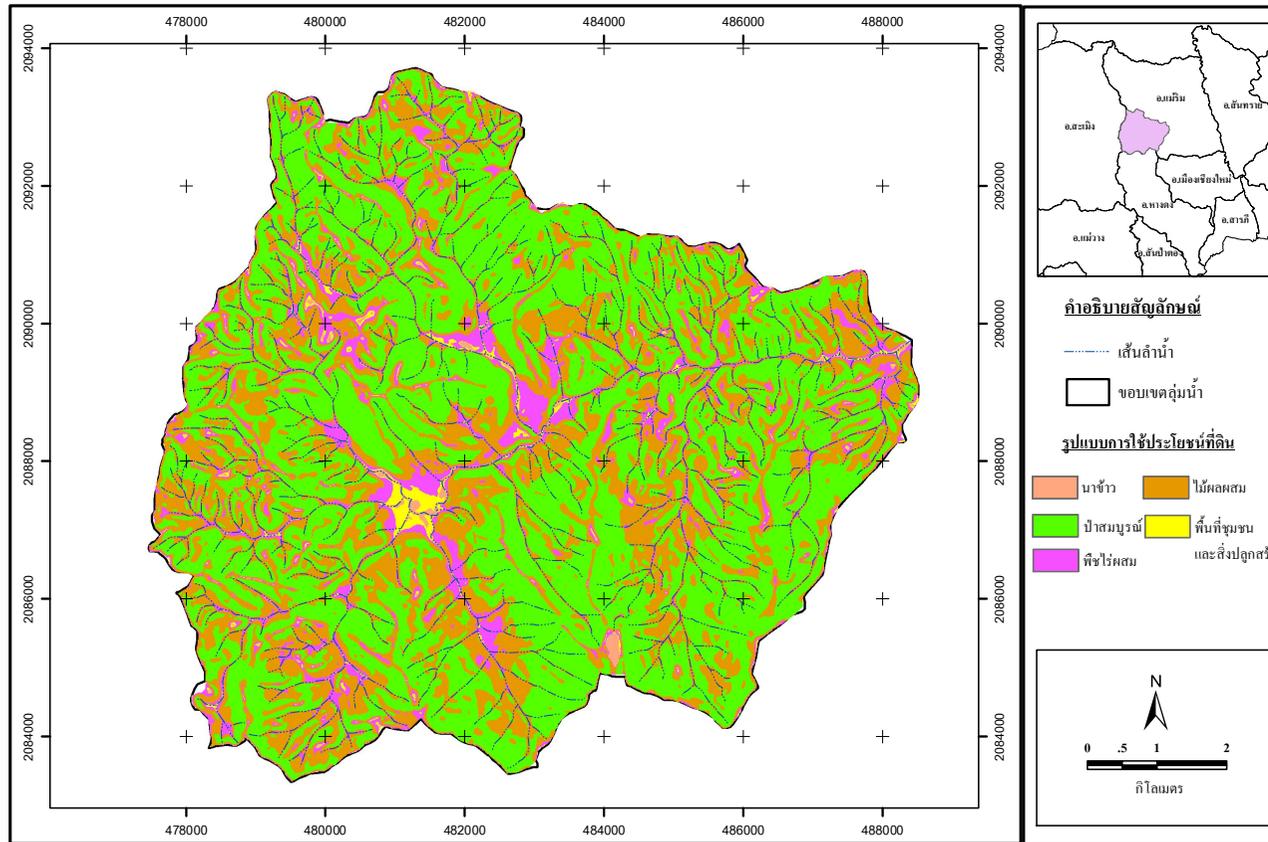
ภาพที่ 34 การใช้ประโยชน์ที่ดินที่เป็นไปตามนโยบายการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

ตารางที่ 7 การใช้ประโยชน์ที่ดินที่ควรเป็นตามชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ	พื้นที่ (ตร.กม.)	ร้อยละของพื้นที่ลุ่มน้ำ	การใช้ประโยชน์ที่ดินกำหนด ตามนโยบายการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ
1A	33.88	45.73	ป่าสมบูรณ์
1B	8.71	11.76	ป่าสมบูรณ์
2	17.74	23.95	ป่าสมบูรณ์
3	1.37	1.85	ไม้ผลผสม
4	10.21	13.79	พืชไร่ผสม
5	2.16	2.92	พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง
รวม	74.08	100.00	

4.2 การใช้ประโยชน์ที่ดินที่เป็นไปตามระดับความลาดชัน

หากพิจารณาแนวทางการกำหนดพื้นที่ตามคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ (2525) ประกอบ ที่กล่าวไว้ว่า พื้นที่ที่มีความลาดชันสูงมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ดินง่ายต่อการเปลี่ยนแปลง และรุนแรง เหมาะเป็นพื้นที่ต้นน้ำลำธาร พื้นที่ที่มีความลาดชันอยู่ระหว่าง 30-50 เปอร์เซ็นต์ ดินง่ายต่อการพังทลาย ความอุดมสมบูรณ์ต่ำ เหมาะกับทำป่าไม้และเหมืองแร่ พื้นที่ที่มีความลาดชันอยู่ระหว่าง 25-35 เปอร์เซ็นต์ ดินพังทลายง่ายถึงปานกลาง เหมาะกับปลูกไม้ยืนต้นและไม้ผล แต่ต้องใช้มาตรการอนุรักษ์อย่างเข้มงวด พื้นที่ที่มีความลาดชันอยู่ระหว่าง 6-25 เปอร์เซ็นต์ ดินค่อนข้างลึก ความอุดมสมบูรณ์ค่อนข้างสูง มีสัณฐานการพังทลายต่ำ เหมาะกับทำพืชไร่ นั้น สามารถกำหนดให้ระดับความลาดชัน 0-2 เปอร์เซ็นต์ เป็นนาข้าว ระดับความลาดชัน 2-5 เปอร์เซ็นต์ เป็นพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง ระดับความลาดชัน 5-15 เปอร์เซ็นต์ เป็นพืชไร่ผสม ระดับความลาดชัน 15-35 เปอร์เซ็นต์ เป็นไม้ผลผสม และความลาดชันมากกว่าระดับ 35 เปอร์เซ็นต์ เป็นป่าสมบูรณ์ ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 การใช้ประโยชน์ที่ดินที่เป็นไปตามระดับความลาดชัน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

จากการศึกษา พบว่า ส่วนใหญ่พื้นที่ลุ่มน้ำมีลักษณะเป็นภูเขาชันสูงชัน มีระดับความลาดชันมากกว่า 35 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดประมาณ 40.20 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 54.27 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ รองลงมา คือ ระดับความลาดชัน 15-35 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดประมาณ 26.58 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 35.88 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ระดับความลาดชัน 5-15 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดประมาณ 5.98 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 8.07 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ระดับความลาดชัน 2-5 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดประมาณ 0.98 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 1.32 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ และระดับความลาดชัน 0-2 เปอร์เซ็นต์ มีขนาดเล็กที่สุดประมาณ 0.34 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 0.46 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การใช้ประโยชน์ที่ดินที่ควรเป็นตามระดับความลาดชัน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

ระดับความลาดชัน (เปอร์เซ็นต์)	พื้นที่ (ตร.กม)	ร้อยละของพื้นที่ลุ่มน้ำ	การใช้ประโยชน์ที่ดินกำหนด ตามระดับความลาดชัน
0 - 2	0.34	0.46	นาข้าว
2 - 5	0.98	1.32	พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง
5 - 15	5.98	8.07	พืชไร่ผสม
15 - 35	26.58	35.88	ไม้ผลผสม
มากกว่า 35	40.20	54.27	ป่าสมบูรณ์
รวม	74.08	100.00	

เมื่อพิจารณาสัดส่วนการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เป็นไปตามนโยบายการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำและตามระดับความลาดชัน พบว่า การใช้ประโยชน์ที่ดินตามนโยบายการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำสามารถกำหนดได้ทั้งหมด 4 รูปแบบ ได้แก่ ป่าสมบูรณ์ มีพื้นที่มากที่สุดถึงประมาณ 60.34 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 81.44 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ รองลงมา คือ ไม้ผลผสม พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง มีขนาดประมาณ 10.21 และ 2.16 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 13.79 และ 2.92 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ตามลำดับ และพืชไร่ผสม มีพื้นที่น้อยที่สุดประมาณ 1.36 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 1.85 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ในขณะที่การใช้ประโยชน์ที่ดินตามระดับความลาดชันสามารถกำหนดได้ทั้งหมด 5 รูปแบบ ได้แก่ ป่าสมบูรณ์ มีพื้นที่มากที่สุดถึงประมาณ 40.20 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 54.27 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ รองลงมา คือ ไม้ผลผสม พืชไร่ผสม นาข้าว มีขนาดประมาณ 26.58, 1.32 และ 5.98 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 35.88, 8.07 และ 0.98 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ

ตามลำดับ ในขณะที่พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง มีพื้นที่น้อยที่สุดประมาณ 0.34 ตารางกิโลเมตร คิดเป็นร้อยละ 0.46 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 สัดส่วนพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินจากภาพเหตุการณ์ (scenarios) ที่แตกต่างกัน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

ประเภท การใช้ประโยชน์ที่ดิน	การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน					
	ปัจจุบัน		ตามชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ		ตามระดับความลาดชัน	
	พื้นที่ (ตร.กม.)	ร้อยละ	พื้นที่ (ตร.กม.)	ร้อยละ	พื้นที่ (ตร.กม.)	ร้อยละ
1. นาข้าว	0.59	0.80	0.00	0.00	0.34	0.46
2. ป่ารอสภาพฟื้นฟู	0.50	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00
3. ป่าสมบูรณ์	51.12	69.01	60.34	81.44	40.20	54.27
4. พืชไรผสม	8.23	11.11	1.36	13.79	5.98	8.07
5. ไม้ผลผสม	11.19	15.11	10.21	1.85	26.58	35.88
6. พื้นที่ชุมชนและ สิ่งปลูกสร้าง	2.34	3.16	2.16	2.92	0.98	1.32
7. พื้นที่แหล่งน้ำ	0.10	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
รวม	74.08	100.00	74.08	100.00	74.08	100.00

4.3 ปริมาณน้ำท่า และผลผลิตตะกอนที่ประมาณได้จากแบบจำลอง KINEROS 2

เมื่อนำการใช้ประโยชน์ที่ดินที่คาดการณ์มาประมาณปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอน โดยใช้ข้อมูลฝนชุดเดียวกัน พบว่า เมื่อใช้ประโยชน์ที่ดินตามนโยบายการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำและตามระดับความลาดชันที่กำหนดไว้ ปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอนมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยมียาลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจุบัน เมื่อมีการใช้ประโยชน์ที่ดินตามนโยบายการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ ปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอนมีค่าลดลงจากปัจจุบันอยู่ระหว่างร้อยละ 65.33-35.27 และร้อยละ 34.70-82.90 ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อมีการใช้ประโยชน์ที่ดินตามระดับความลาดชัน ปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอนมีค่าลดลงจากปัจจุบันอยู่ระหว่างร้อยละ 25.11-60.60 และร้อยละ 12.65-52.75 ตามลำดับ (ตารางที่ 10) จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการใช้ประโยชน์ที่ดินตามชั้นคุณภาพลุ่มน้ำสามารถลดปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอนได้มากกว่า เนื่องจากสัดส่วนการใช้ประโยชน์ที่เป็นป่าสมบูรณ์มีมากกว่าอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงการใช้ประโยชน์ที่ดินตามระดับความลาดชัน

ตารางที่ 10 ปริมาณน้ำท่า และผลผลิตตะกอนที่ประมาณจากภาพเหตุการณ์ได้โดยใช้แบบจำลอง KINEROS 2 บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

สตอร์ม ที่	วัน เดือน ปี	ข้อมูลจากการตรวจวัด ในปี พ.ศ. 2550			ผลการประมาณ โดยแบบจำลอง							
		ปริมาณ น้ำฝนเฉลี่ยทุกสถานี (มม.)	ปริมาณ น้ำท่า (ลบ.ม.)	ผลผลิต ตะกอน (ตัน)	ตามชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ				ตามระดับความลาดชัน			
					ปริมาณ น้ำท่า (ลบ.ม.)	เทียบกับ	ผลผลิต ตะกอน (ตัน)	เทียบกับ	ปริมาณ น้ำท่า (ลบ.ม.)	เทียบกับ	ผลผลิต ตะกอน (ตัน)	เทียบกับ
						ปี พ.ศ. 2550 (ร้อยละ)		ปี พ.ศ. 2550 (ร้อยละ)		ปี พ.ศ. 2550 (ร้อยละ)		ปี พ.ศ. 2550 (ร้อยละ)
1	12/05/07	17.57	2.84x10 ⁵	597.48	1.52x10 ⁵	- 46.48	282.08	- 47.21	1.89x10 ⁵	- 33.45	199.94	- 33.46
2	19/05/07	7.27	1.44x10 ⁵	218.98	0.78x10 ⁵	- 45.83	110.30	- 50.37	1.03x10 ⁵	- 28.47	76.78	- 35.06
3	02/06/07	8.52	1.23x10 ⁵	86.18	0.46x10 ⁵	- 62.60	71.44	- 82.90	0.91x10 ⁵	- 26.02	45.46	- 52.75
4	04/06/07	13.53	1.25x10 ⁵	321.48	0.56x10 ⁵	- 55.20	141.66	- 44.07	0.69x10 ⁵	- 44.80	42.16	- 13.11
5	16/06/07	11.75	1.40x10 ⁵	225.06	0.89x10 ⁵	- 36.43	146.36	- 65.03	0.93x10 ⁵	- 33.57	96.40	- 42.83
6	27/06/07	15.82	2.71x10 ⁵	422.55	1.07x10 ⁵	- 60.52	218.96	- 51.82	1.92x10 ⁵	- 29.15	146.25	- 34.61
7	18/07/07	11.99	7.16x10 ⁴	81.41	0.26x10 ⁴	- 63.59	32.34	- 39.73	0.30x10 ⁴	- 58.10	20.17	- 24.78
8	29/07/07	7.23	9.13x10 ⁴	107.47	0.59x10 ⁴	- 35.27	51.18	- 47.62	0.68x10 ⁴	- 25.52	27.79	- 25.86
9	01/08/07	20.19	2.85x10 ⁵	213.59	1.70x10 ⁵	- 40.35	96.20	- 45.04	1.97x10 ⁵	- 30.88	27.02	- 12.65
10	04/09/07	19.82	3.23x10 ⁵	429.67	1.12x10 ⁵	- 65.33	149.11	- 34.70	2.01x10 ⁵	- 37.77	109.24	- 25.42
11	06/09/07	12.92	3.16x10 ⁵	155.93	1.83x10 ⁵	- 42.09	72.26	- 46.34	1.89x10 ⁵	- 40.19	54.48	- 34.94
12	13/09/07	9.82	2.31x10 ⁵	272.28	1.38x10 ⁵	- 40.26	154.97	- 56.92	1.73x10 ⁵	- 25.11	87.58	- 32.17
13	14/09/07	10.28	2.74x10 ⁵	287.75	1.43x10 ⁵	- 47.81	145.98	- 50.73	1.52x10 ⁵	- 44.53	68.71	- 23.88
14	05/10/07	32.53	7.69x10 ⁵	494.25	2.69x10 ⁵	- 65.02	382.03	- 77.29	3.03x10 ⁵	- 60.60	91.46	- 18.51

มีแนวโน้มความเป็นไปได้มากกว่าตามชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ เนื่องจากจำนวนประชากรมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับยังคงมีความต้องการและจำเป็นต้องใช้ประโยชน์พื้นที่ ดังนั้น ในการวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดินจึงควรกำหนดให้มีการใช้ประโยชน์ที่ดินตามระดับความลาดชันจึงเหมาะสมกว่า แต่ต้องควบคู่ไปกับมาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำ จึงจะเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการลดปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอนให้มีความเหมาะสมอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การทดลองใช้แบบจำลอง KINEROS 2 เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ โดยรวบรวมข้อมูลจากภาคสนามของสถานีวัดน้ำฝน จำนวน 11 แห่ง และสถานีวัดน้ำท่า 1 แห่ง ในปี พ.ศ. 2550 หาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการตกของฝนและผลผลิตตะกอน และประมาณผลผลิตตะกอน รวมทั้งกำหนดภาพเหตุการณ์ (scenarios) ตามนโยบายการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ และตามระดับความลาดชัน สรุปผลการศึกษาดังนี้

การศึกษาพิจารณาเลือกสโตรมตัวแทนกระจายครอบคลุมเดือนที่มีฝนตกคือ เดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคมทั้งหมด 14 สโตรม โดยปริมาณน้ำฝนในแต่ละสถานีของสโตรมที่เลือกศึกษามีค่าอยู่ระหว่าง 0.28-57.70 มิลลิเมตร ปริมาณน้ำท่ามีค่าอยู่ระหว่าง 7.16×10^4 - 7.69×10^5 ลูกบาศก์เมตร ผลผลิตตะกอนมีค่าอยู่ระหว่าง 81.41-597.48 ตัน ในขณะที่มีความเข้มข้นตะกอนสูงสุดมีค่าอยู่ระหว่าง 7.23-59.78 กิโลกรัมต่อวินาที และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกราฟน้ำท่าและผลผลิตตะกอน พบว่า ลักษณะความผันแปรแต่ละช่วงเวลาของการเกิดผลผลิตตะกอนมีความสอดคล้องกับลักษณะการไหลของน้ำท่ามากกว่าลักษณะการตกของฝน

ส่วนย่อยที่เล็กที่สุดที่สามารถวิเคราะห์ผลผลิตตะกอนได้ เมื่อกำหนดให้มีพื้นที่รับน้ำต่ำสุดที่จะถือว่าเป็นส่วนลำธาร (contributing area; CSA) มีค่าร้อยละ 2.50 ของพื้นที่ลุ่มน้ำ แบ่งเป็นส่วนย่อย แยกเป็นส่วนพื้นดิน มีจำนวนเท่ากับ 78 ส่วน และส่วนลำธาร มีจำนวนเท่ากับ 33 ส่วน หลังจากประมาณผลผลิตตะกอน พบว่า แบบจำลอง KINEROS 2 สามารถประมาณปริมาณน้ำท่าผลผลิตตะกอนได้ในเชิงปริมาณและลักษณะความผันแปรแต่ละช่วงเวลา ตลอดจนความเข้มข้นตะกอนสูงสุด และส่วนใหญ่ประมาณได้ต่ำกว่าค่าตรวจวัด จากการศึกษพบว่า ส่วนใหญ่ในช่วงปลายฤดูฝนมีปริมาณน้ำท่ามากกว่าในช่วงต้นและกลางฤดูฝน เนื่องจากเป็นช่วงที่มีฝนตกหนัก ประกอบการมีน้ำไหลสะสมในลำธารมากกว่าช่วงอื่นๆ ทำให้มีปริมาณน้ำท่าที่ตรวจวัดได้สูงตามไปด้วย รองลงมา คือ ช่วงต้นฤดูฝน และช่วงกลางฤดูฝน ตามลำดับ ในขณะที่ผลผลิตตะกอนช่วงต้นฤดูฝนเกิดมากกว่าช่วงเวลาอื่นๆ ประมาณ 90-600 ตัน และมีความเข้มข้นตะกอนสูงสุดประมาณ 40-50 กิโลกรัมต่อวินาที รองลงมา คือ ช่วงปลายฤดูฝน ประมาณ 160-500 ตัน และมีความเข้มข้นตะกอนสูงสุดประมาณ 20-40 กิโลกรัมต่อวินาที และช่วงกลางฤดูฝน ประมาณ 80-350 ตัน และมีความเข้มข้นตะกอนสูงสุดประมาณ 7-10 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจาก

ลักษณะการตกของฝนในประเทศไทยเป็นฝนทิ้งช่วง กล่าวคือ ฝนจะตกในช่วงต้นฤดูฝนและทิ้งช่วงการตกในช่วงกลางฤดูฝน และกลับมาตกอีกครั้งหนึ่งในช่วงปลายฤดูฝน ทำให้ช่วงต้นฤดูฝนมีความเข้มข้นตะกอนสูงสุดมากกว่าช่วงอื่น และมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วงปลายฤดูฝน และช่วงกลางฤดูฝน ตามลำดับ เมื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องด้วยค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบ (model efficiency; EFF) พบว่า เมื่อนำแบบจำลอง KINEROS 2 มาทดลองใช้สามารถประมาณความเข้มข้นตะกอนสูงสุดได้ถูกต้องแม่นยำมากกว่าค่าอื่น โดยสามารถประมาณได้ดีถึงร้อยละ 98.00 รองลงมาคือ สามารถประมาณผลผลิตตะกอนได้ดีร้อยละ 81.78 ในขณะที่สามารถประมาณปริมาณน้ำท่าได้เพียงร้อยละ 73.45 และเนื่องจากผลการศึกษาที่กล่าวไว้ข้างต้นสามารถประมาณผลผลิตตะกอนได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้น ในการประยุกต์ใช้ประกอบการตัดสินใจในการวางแผนจัดการพื้นที่ลุ่มน้ำควรมีความตระหนักให้มาก เพื่อสามารถเตรียมตัวรองรับกับสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสม

สำหรับภาพเหตุการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินที่นำมาคาดการณ์ปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอน โดยใช้ข้อมูลฝนชุดเดียวกัน พบว่า ปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอนที่ประมาณได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจุบัน โดยมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับปัจจุบัน เมื่อมีการใช้ประโยชน์ที่ดินตามนโยบายการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ ปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอนมีค่าลดลงจากปัจจุบันอยู่ระหว่างร้อยละ 35.27-65.33 และร้อยละ 34.70-82.90 ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อมีการใช้ประโยชน์ที่ดินตามระดับความลาดชัน ปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอนมีค่าลดลงจากปัจจุบันอยู่ระหว่างร้อยละ 25.11-60.60 และร้อยละ 12.65-52.75 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการใช้ประโยชน์ที่ดินตามชั้นคุณภาพลุ่มน้ำสามารถลดปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอนได้มากกว่า เนื่องจากสัดส่วนการใช้ประโยชน์ที่เป็นป่าสมบูรณ์มีมากกว่าอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงการใช้ประโยชน์ที่ดินตามระดับความลาดชันมีแนวโน้มความเป็นไปได้มากกว่าตามชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ เนื่องจากจำนวนประชากรมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับยังคงมีความต้องการและจำเป็นต้องใช้ประโยชน์พื้นที่ ดังนั้น ในการวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดินจึงควรกำหนดให้มีการใช้ประโยชน์ที่ดินตามระดับความลาดชันจึงเหมาะสมกว่า แต่ต้องควบคู่ไปกับมาตรการอนุรักษ์ดินและน้ำ จึงจะเกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการลดปริมาณน้ำท่าและผลผลิตตะกอนให้มีความเหมาะสมอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัยในครั้งนี้

1.1 เครื่องวัดน้ำฝนแบบบันทึกอัตโนมัติ (automatic recording rain gauge) ชนิดถ้วยกระดก (tipping bucket) มีความสะดวกในการเก็บข้อมูล สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างละเอียด แต่ควรมีการตรวจสอบความผิดพลาดของเครื่องมือด้วย เช่น แหล่งจ่ายพลังงานหมดอายุ ความสมบูรณ์ของเครื่องมือ ซึ่งก่อนใช้เครื่องมือควรมีการตรวจสอบเทียบเครื่องวัดน้ำฝนแบบมาตรฐานก่อน และควรมีการมาตรวจสอบเครื่องมือบ้างเป็นครั้งๆ เนื่องจากการสังเกตข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ตรวจวัดได้มีบางช่วงของข้อมูลที่ขาดหายไป และตรวจวัดไม่ได้

1.2 การประมาณผลผลิตตะกอนควรนำแบบจำลองอื่นๆ ที่มีแนวความคิดในการจำลองแบบแตกต่างจากแบบจำลอง KINEROS 2 มาประมาณผลผลิตตะกอนเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับแนวความคิดในการจำลองแบบใดที่มีความเหมาะสมกับสภาพพื้นที่ศึกษามากที่สุด

2. ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยครั้งต่อไป

การศึกษาวิจัยครั้งต่อไปควรนำพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับเรื่องของเวลา (routing time) มาทดสอบอิทธิพลต่อการเกิดผลผลิตตะกอน เนื่องจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นแล้วว่า ส่วนใหญ่ผลผลิตตะกอนที่ประมาณได้ไม่แม่นยำในเรื่องเวลาที่ไม่สอดคล้องกับข้อมูลที่ตรวจวัดได้ และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบควรศึกษาอย่างละเอียดและเข้าใจให้ถูกต้อง เพื่อความถูกต้องและแม่นยำของผลการศึกษาที่มากยิ่งขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. 2543. แผนการใช้ที่ดินลุ่มน้ำสาขาแม่สา. กองวางแผนการใช้ที่ดิน
กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

_____. 2550. แผนการใช้ที่ดินลุ่มน้ำสาขาแม่สา. กองวางแผนการใช้ที่ดิน
กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

กรมอุตุนิยมวิทยา. 2544. สถิติข้อมูลอุตุนิยมวิทยาของประเทศไทยในคชบ 30 ปี (2514-2543).
กรมอุตุนิยมวิทยา กระทรวงคมนาคม, กรุงเทพฯ.

กรมแผนที่ทหาร. 2548. แผนที่เส้นชั้นความสูง. ศูนย์บริการข้อมูลแผนที่ กรมแผนที่ทหาร
กระทรวงกลาโหม, กรุงเทพฯ.

เกษม จันทร์แก้ว. 2539. หลักการจัดการลุ่มน้ำ. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____ และนิพนธ์ ตั้งธรรม. 2525. หลักปฏิบัติในการจัดการลุ่มน้ำ. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา
คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ซัชชัย ตันตสิรินทร์. 2543. การศึกษาวิธีการประมาณค่า Topographic Index เพื่อเป็นแนวทางใน
การนำไปประยุกต์ใช้จำลองแบบทางอุทกวิทยาแบบกระจายพื้นที่. เอกสารประกอบการ
สอนวิชา 301561 อุทกวิทยาป่าไม้ประยุกต์. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)

นิพนธ์ ตั้งธรรม. 2545. แบบจำลองการชะล้างพังทลายของดินและมลพิษตะกอนในพื้นที่ลุ่มน้ำ.
ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2549. การจำลองแบบการจัดการลุ่มน้ำและระบบสิ่งแวดล้อม. ศูนย์วิจัยป่าไม้
คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- คณะกรรมการสิ่งแวดล้อม. 2525. **มติคณะรัฐมนตรีเกี่ยวกับการจัดชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ**. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และพลังงาน, กรุงเทพฯ.
- วิชา นิยม. 2535. **อุทกวิทยาป่าไม้**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วัฒนชัย ดำรงหาญวิทย์. 2528. **การคาดคะเนปริมาณการชะล้างพังทลายของดินในจังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้สมการการสูญเสียดินสากล**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมยศ กิจคำ. 2521. **การอนุรักษ์ดินและน้ำบนพื้นที่ภูเขา**. โครงการจัดการลุ่มน้ำสาขาแม่สา กองอนุรักษ์ต้นน้ำ กรมป่าไม้ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.
- สมเจตน์ จันทวัฒน์. 2522. **การอนุรักษ์ดินและน้ำ เล่ม 1: การพังทลายของดิน**. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Alan, D. Ziegler. 2007. **Data Maesa Project Chaingmai of Thailand. Available sources:**
http://webdata.soc.hawaii.edu/hydrology/projects/res_NASA/Mae_SA.htm,
25 June 2007.
- _____, W. Thomas. Giambelluca and Ross A. Sutherland. 2001. Erosion Prediction on Unpaved Mountain Roads in Northern Thailand: Validation of Dynamic Erodibility Modeling using KINEROS 2. **Journal of Hydrology**. 15: 337-358.
- Becker, A. and P. Serban. 1990. Hydrological Models for Water-resources Systems Design and Operation. **In Operational Hydrology Report**. 34th. World Meteorological Organization, Geneva.

- Bennett, J.P. 1974. Concepts of Mathematical Modeling of Sediment Yield. *In Water Resources Research*. 10 (3): 485-492.
- Bever, L.D. 1933. Some Soil Factors Affecting Erosions. *Agricultural Engineers*. 13: 51-57.
- Bradbury, A., N.J. Lea and P. Boltion. 1993. **Estimating Catchment Sediment: Yield Development of the GIS – Based CALSITE Model**. Report No. OD 125. Overseas Development Unit. HR Wallingford, UK.
- De Nevers. 1970. **Fluid Mechanics**. Addison-Wesley., Boston.
- Engman, E.T. 1986. Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. 112 (1): 39-53.
- Fair, G.M. and J.C. Geyer. 1954. **Water Supply and Wastewater Disposal**. John Wiley and Sons, New York.
- Goodrich, D.C. and C.L. Unkrich. 2002. KINEROS 2 - A Distributed Kinematic Runoff and Erosion Model. *In Proc. 2nd Federal Interagency Conf. on Hydrologic Modeling* . Las Vegas, NV.
- Govers, G. 1990. Empirical Relationships for the Transport Capacity of Overland Flow, Erosion, Transport and Deposition Processes. **IASH Publication**. (89): 45-63.
- Hudson, N.W. 1971. **Soil Conservation**. B.T. Batsford Ltd., London.
- Jorgensen, S.E. 1988. Fundamentals of Ecological Modelling. **ELSEVIER**, Amsterdam.
- Meyer, L.D. 1975. Source of Soil Eroded by Water from Upland Slopes. *In Proceedings of the Sediment-Yield Workshop*. USDA Sediment Laboratory, Oxford.

- Middleton, H.E. 1930. Properties of Soil Which Influence Soil Erosion. **USDA Tech. Bull.** 178: 16.
- Miller, S.N., D.J. Semmens., R.C. Miller., M. Hernandez., D.C. Goodrich, W.P. Miller., Kepner W.G. and D. Ebert. 2002. GIS-based Hydrologic Modeling: The Automated Geospatial Watershed Assessment Tool. *In Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference.* Las Vegas, USA.
- Morris, E.M., and D.A. Woolhiser, 1980. Unsteady One-dimensional Flow over a Plane: Partial Equilibrium and Recession Hydrographs. **Water Resources Research.** 16(2):355-360.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Model, Part I: A Discussion of Principles. **Journal of Hydrology.** 10: 282- 290.
- Osborn, B. 1955. Now Rainfall and Runoff Erode Soil. *In Yearbook of Agriculture* USDA . **Government Printing Office.** Washington, D.C.
- Parlange, J.Y., Lisle.I., R.D. Braddock and R.E. Smith. 1982. The three-parameter infiltration equation. **Soil Science.** 133 (6): 337-341.
- Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek. 1982. Estimation of Soil Water Properties. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers.** 25 (5): 1316-1328.
- Smith R.E., C. Corradini and F. Melone. 1993. Modeling Infiltration for Multistorm Runoff Events. **Watershed Resources Research.** 29 (1): 133-134.
- USDA. 2007. **KINEROS 2 Documentation.** Available sources: [http:// www.tucson.ars.ag.gov /kineros/](http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/), 17 April 2007.

- Vicente, L.L. and H. Evan Canfield. 2004. Effects of Watershed Representation on Runoff and Sediment Yield Modeling. **Journal of the American Water Resources Association**. 40 (2): 331.
- Wilgoose G. and G. Kuczera. 1995. Estimation of Subgrid Scale Kinematic Wave Parameters for Hillslopes. **Hydrologic Modeling**. 14: 227-240.
- Wischmeier and D.D Smith. 1958. Rainfall Energy and Its Relationship to Soil Loss. **Transactions of American Geophysical Union**. 39 (2): 285-291.
- Wooldridge, D.D. 1964. Effects of Parent Material and Vegetation on Properties Related to Soil Erosion in Central Washington. **Soil. Sci. Soc. Arner Proc**. 28: 430-432.
- Woolhiser, D.A. and J.A. Liggett. 1967. Unsteady, One-dimensional Flow over a Plane - The Rising Hydrograph. **Water Resources Research**. 3(3):753-771.
- Woolhiser, D.A. 1975. Simulation of Unsteady Overland Flow. *In* Unsteady Flow in Open Channels. **Water Resources Publications**. 2: 502.
- Woolhiser, D.A., R.E. Smith and D.C. Goodrich. 1990. **KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual**. U.S Department of Agriculture, Agricultural Research Service, USA.
- Zingg, A.W. 1940. Degree and Length of Land Slope It Effects Soil Loss in Runoff. **Agricultural Engineers**. 22 (2): 59-64.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 การประมาณค่าชลศาสตร์ของดินจากการสุ่มตัวอย่างในภาคสนาม

Texture class	Sample Size used	Total porosity (η)	Residual water content (θ_r)	Effective saturation (θ_s)	Pore Size distribution (λ)	Mean capillary drive (G , cm)
sand	762	0.437 ± 0.063	0.020 ± 0.019	0.417 ± 0.063	0.69 ± 0.40	5.0
loamy Sand	338	0.437 ± 0.069	0.035 ± 0.032	0.401 ± 0.062	0.55 ± 0.32	7.0
sandy loam	666	0.453 ± 0.102	0.041 ± 0.065	0.412 ± 0.129	0.38 ± 0.14	13.0
loam	383	0.463 ± 0.088	0.027 ± 0.047	0.434 ± 0.100	0.25 ± 0.17	11.0
silt loam	1206	0.501 ± 0.081	0.015 ± 0.043	0.486 ± 0.092	0.23 ± 0.13	20.0
sandy clay loam	498	0.398 ± 0.066	0.068 ± 0.069	0.330 ± 0.095	0.32 ± 0.24	26.0
clay loam	366	0.464 ± 0.055	0.075 ± 0.099	0.390 ± 0.111	0.24 ± 0.14	26.0
silty clay loam	689	0.471 ± 0.053	0.040 ± 0.078	0.432 ± 0.085	0.18 ± 0.14	35.0
sandy clay	45	0.430 ± 0.060	0.109 ± 0.096	0.321 ± 0.114	0.22 ± 0.18	30.0
silty clay	127	0.479 ± 0.054	0.056 ± 0.080	0.423 ± 0.089	0.15 ± 0.11	38.0
clay	291	0.475 ± 0.048	0.090 ± 0.105	0.385 ± 0.116	0.16 ± 0.13	41.0

ที่มา: Rawls and Brakensick (1982)

ตารางผนวกที่ 2 ค่าคงที่แสดงถึงความต้านทานการไหลของน้ำของสิ่งที่อยู่บนดิน
(roughness coefficient)

surface	residue rate	value recommended	range
concrete or asphalt		0.011	0.010 – 0.013
bare sand		0.01	0.010 – 0.016
graveled surface		0.02	0.012 – 0.03
bare clay loam (eroded)		0.02	0.012 – 0.033
fallow - no residue		0.05	0.006 – 0.16
chisel plow	< 1-4	0.07	0.006 – 0.17
	1/4 - 1	0.18	0.07 – 0.34
	1 – 3	0.30	0.19 – 0.47
	> 3	0.40	0.34 – 0.46
disk/harrow	< 1-4	0.08	0.008 – 0.41
	1/4 - 1	0.16	0.10 – 0.25
	1 – 3	0.25	0.14 – 0.53
	> 3	0.30	-
no till	< 1-4	0.04	0.03 – 0.07
	1/4 - 1	0.07	0.01 – 0.13
	1 – 3	0.30	0.16 – 0.47
moldboard plow (fall)		0.06	0.02 – 0.10
colter		0.10	0.05 – 0.13
range (natural)		0.13	0.01 – 0.32
range (clipped)		0.10	0.02 – 0.24
grass (bluegrass sod)		0.45	0.39 – 0.63
short grass prairie		0.15	0.10 – 0.20
dense grass ¹		0.24	0.17 – 0.30
bermuda grass ¹		0.41	0.30 – 0.48
wood (light underbrush)		0.40	0.30 – 0.50
wood (dense underbrush)		0.80	0.64 – 0.91

หมายเหตุ¹ Weeping lovegrass, bluegrass, buffalo grass, blue gramma grass, native grass mix
(Okla.), alfalfa, lespedeza (from Palmer, 1946)

ที่มา: Woolhiser (1975) and Engman (1986)

ตารางผนวกที่ 3 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลกลุ่มดิน และรหัสลักษณะดิน (SNUM) บนแผนที่ลักษณะดินที่จัดทำขึ้นใหม่

รหัสลักษณะดิน (SNUM)	รหัสสถานีวัดน้ำฝน ใกล้เคียง	เนื้อดิน	อันดับดิน	ขนาดพื้นที่ (ตร.กม.)
9001	421	sandy loam	rock outcrop	3.70
9002	424 425 426 427	sandy loam clay	Alfisols	11.48
9003	433 434	sandy loam	Entisols	0.33
9004	423 424 429 430 432 433 434	sandy loam	Ultisols	38.97
9005	422 428	clay	Ultisols	15.34
9006		unknown	unknown	4.26
			รวม	74.08

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2543) และ Alan (2007)

ตารางผนวกที่ 4 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับหน่วยดิน เนื้อดิน ชุดที่ 1

parameter	soil unit						meaning
	Af	Ao 2	Ao 3	Nd 3	Nh	Qc 3	
TEXTURE	SCL	SCL	C	C	C	SC	soil texture
SAND_TOP	62	51	33	16	6	48	% sand top (0-30 cm)
SAND_SUB	53	41	29	13	5	93	% sand sub (0-100 cm)
SILT_TOP	14	22	14	23	30	16	% silt top (0-30 cm)
SILT_SUB	13	17	16	16	22	3	% silt sub (0-100 cm)
CLAY_TOP	24	27	53	62	64	36	% clay top (0-30 cm)
CLAY_SUB	35	42	56	71	73	4	% clay sub (0-100 cm)
OC_TOP	0.91	1.73	1.84	1.64	4.04	0.4	organic carbon top
OC_SUB	0.34	0.73	0.89	0.52	1.47	0.16	organic carbon sub
FRAG_TOP	5	5	5	5	5	5	rock by volume top
FRAG_SUB	5	5	5	5	5	5	rock by volume sub
DEPTH_TOP	30	30	30	30	30	30	depth top (cm)
DEPTH_MAX	125	125	125	225	225	125	depth max (cm)
AWC_TOP	0.1	0.11	0.14	0.13	0.15	0.1	available water content top (cm)
AWC_SUB	0.11	0.12	0.14	0.12	0.13	0.07	available water content sub (cm)
AWC_1_M	106	117	141	127	138	80	available water content at 1 meter (cm)
BD_TOP	1.4	1.5	1.2	1.1	0.9	1.3	bulk density top (g/cm ³)
BD_SUB	1.4	1.4	1.2	1.1	1	1.5	bulk density sub (g/cm ³)
POR_TOP	47	43	55	58	66	51	porosity top (percent)
POR_SUB	47	47	55	58	62	43	porosity sub (percent)

หมายเหตุ 1. ชื่อแฟ้มข้อมูล คือ MS_soil_unit.dbf

2. soil unit หมายถึง หน่วยดิน ในที่นี้กำหนดให้ Af, Ao 2, Ao 3, Nd 3, Nh และ Qc 3 แทนสัญลักษณ์ของหน่วยดินต่างๆ

ตารางผนวกที่ 5 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับหน่วยดิน เนื้อดิน ชุดที่ 2

parameter	soil unit						meaning
	Af	Ao 2	Ao 3	Nd 3	Nh	Qc 3	
TEXTURE	SCL	SCL	C	C	C	SC	soil texture
SANDTOP	61.7	51	33	15.8	6.4	48.4	% sand top (0-30 cm)
SANDSUB	52.5	41.3	28.9	13	5.4	92.8	% sand sub (0-100 cm)
SILTTOP	14.4	21.6	14.2	22.7	29.8	16	% silt top (0-30 cm)
SILTSUB	12.9	17.2	15.5	15.8	21.5	3	% silt sub (0-100 cm)
CLAYTOP	23.9	27.4	52.9	61.6	63.9	35.6	% clay top (0-30 cm)
CLAYSUB	34.6	41.5	55.6	71.3	73.3	4.2	% clay sub (0-100 cm)
PHWAT.TOP	5.4	5.3	5.2	5.5	5.5	6.4	pH water top
PHWAT.SUB	5.3	5	5.4	5.4	5.4	6.9	pH water sub
OCTOP	0.91	1.73	1.84	1.64	4.04	0.4	organic carbon top
OCSUB	0.34	0.73	0.89	0.52	1.47	0.16	organic carbon sub
NTOP	0.12	0.13	0.12	0.15	0.34	0.04	nitrogen top
NSUB	0.06	0.08	0.07	0.08	0.15	0.02	nitrogen sub
BSTOP	43	53	31	36	42	71	base saturation top
BSSUB	34	34	28	26	41	84	base saturation sub
CECTOP	7.8	7.7	8.6	14.9	26.8	15.3	cation exchange capacity top
CECSUB	6.9	7.8	6.8	11.4	18.2	2.1	cation exchange capacity sub
CECCL.TOP	34	47	15	24	43	38	CEC clay top
CECCL.SUB	22	21	12	17	27	54	CEC clay sub
CACO3TOP	0	0	0	0	0	0	calcium carbonate top
CACO3.SUB	0	0	0	0	0	0	calcium carbonate sub
BDTOP	1.4	1.5	1.2	1.1	0.9	1.3	bulk density top (g/cm ³)
BDSUB	1.4	1.4	1.2	1.1	1	1.5	bulk density sub (g/cm ³)
CNTOP	14	12	17	11	11	10	carbon/nitrogen ratio top
CNSUB	14	10	14	8	9	9	carbon/nitrogen ratio sub

หมายเหตุ 1. ชื่อแฟ้มข้อมูล คือ MS_soil_prop1.dbf

2. soil unit หมายถึง หน่วยดิน ในที่นี้กำหนดให้ Af, Ao 2, Ao 3, Nd 3, Nh และ Qc 3 แทนสัญลักษณ์ของหน่วยดินต่างๆ

ตารางผนวกที่ 6 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับรหัสลักษณะดิน ร้อยละของดินแต่ละชั้น บนแผนที่ลักษณะดินที่จัดทำขึ้นใหม่

parameter	SNUM						meaning
	9001	9002	9003	9004	9005	9006	
FAOSOIL	AoA	NdA	QcA	NhA	AfA	AoA	soil name
SU1	Ao 3	Nd 3	Qc 3	Nh	Af	Ao 2	soil unit 1
PER1	100	100	100	100	100	100	percent of soil unit 1
SU2	-	-	-	-	-	-	soil unit 2
PER2	-	-	-	-	-	-	percent of soil unit 2
SU3	-	-	-	-	-	-	soil unit 3
PER3	-	-	-	-	-	-	percent of soil unit 3
SU4	-	-	-	-	-	-	soil unit 4
PER4	-	-	-	-	-	-	percent of soil unit 4
SU5	-	-	-	-	-	-	soil unit 5
PER5	-	-	-	-	-	-	percent of soil unit 5
SU6	-	-	-	-	-	-	soil unit 6
PER6	-	-	-	-	-	-	percent of soil unit 6
SU7	-	-	-	-	-	-	soil unit 7
PER7	-	-	-	-	-	-	percent of soil unit 7
SU8	-	-	-	-	-	-	soil unit 8
PER8	-	-	-	-	-	-	percent of soil unit 8

หมายเหตุ 1. ชื่อเพิ่มข้อมูล คือ MS_soil_prop2.dbf

2. - คือ ไม่ใส่ข้อมูล

ตารางผนวกที่ 7 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับลักษณะดิน

parameter	texture			meaning
	clay	sandy loam	sandy clay loam	
K_s	45.491	162.146	236.012	saturated hydraulic conductivity (mm/hr)
G	26	30	26	net capillary drive (mm)
POR	0.327	0.33	0.49	porosity (cm ³ /cm ³)
SMAX	1	1	1	maximum relative soil saturation
CV	0.5	1	0.6	coefficient of variation of K_s
SAND	27	50	59	practional sand content
SILT	23	4	11	practional silt content
CLAY	50	46	30	practional clay content
DIST	0.24	0.22	0.32	pore size distribution index
KFF	0.34	0.36	0.36	soil erodibility factor

หมายเหตุ ชื่อแฟ้มข้อมูล คือ MS_kin_lut.dbf

ที่มา: USDA (2007)

ตารางผนวกที่ 8 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์ที่ดิน

รหัส	ประเภทการใช้ที่ดิน	พื้นที่ (ตร.กม.)	หมายเลข ค็องน้ำท่า (CN) สำหรับชุดดินอุทกศาสตร์ (Hydrologic soil group) ¹				ร้อยละการปกคลุมเรือนยอด ²	ปริมาณน้ำพืชยึดสูงสุด ² (มม.)	ส.ป.ส. ความขรุขระของ Manning ³	ปริมาณน้ำที่ซึมผ่านไม่ได้ ³ (มม.)
			A	B	C	D				
1	นาข้าว	0.59	61	73	81	84	45	1.00	0.150	0.02
2	ป่ารอสภาพฟื้นฟู	0.50	48	48	57	63	50	1.00	0.600	0.00
3	ป่าสมบูรณ์	51.12	30	55	76	77	70	2.00	0.800	0.00
4	พืชไร่ผสม	8.23	65	75	82	86	50	0.76	0.350	0.00
5	ไม้ผลผสม	11.19	32	58	72	79	75	1.50	0.750	0.00
6	พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง	2.34	77	85	90	92	90	2.50	0.040	0.10
7	พื้นที่แหล่งน้ำ	0.10	100	100	100	100	0	0.00	0.011	0.00
รวม		74.08								

หมายเหตุ 1. ชื่อเพิ่มข้อมูล คือ MS_nalc_lut.dbf

2. ความหมายของชุดดินทางอุทกศาสตร์

2.1 ชุดดิน A หมายถึง ชั้นดินหน้าลึกและมีอัตราการซึมผ่านได้สูง เช่น ดินทราย (sand) ดินทรายเชิงร่วน (loamy sand) และดินร่วนเชิงทราย (sandy loam)

2.2 ชุดดิน B หมายถึง มีอัตราการซึมผ่านปานกลาง ได้แก่ ดินร่วน (loam) ดินร่วนเชิงทรายแป้ง (silt loam)

2.3 ชุดดิน C หมายถึง มีอัตราการซึมผ่านได้ต่ำ ดินร่วนปนดินเหนียวเชิงทราย (sandy clay loam)

2.4 ชุดดิน D หมายถึง มีอัตราการซึมผ่านได้ต่ำมาก ได้แก่ ดินร่วนเชิงดินเหนียว (clay loam) ดินร่วนปนดินเหนียวเชิงทรายแป้ง (silty clay loam) ดินทรายแป้ง (silt) ดินเหนียวเชิงทราย (sandy clay) ดินเหนียวเชิงทรายแป้ง (silty clay) ดินเหนียว (clay)

ที่มา: ¹กรมพัฒนาที่ดิน (2543) ²Alan (2007) และ ³Woolhiser (1975) and Engman (1986)

ตารางผนวกที่ 9 ตัวอย่างเพิ่มข้อมูลที่แบบจำลองได้เตรียมไว้เพื่อประมาณผลผลิตตะกอน
ของสตรัมฝนที่ตก

parameter	SNUM						meaning
	9001	9002	9003	9004	9005	9006	
Pave	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	fraction of surface covered by erosion pavement
Splash	114.784	114.784	121.536	114.784	121.536	121.536	rainsplash coefficient
Rock	0.050	0.000	0.050	0.050	0.050	0.050	volumetric rock fraction
K_s	4.300	0.000	15.449	4.156	22.644	22.782	saturated hydraulic conductivity (mm/hr)
G	26.000	26.000	30.000	26.000	26.000	26.000	net capillary drive (mm)
POR	0.327	0.327	0.330	0.327	0.490	0.490	porosity (cm ³ /cm ³)
SMAX	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	maximum relative soil saturation
CV	0.500	0.500	1.000	0.500	0.600	0.600	coefficient of variation of K_s
FRACT_SAND	0.330	0.158	0.484	0.064	0.617	0.510	fractional sand content
FRACT_SILT	0.142	0.227	0.160	0.298	0.144	0.216	fractional silt content
FRACT_CLAY	0.529	0.616	0.356	0.639	0.239	0.274	fractional clay content
DIST	0.240	0.240	0.220	0.240	0.320	0.320	pore size distribution index
COHESION	0.007	0.007	0.008	0.007	0.008	0.008	soil cohesion coefficients

หมายเหตุ ชื่อเพิ่มข้อมูล คือ temp_kin_soil_lut.dbf

ตารางผนวกที่ 10 เพิ่มข้อมูลน้ำฝนที่ใช้ในแบบจำลอง KINEROS 2

GAGE	ELAPSED	DETH_MM	HOUR	MINUTE	YEAR	MONTH	DAY
421	0	0	13	50	2007	5	12
421	1	0	13	50	2007	5	12
421	60	0	13	50	2007	5	12
421	113	0.246	13	50	2007	5	12
421	114	1.908	13	50	2007	5	12
421	.	.	.	.	.	.	.
421	.	.	.	.	.	.	.
421	.	.	.	.	.	.	.
422	0	0	13	50	2007	5	12
422	1	0	13	50	2007	5	12
422	60	0	13	50	2007	5	12
422	95	0.276	13	50	2007	5	12
422	96	0.552	13	50	2007	5	12
422	.	.	.	.	.	.	.
422	.	.	.	.	.	.	.
422	.	.	.	.	.	.	.
433	0	0	13	50	2007	5	12
433	1	0.271	13	50	2007	5	12
433	2	0.542	13	50	2007	5	12
433	3	0.813	13	50	2007	5	12
433	10	1.084	13	50	2007	5	12
433	.	.	.	.	.	.	.
433	.	.	.	.	.	.	.
433	.	.	.	.	.	.	.

หมายเหตุ GAGE	คือ	รหัสสถานีวัดน้ำฝน
ELAPSED	คือ	เวลา หน่วยเป็นนาที่ สะสมตั้งแต่เริ่มต้นที่ฝนตกถึงเวลาใดๆ
DETH_MM	คือ	ปริมาณน้ำฝน หน่วยเป็นมิลลิเมตร สะสมตั้งแต่เริ่มต้นที่ฝนตกถึงเวลาใดๆ
HOUR	คือ	ชั่วโมงเริ่มต้นของฝนที่ตกในสตอร์มศึกษา
MINUTE	คือ	นาทีเริ่มต้นของฝนที่ตกในสตอร์มศึกษา
MONTH	คือ	เดือนเริ่มต้นของฝนที่ตกในสตอร์มศึกษา
DAY	คือ	วันเริ่มต้นของฝนที่ตกในสตอร์มศึกษา

ตารางผนวกที่ 11 ตำแหน่งสถานีวัดน้ำฝนและน้ำท่า บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

ชื่อสถานี		รหัส สถานี	พิกัด WGS UTM		ความสูงเหนือ ระดับน้ำทะเล (ม.)
ชื่ออังกฤษ	ชื่อไทย		E	N	
Royal Project site at Buak Chan	บวกจั่น	421	484942	2084410	1,330
Kong Hae RG	กองแหะ	422	479669	2085634	1,081
Buak Toei	บวกเตย	423	477979	2088356	1,260
Mae Ja RG	แม่จะ	424	480551	2087684	800
Doi Phan Nok Kok	ผานกกก	425	482765	2084138	800
Mae Sa Mai Royal Project (RG)	แม่สาใหม่	427	483807	2088340	1,100
RFD site at Bong Khrai	โป่งไคร้	428	480519	2089818	1,000
Tower at Huai Dok Gniew	ห้วยดอกจิว	429	483038	2090245	820
Nong Hoi Royal Project	หนองหอย	430	481530	2092972	850
RFD camp at Huai Dii Mii	ห้วยดีหมี	432	484063	2089605	800
Private Lynchee field at Mae Mae	แม่เมะ	433	487840	2089429	550
Stream guage at Mae Mae RFD station *	แม่เมะ *	434	488130	2089976	524

หมายเหตุ * เป็นสถานีวัดน้ำท่าและผลผลิตตะกอน

ตารางผนวกที่ 12 จำนวนครั้งของฝนที่ตกรายเดือน ของแต่ละสถานีวัดน้ำฝน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550

หน่วย: ครั้ง

ชื่อสถานี	รหัสสถานี	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	ตลอดทั้งปี
บวkJัน	421	62	37	47	66	50	35	23	-	-	-	1	9	330
กองแหะ	422	67	41	47	66	70	35	23	-	-	-	3	11	363
บวkJเตย	423	65	36	43	55	57	38	19	-	-	-	2	25	340
แม่จะ	424	67	40	45	65	53	35	23	-	-	-	4	11	343
ผานกกก	425	63	45	57	68	54	36	16	-	-	-	2	9	350
แม่สาใหม่	427	63	36	52	57	53	39	25	-	-	-	3	10	338
โป่งไคไร่	428	68	31	49	53	66	44	21	1	-	-	6	13	352
ห้วยดอกจิว	429	60	37	46	45	51	44	21	-	-	-	5	12	321
หนองหอย	430	68	31	49	55	57	48	28	-	-	-	6	13	355
ห้วยดีหมี	432	65	38	56	50	55	43	21	-	-	-	3	13	344
แม่เมะ	433	52	34	51	51	49	33	18	-	-	-	3	10	301
ค่าต่ำสุด		52	31	43	45	49	33	16	1	-	-	1	9	301
ค่าสูงสุด		68	45	57	68	70	48	22	1	-	-	6	25	363
ค่าเฉลี่ย		64	37	49	57	56	39	22	1	-	-	3	12	340

หมายเหตุ - คือ ไม่มีฝนตกในช่วงเวลาดังกล่าว

ตารางผนวกที่ 13 ความยาวนานในการตกของฝนแต่ละครั้ง (duration) ของแต่ละสถานีวัดน้ำฝน
บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550

ชื่อสถานี	รหัส สถานี	ระยะเวลาที่ฝนตกในแต่ละครั้ง (ชั่วโมง)								จำนวน ครั้งที่ฝน ตก
		หน่วย: ร้อยละ								
		<0.5	0.5- 1.0	>1.0 -2.0	>2.0 -3.0	>3.0 -6.0	>6.0 -12.0	>12.0	รวม	
บวกจั่น	421	53.33	16.67	14.55	6.06	6.06	3.03	0.30	100.00	330
กองแหะ	422	56.47	18.18	11.57	5.51	5.51	2.48	0.28	100.00	363
บวกเตย	423	59.12	13.82	14.12	5.59	3.82	2.65	0.88	100.00	340
แม่จะ	424	56.85	14.29	13.41	6.41	6.12	2.62	0.29	100.00	343
ผานกกก	425	54.57	16.29	16.29	5.43	4.57	2.57	0.29	100.00	350
แม่สาใหม่	427	55.33	17.46	14.79	6.21	4.44	1.48	0.30	100.00	338
โป่งไคร้	428	57.67	14.20	14.49	5.40	6.82	1.14	0.28	100.00	352
ห้วยดอกบัว	429	59.19	18.38	11.84	3.74	4.36	2.49	-	100.00	321
หนองหอย	430	56.34	17.18	12.39	5.63	6.20	1.97	0.28	100.00	355
ห้วยดีหมี	432	59.88	15.99	11.92	4.94	5.52	1.45	0.29	100.00	344
แม่เมะ	433	58.14	14.95	12.29	6.98	6.31	1.00	0.33	100.00	301
ค่าต่ำสุด		53.33	13.82	11.57	3.74	3.82	1.00	0.28	100.00	301
ค่าสูงสุด		59.88	18.38	16.29	6.98	6.82	3.03	0.88	100.00	363
ค่าเฉลี่ย		56.99	16.13	13.42	5.63	5.43	2.08	0.35	100.00	340

หมายเหตุ - คือ ไม่มีฝนตกถึงระยะเวลาดังกล่าว

ตารางผนวกที่ 14 ความหนักเบาของฝนในแต่ละครั้งที่ฝนตก (rainfall intensity) ของแต่ละ
สถานีวัดน้ำฝน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550

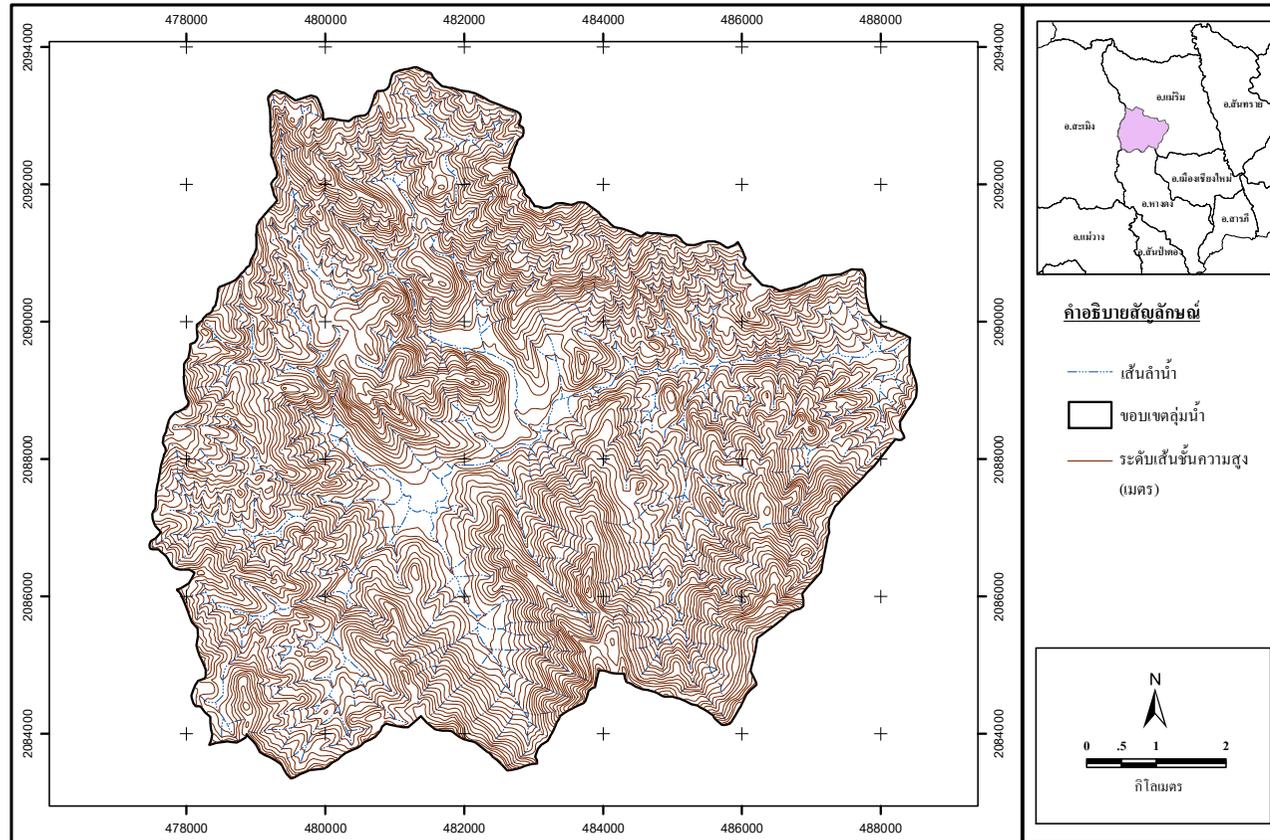
ชื่อสถานี	รหัส สถานี	ความหนักเบาของฝนตกแต่ละครั้ง (มม./ชม.)					รวม	หน่วย: ร้อยละ	จำนวน ครั้งที่ฝนตก
		<10.0	>10.0 -30.0	>30.0 -60.0	>60.0 -100.0	>100.0			
บวกจั่น	421	59.09	39.70	1.21	0.00	0.00	100.00	330	
กองแหะ	422	56.47	43.25	0.28	0.00	0.00	100.00	363	
บวกเตย	423	50.29	46.76	2.65	0.29	0.00	100.00	340	
แม่จะ	424	99.71	0.29	0.00	0.00	0.00	100.00	343	
ผานกกก	425	50.86	46.86	2.29	0.00	0.00	100.00	350	
แม่สาใหม่	427	55.92	43.79	0.30	0.00	0.00	100.00	338	
โป่งไคร้	428	57.39	42.61	0.00	0.00	0.00	100.00	352	
ห้วยดอกจิว	429	51.40	46.42	2.18	0.00	0.00	100.00	321	
หนองหอย	430	56.06	43.66	0.28	0.00	0.00	100.00	355	
ห้วยดีหมี	432	55.23	44.48	0.29	0.00	0.00	100.00	344	
แม่เมะ	433	52.82	44.19	2.99	0.00	0.00	100.00	301	
ค่าต่ำสุด		50.29	0.29	0.00	0.00	0.00	100.00	301	
ค่าสูงสุด		99.71	46.86	2.99	0.29	0.00	100.00	363	
ค่าเฉลี่ย		58.66	40.18	1.13	0.03	0.00	100.00	340	

ตารางผนวกที่ 15 ปริมาณน้ำฝน (rainfall amount) รายเดือนของแต่ละสถานีวัดน้ำฝน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่ ปี พ.ศ. 2550

หน่วย: มิลลิเมตร

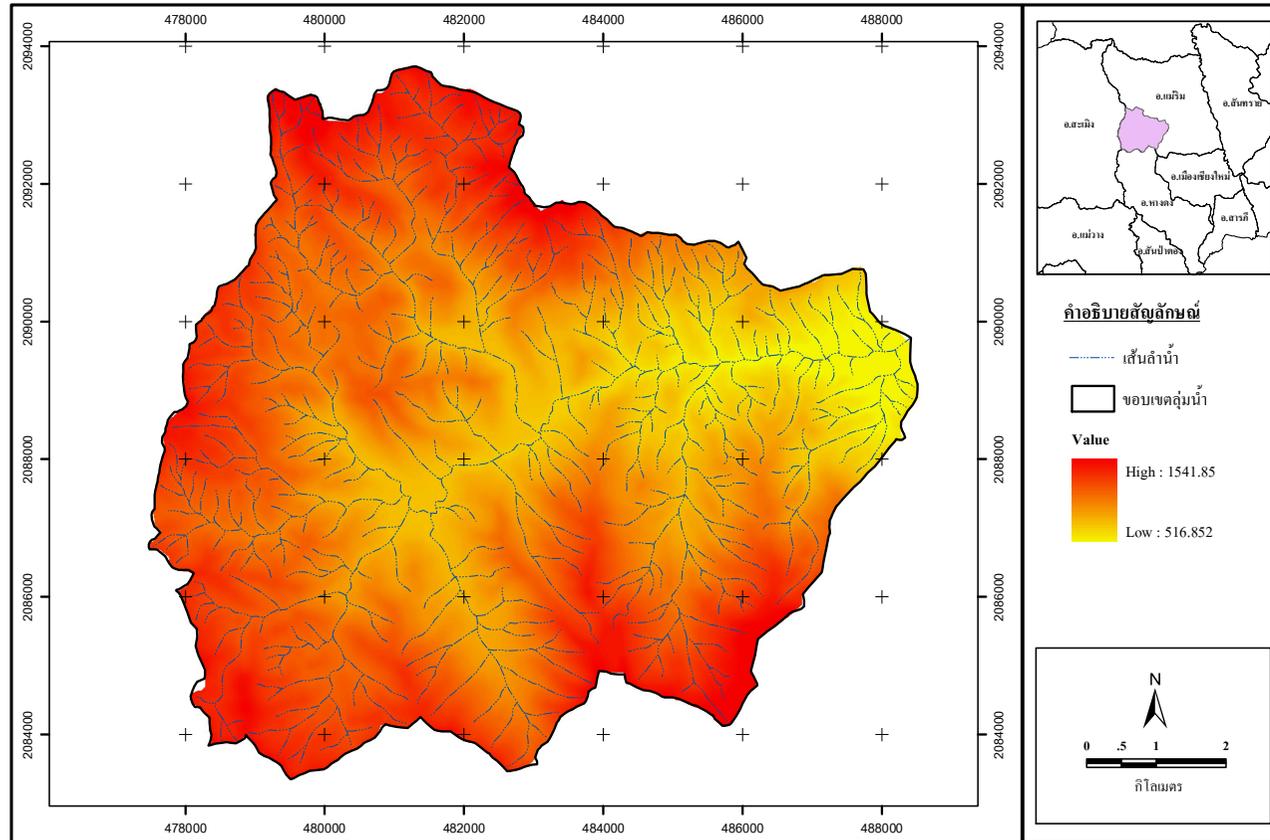
ชื่อสถานี	รหัสสถานี	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	ตลอดทั้งปี
บวกกั้น	421	438.70	234.04	158.02	264.19	254.93	133.96	82.33	-	-	-	0.25	54.76	1,621.18
กองแหะ	422	368.71	246.27	158.02	264.19	289.29	133.71	82.33	-	-	-	3.59	75.29	1,621.40
บวกเตย	423	441.56	259.17	193.54	187.49	388.09	129.13	82.33	-	-	-	1.55	57.43	1,740.29
แม่จะ	424	368.43	231.16	187.23	258.80	305.86	133.96	82.33	-	-	-	1.72	71.28	1,640.77
ผานกกก	425	499.49	277.27	232.55	300.83	258.29	123.40	90.50	-	-	-	2.18	54.48	1,838.99
แม่สาใหม่	427	275.44	152.24	148.31	222.60	276.22	107.25	80.04	-	-	-	1.31	73.50	1,336.91
โป่งไคร้	428	387.71	192.85	149.71	140.64	316.19	101.99	69.74	-	-	-	69.71	69.14	1,497.68
ห้วยดอกจิว	429	367.72	152.51	182.54	220.18	342.59	136.88	64.93	-	-	-	4.65	70.68	1,542.68
หนองหอย	430	387.71	192.85	149.71	187.43	383.71	178.28	94.86	-	-	-	69.71	69.14	1,713.40
ห้วยดีหมี	432	298.55	153.43	156.38	203.32	319.47	131.96	64.93	-	-	-	3.76	75.91	1,407.71
แม่เมะ	433	392.89	134.60	161.75	235.19	225.72	129.69	62.31	-	-	-	6.87	63.16	1,412.18
ค่าต่ำสุด		275.44	134.60	148.31	140.64	225.72	101.99	62.31	-	-	-	0.25	54.48	1,336.91
ค่าสูงสุด		499.49	277.27	232.55	300.83	388.09	178.28	94.86	-	-	-	69.71	75.91	1,838.99
ค่าเฉลี่ย		384.26	202.40	170.71	225.90	305.49	130.93	77.88	-	-	-	15.03	66.80	1,579.38

หมายเหตุ - คือ ไม่มีฝนตกในช่วงเวลาดังกล่าว

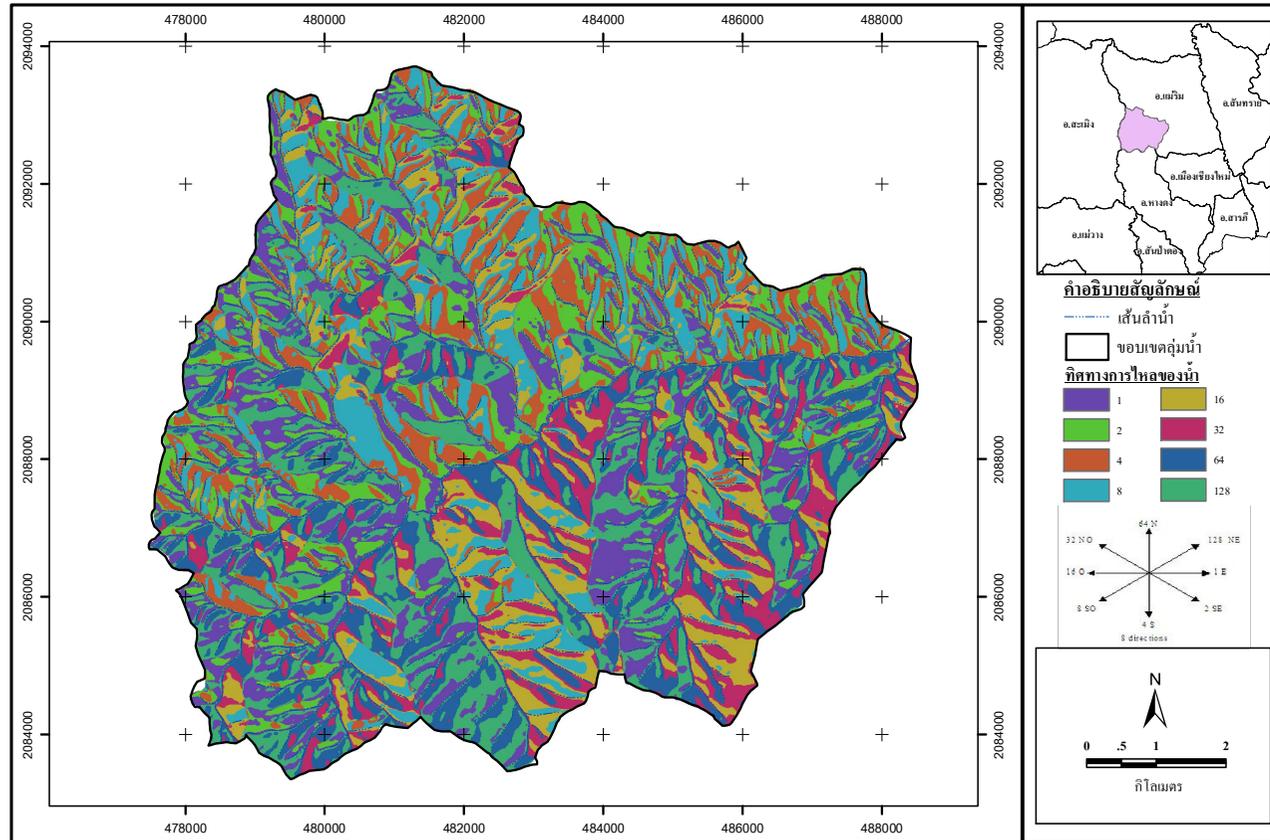


ภาพผนวกที่ 1 เส้นชั้นความสูง (contour) บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

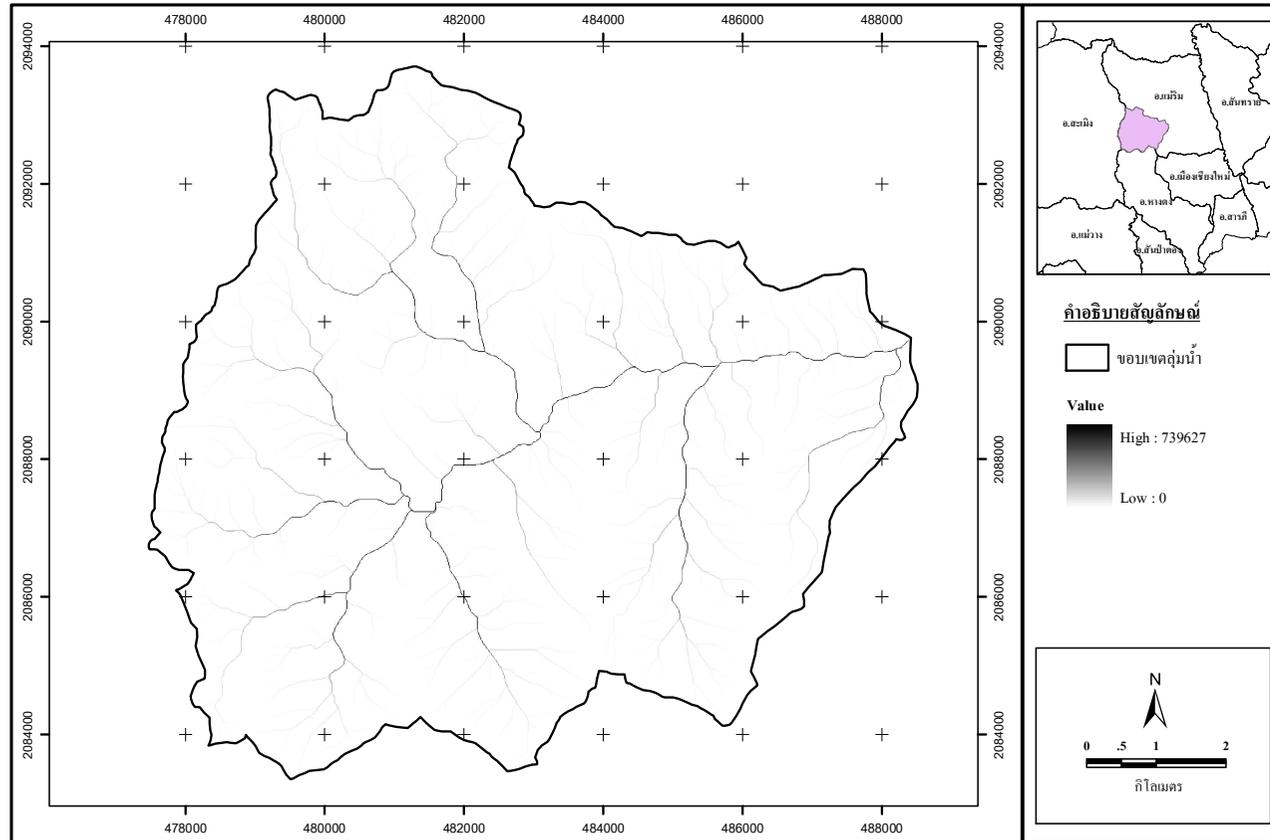
ที่มา: กรมแผนที่ทหาร (2548)



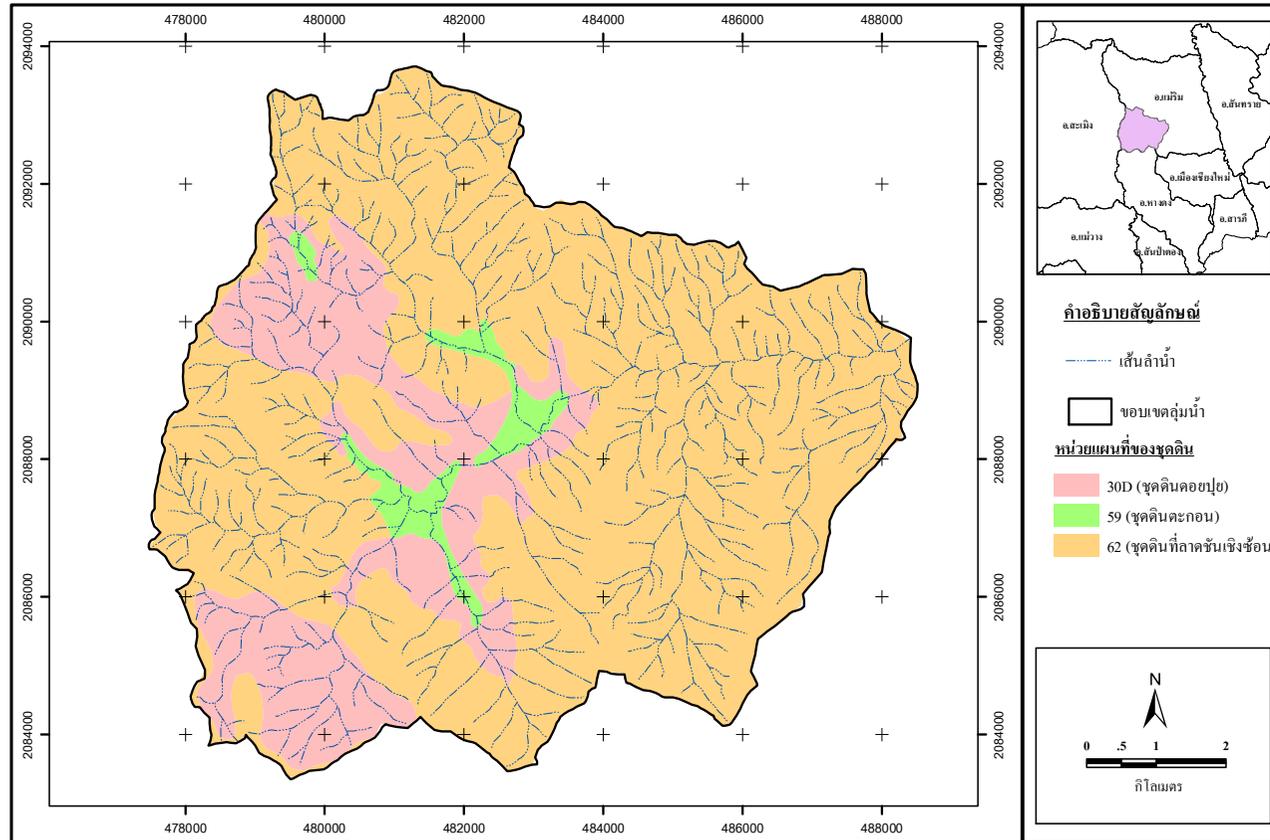
ภาพผนวกที่ 2 แบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model; DEM)
 บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่



ภาพผนวกที่ 3 ทิศทางการไหลของน้ำ (flow direction) บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

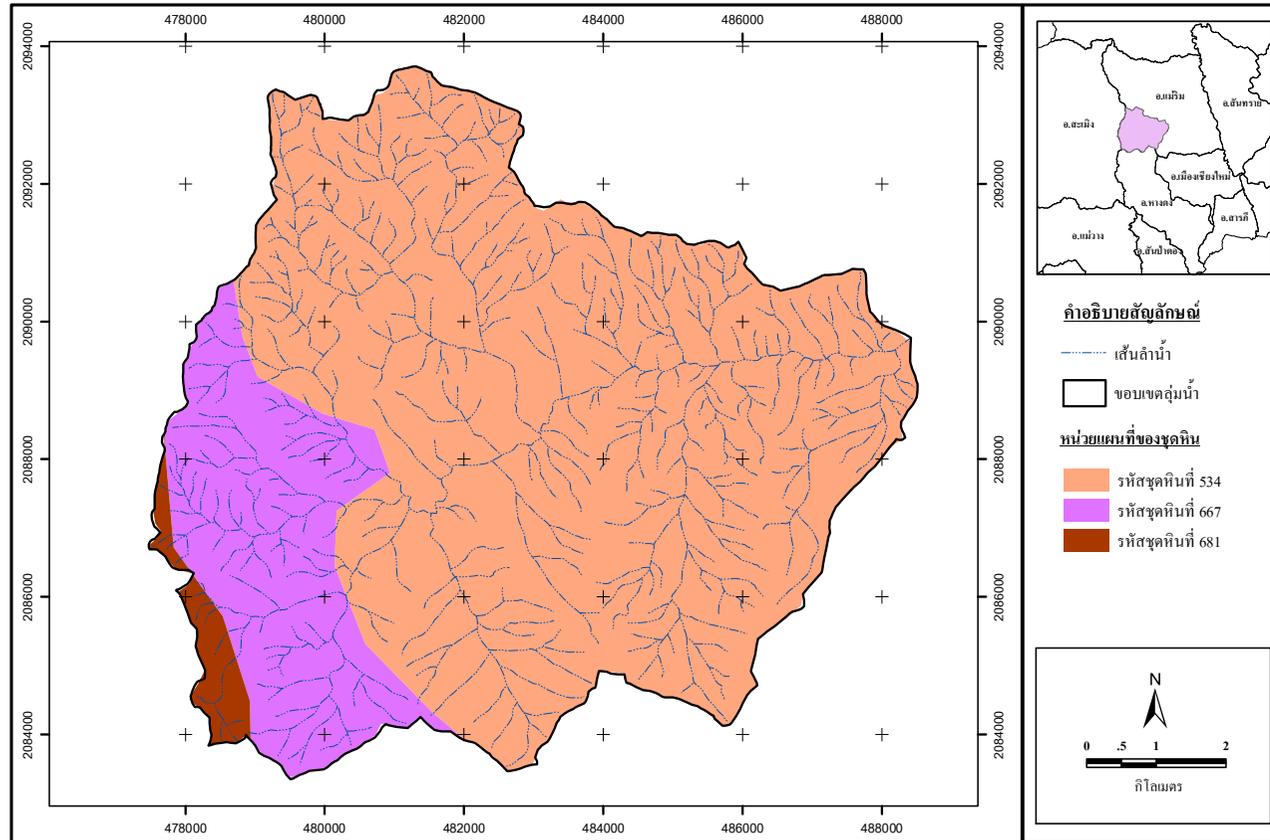


ภาพผนวกที่ 4 การไหลสะสม (flow accumulation) บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่



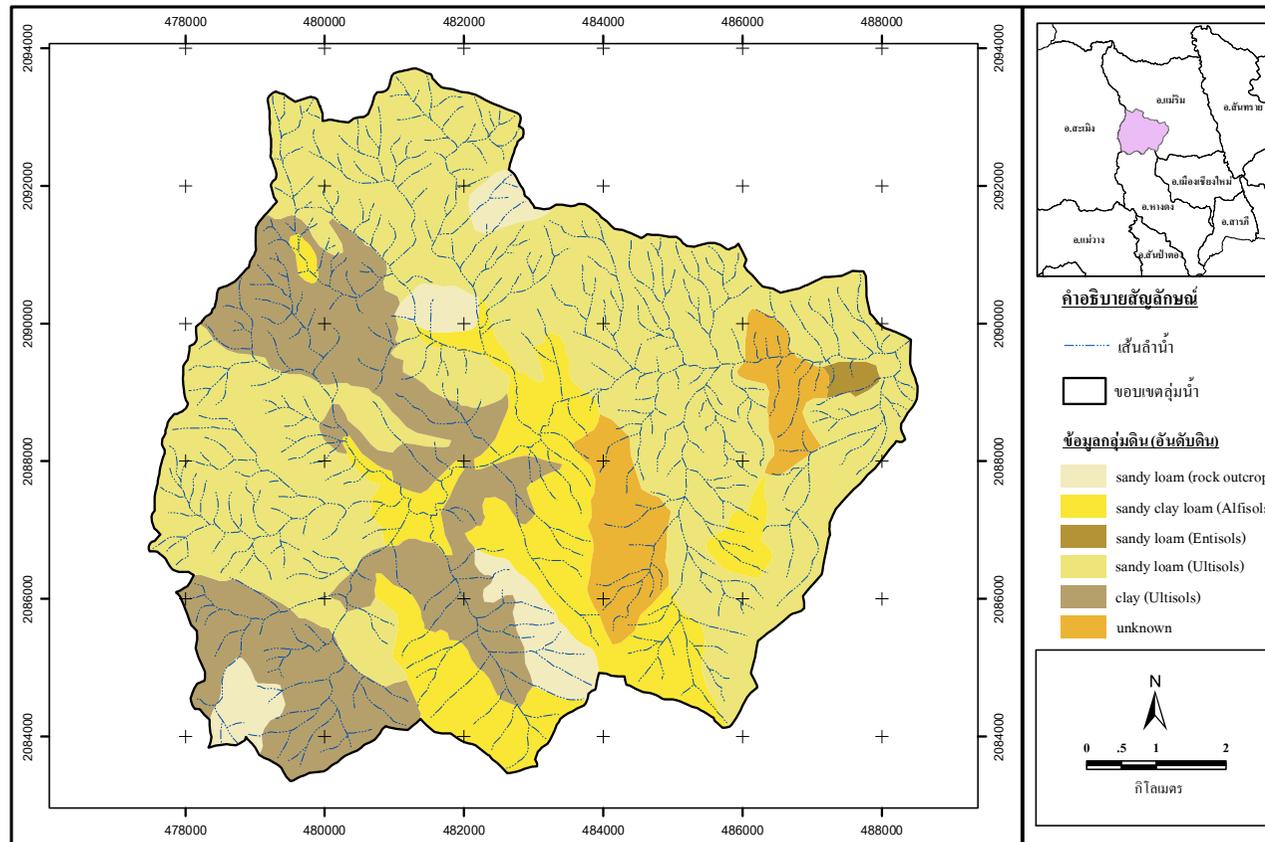
ภาพผนวกที่ 5 แผนที่ของกลุ่มดิน (soil group) บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2543)



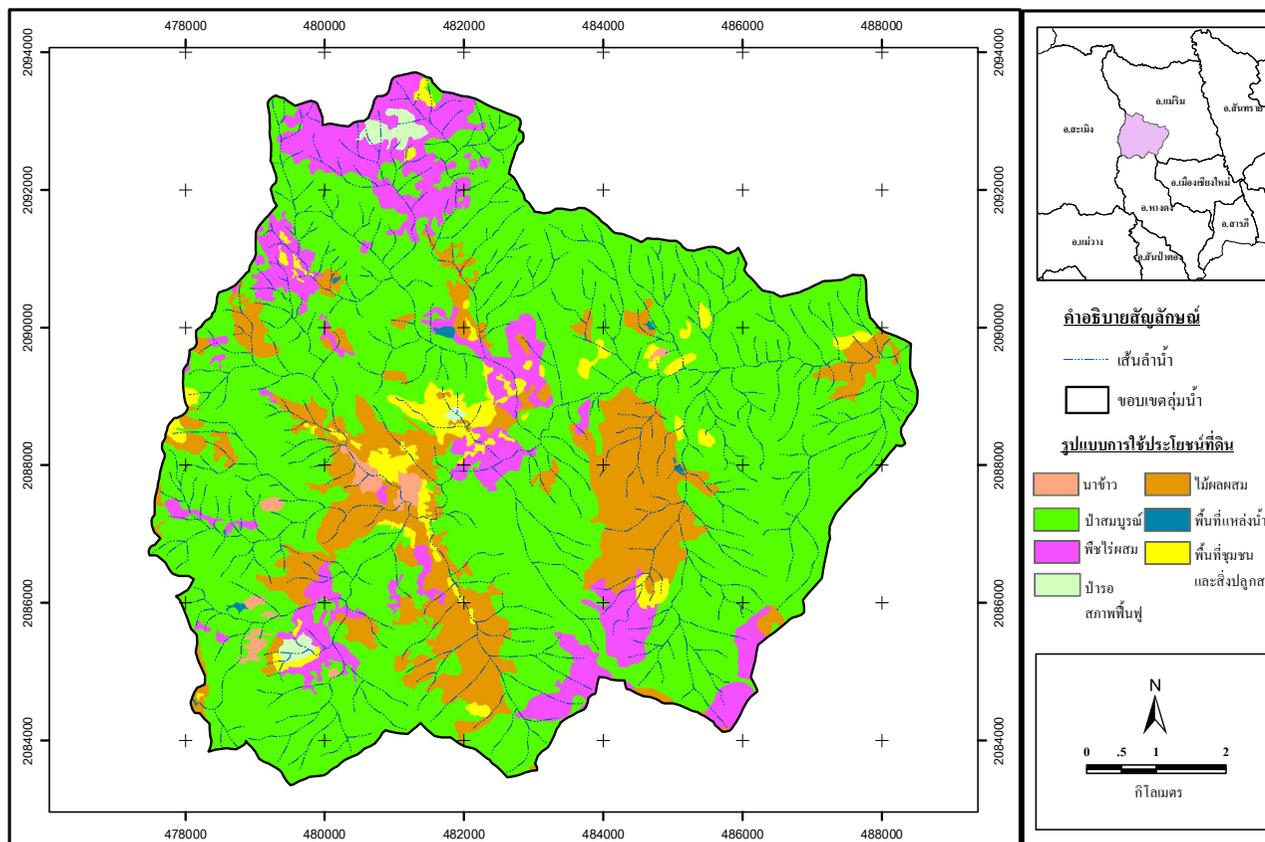
ภาพผนวกที่ 6 ลักษณะทางธรณีวิทยา (geology) บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2543)



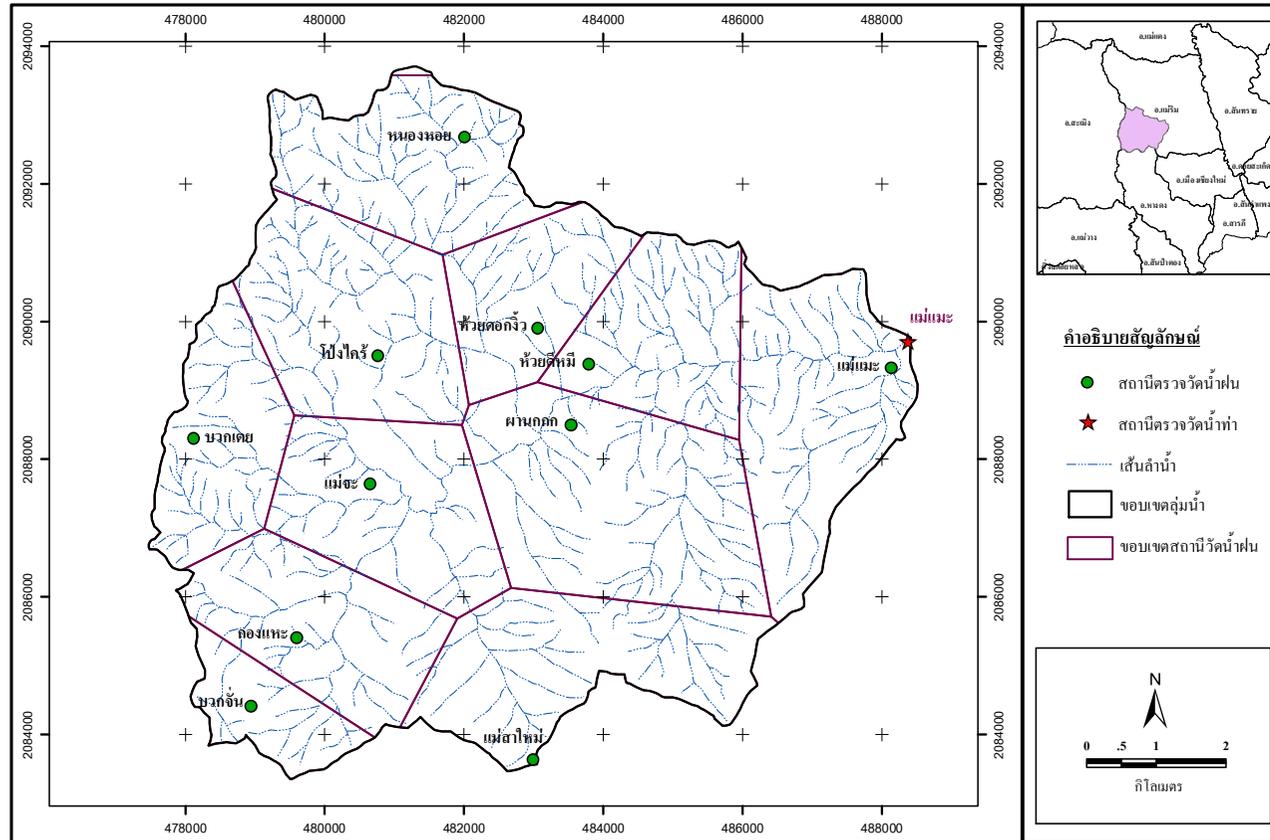
ภาพผนวกที่ 7 ลักษณะของดิน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2543) และ Alan (2007)

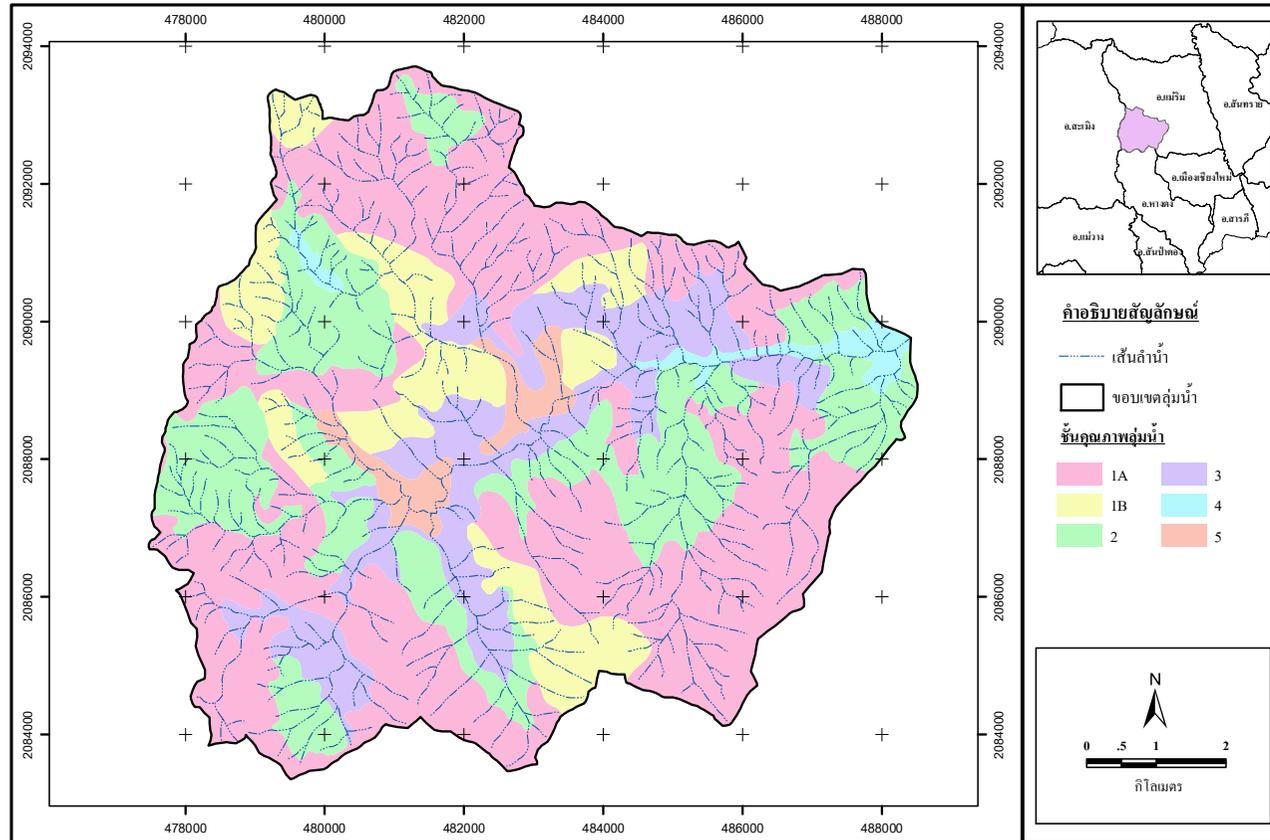


ภาพผนวกที่ 8 การใช้ประโยชน์ที่ดิน ในปี พ.ศ. 2550 บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

ที่มา: กรมพัฒนาที่ดิน (2550)

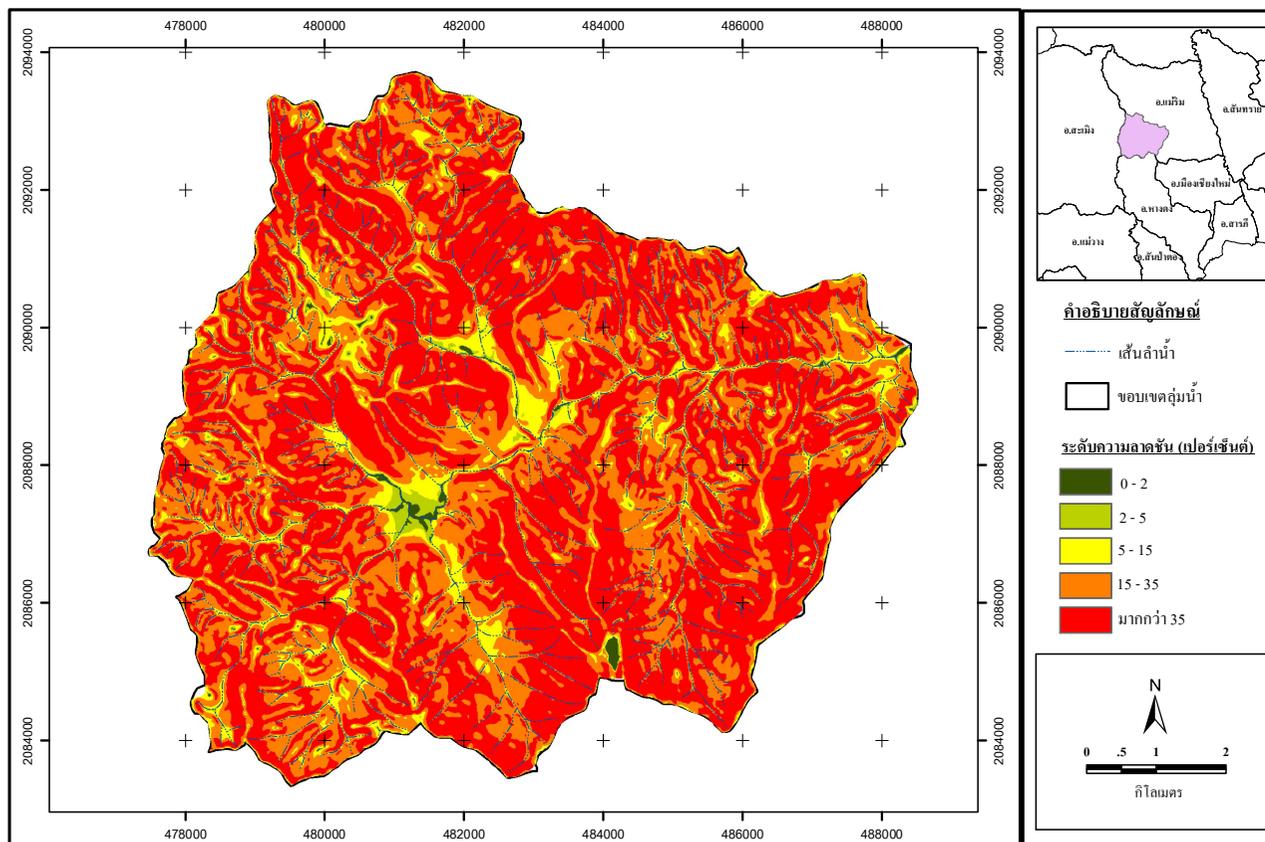


ภาพผนวกที่ 9 ขอบเขตอิทธิพลของสถานีวัดน้ำฝน โดยวิธี Thiessen polygon
บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

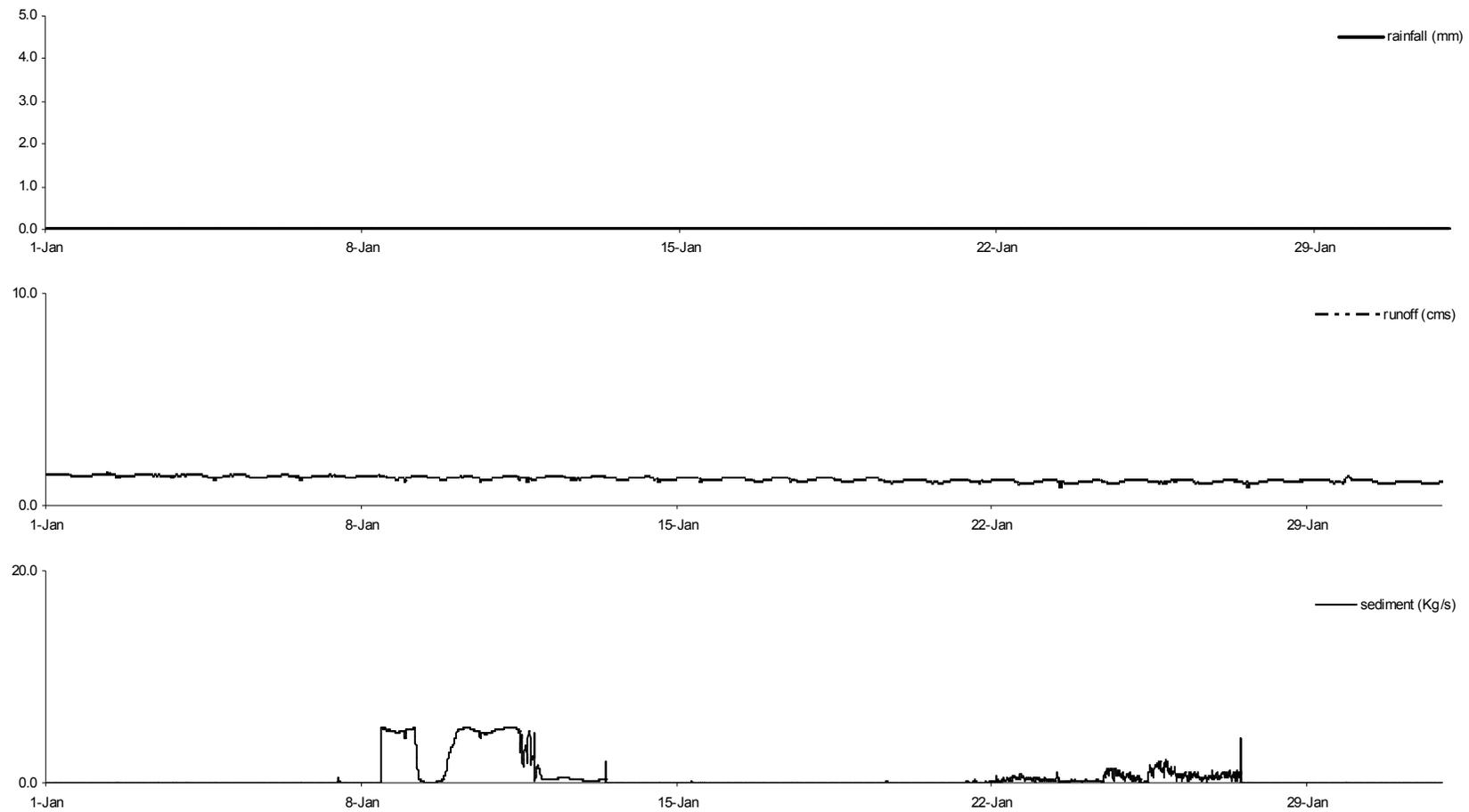


ภาพผนวกที่ 10 ชั้นคุณภาพลุ่มน้ำ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

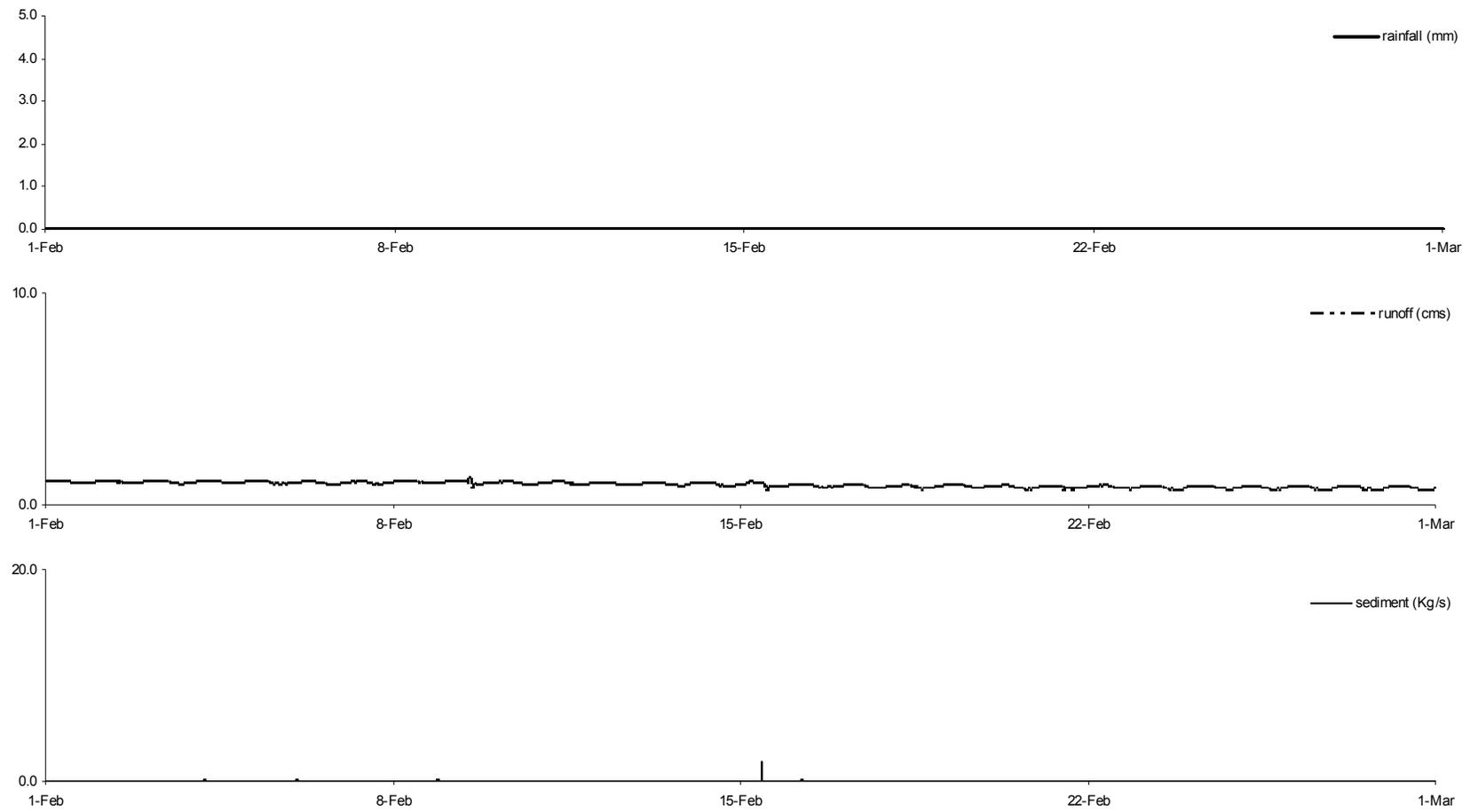
ที่มา: คณะกรรมการสิ่งแวดล้อม (2525)



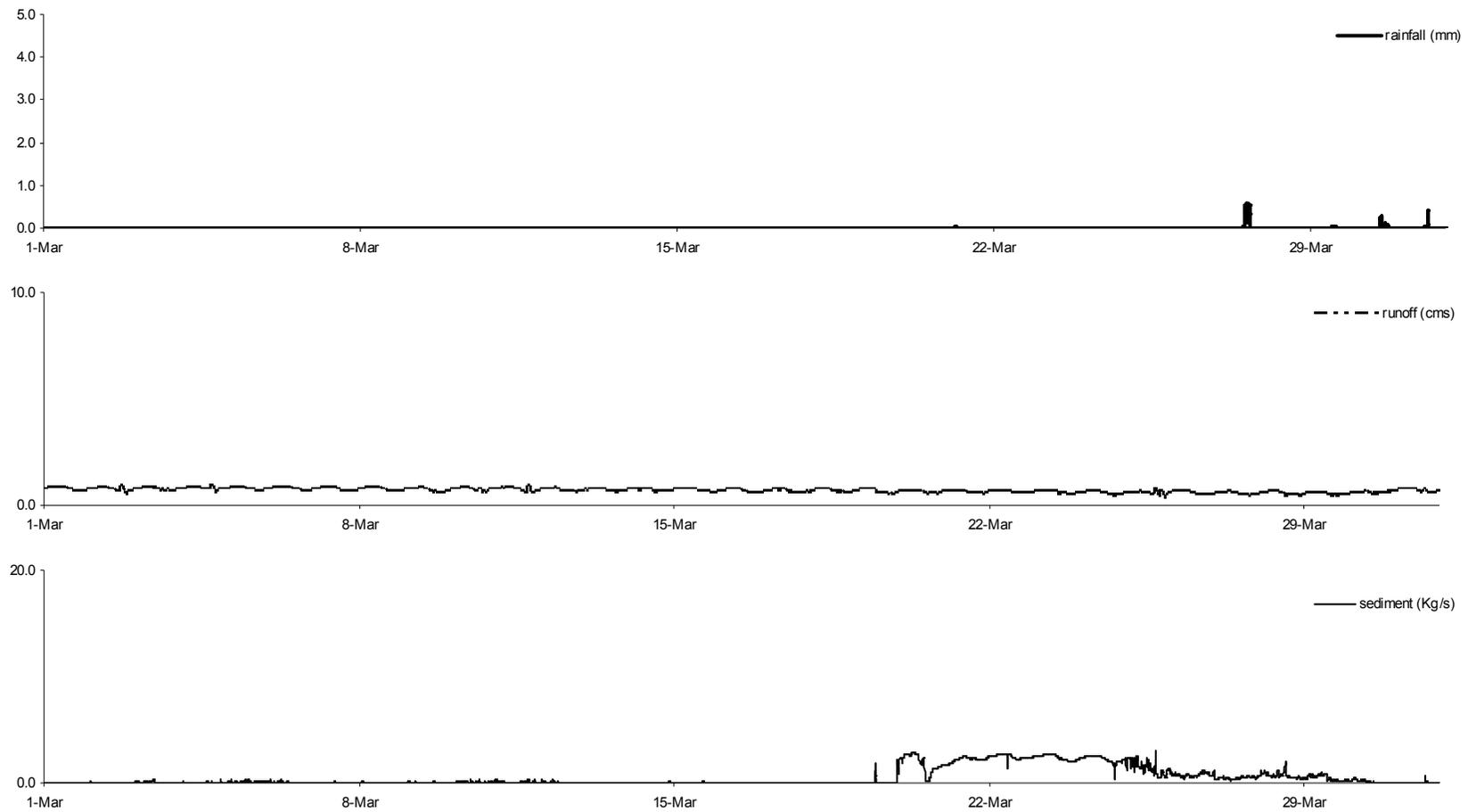
ภาพผนวกที่ 11 ระดับความลาดชัน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่



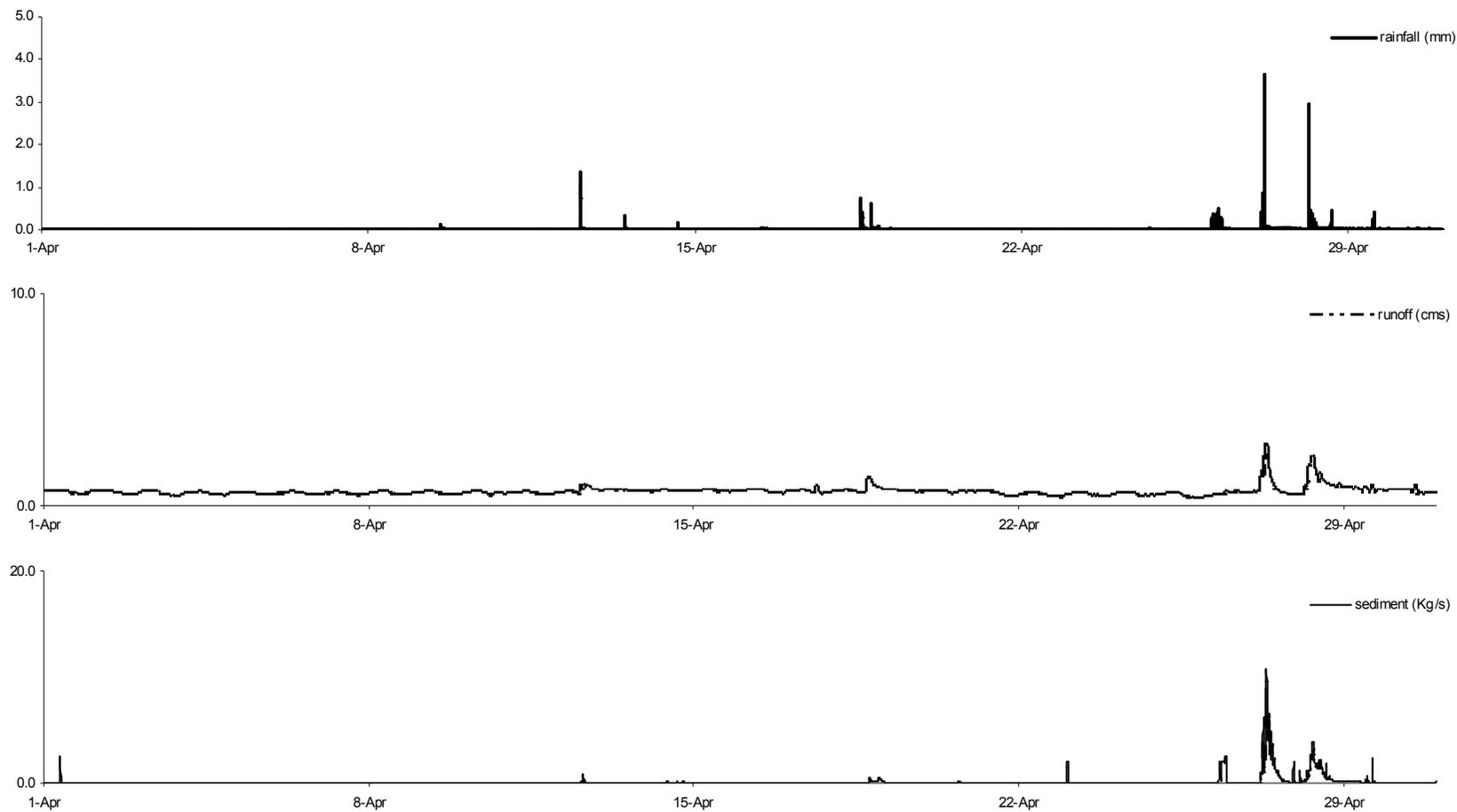
ภาพผนวกที่ 12 ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่าที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่
ประจำเดือนมกราคม พ.ศ. 2550



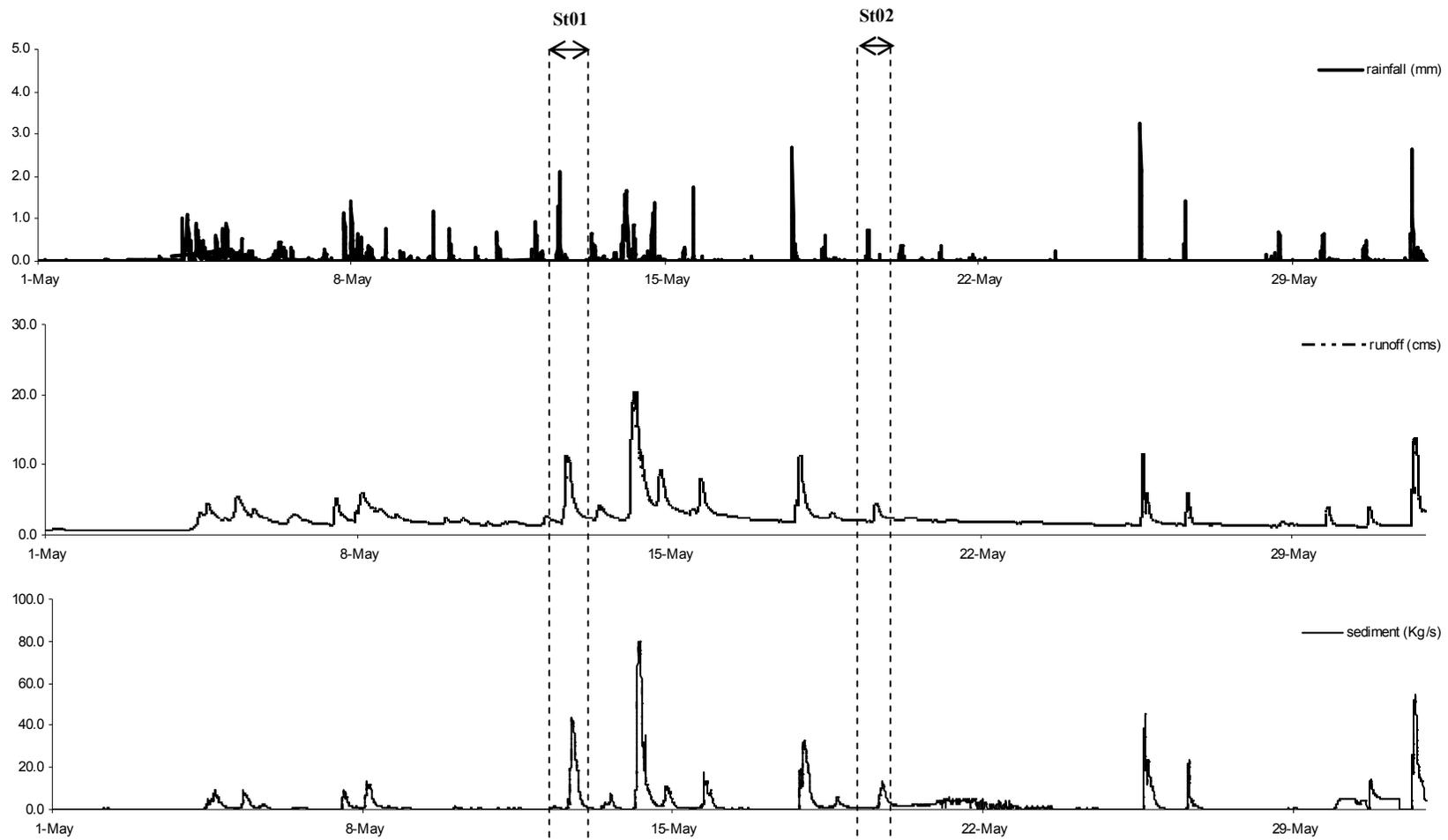
ภาพผนวกที่ 13 ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่าที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่
ประจำเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2550



ภาพผนวกที่ 14 ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่
ประจำเดือนมีนาคม พ.ศ. 2550

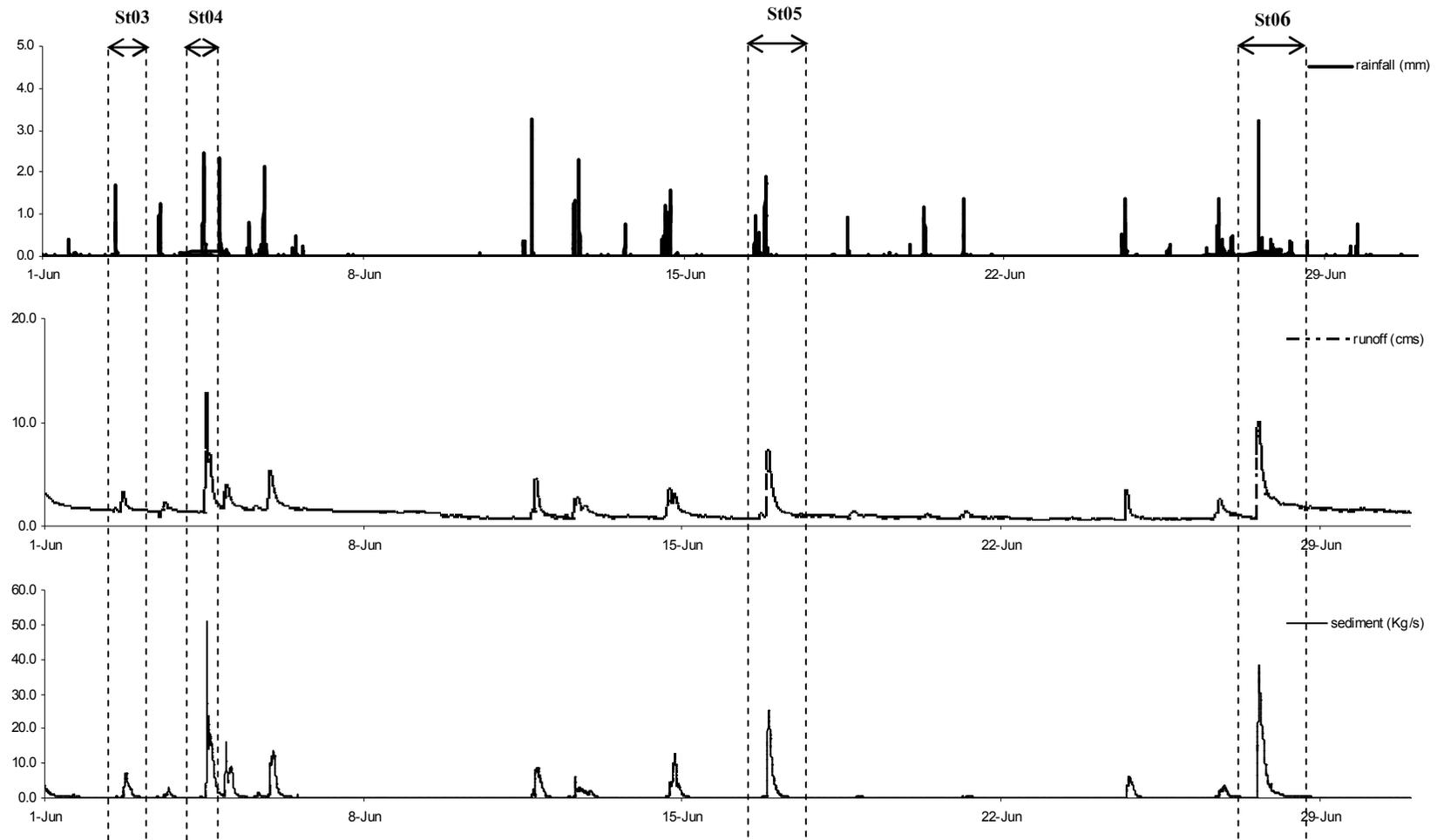


ภาพผนวกที่ 15 ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่
ประจำเดือนเมษายน พ.ศ. 2550



ภาพผนวกที่ 16 ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่
ประจำเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2550

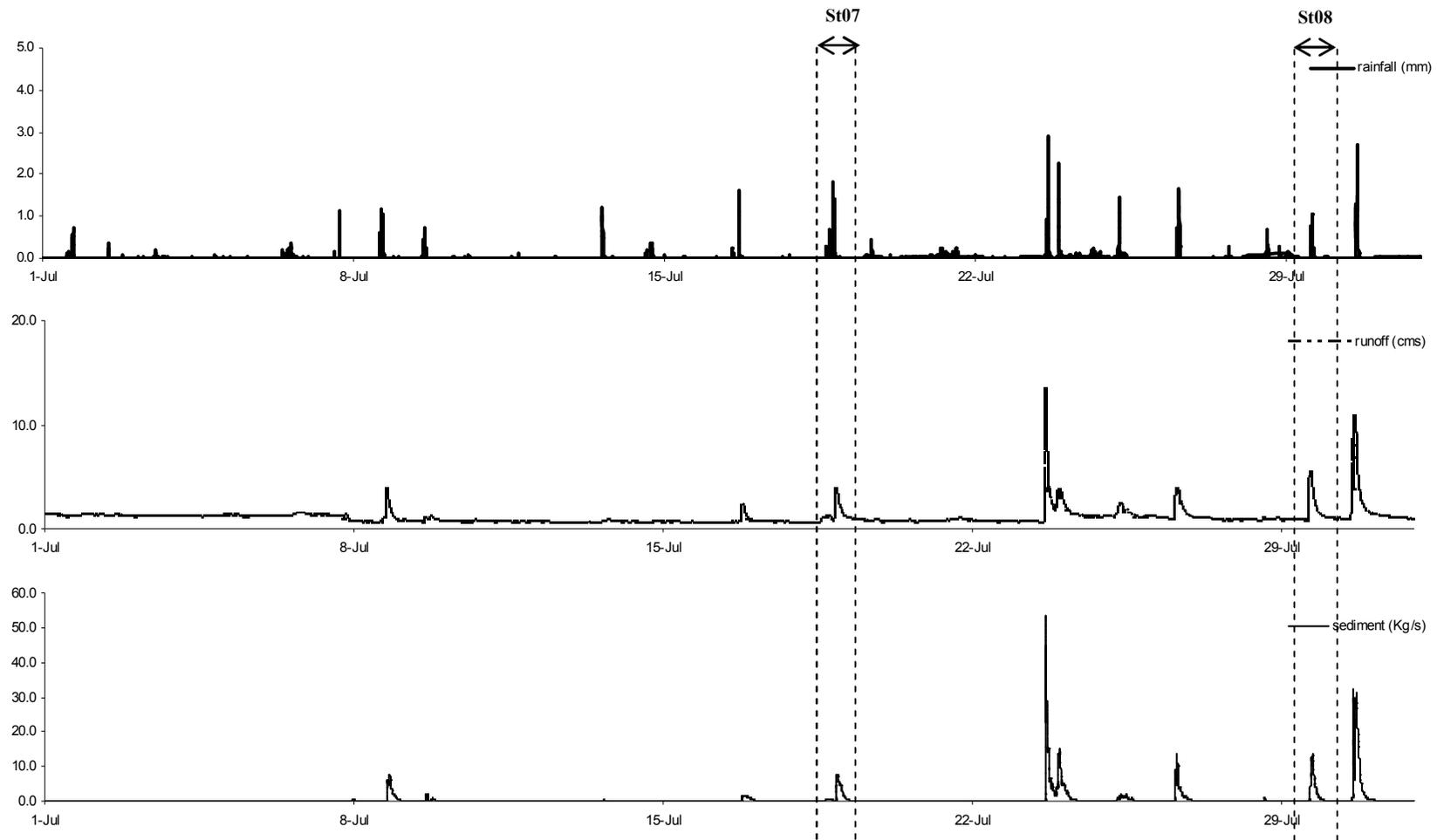
หมายเหตุ \longleftrightarrow ช่วงเวลาของสตอร์มฝนที่เลือกทำการศึกษา



ภาพผนวกที่ 17 ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

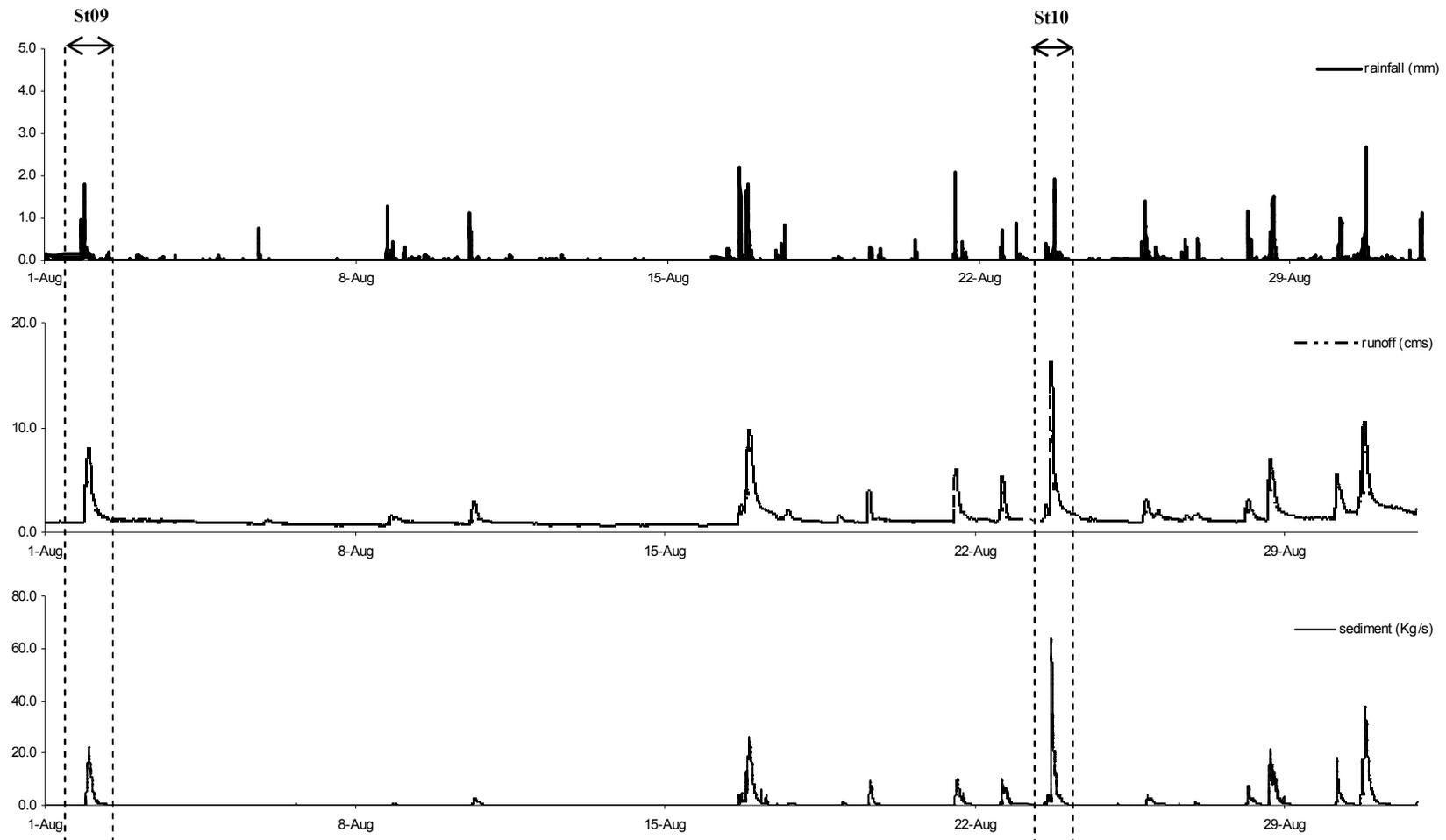
ประจำเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2550

หมายเหตุ \longleftrightarrow ช่วงเวลาของสตรอร์มฝนที่เลือกทำการศึกษา



ภาพผนวกที่ 18 ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่
 ประจำเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2550

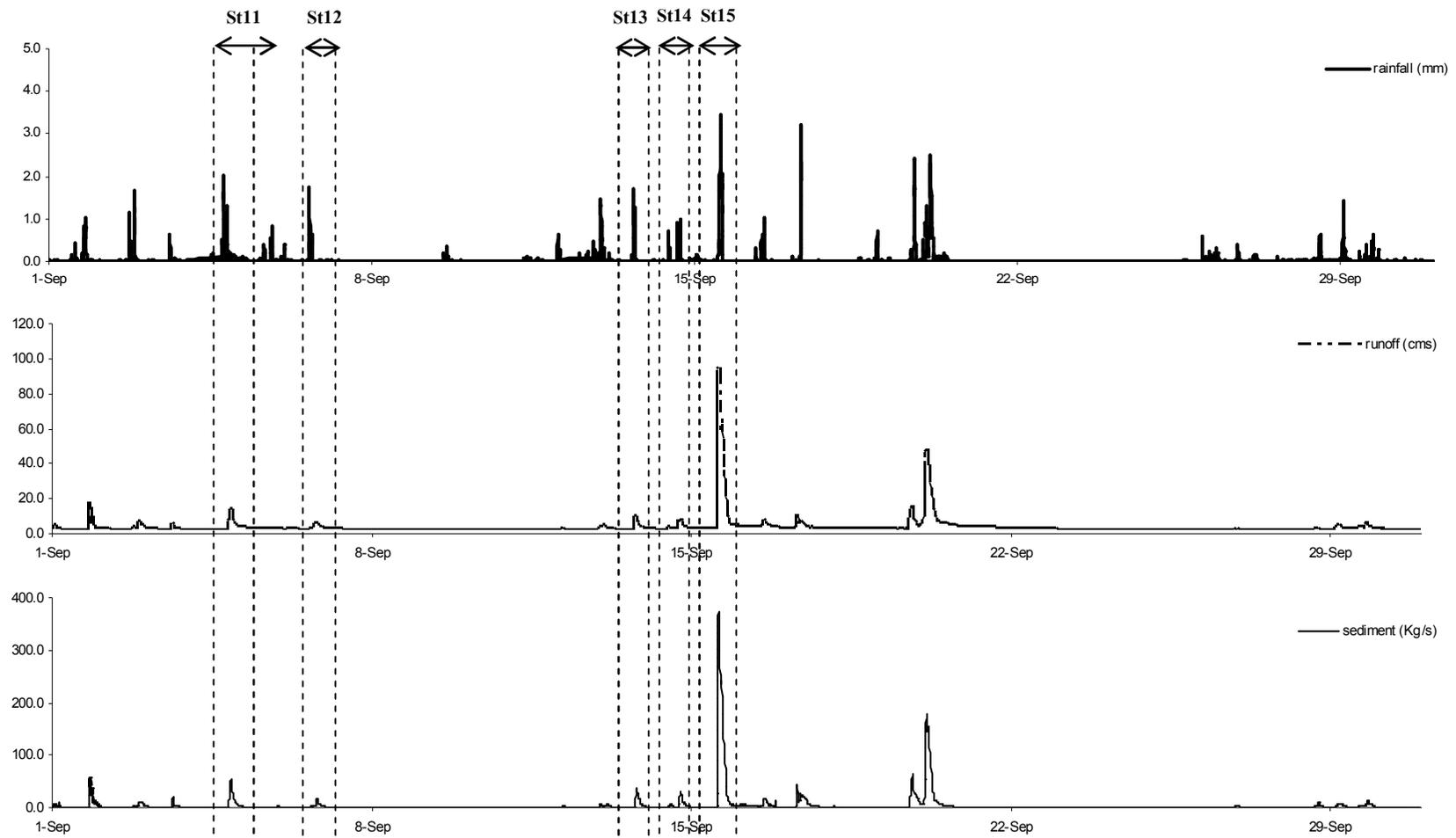
หมายเหตุ \longleftrightarrow ช่วงเวลาของส torm ฝนที่เลือกทำการศึกษา



ภาพผนวกที่ 19 ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่

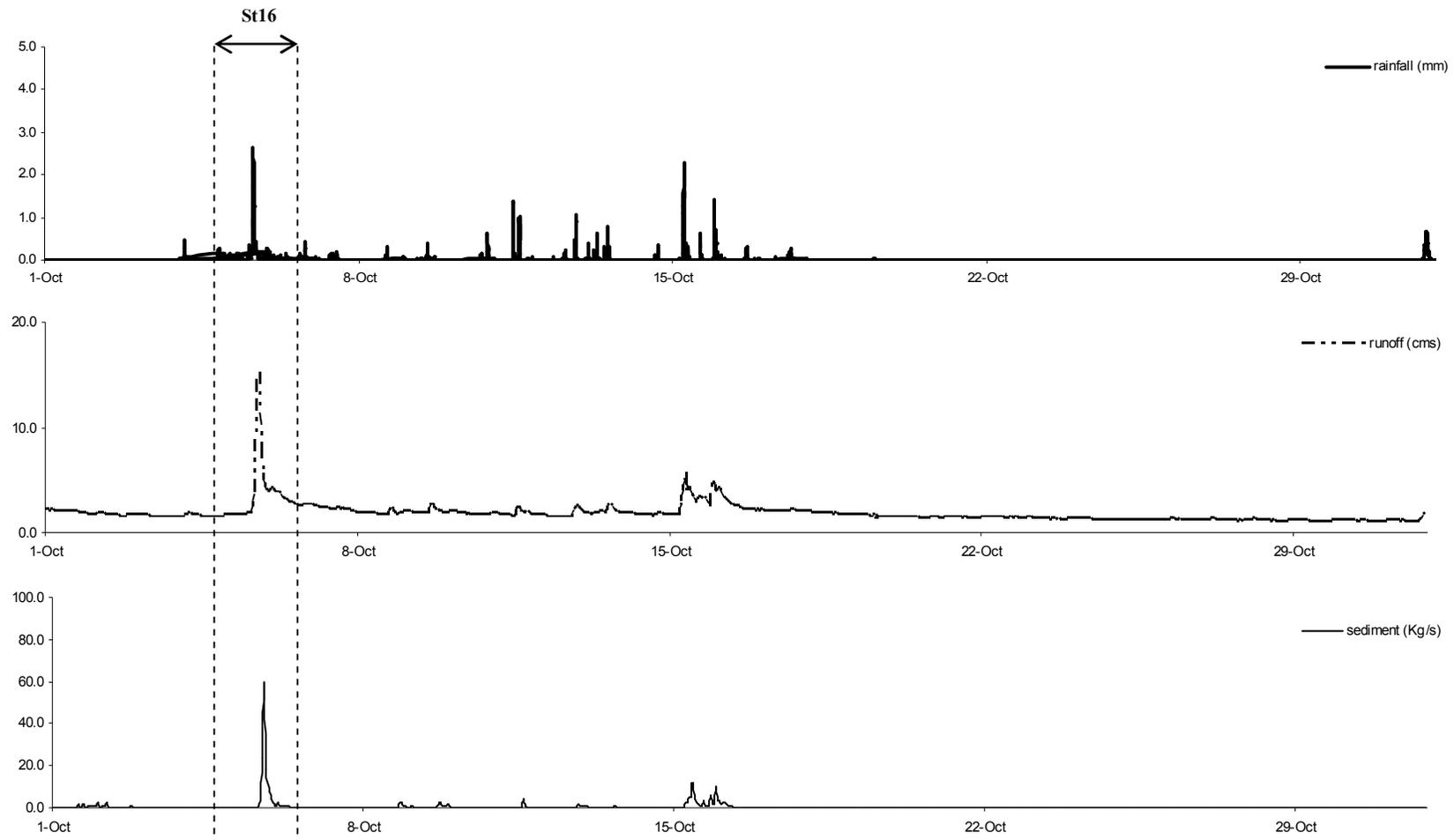
ประจำเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2550

หมายเหตุ \longleftrightarrow ช่วงเวลาของสตอร์มฝนที่เลือกทำการศึกษา



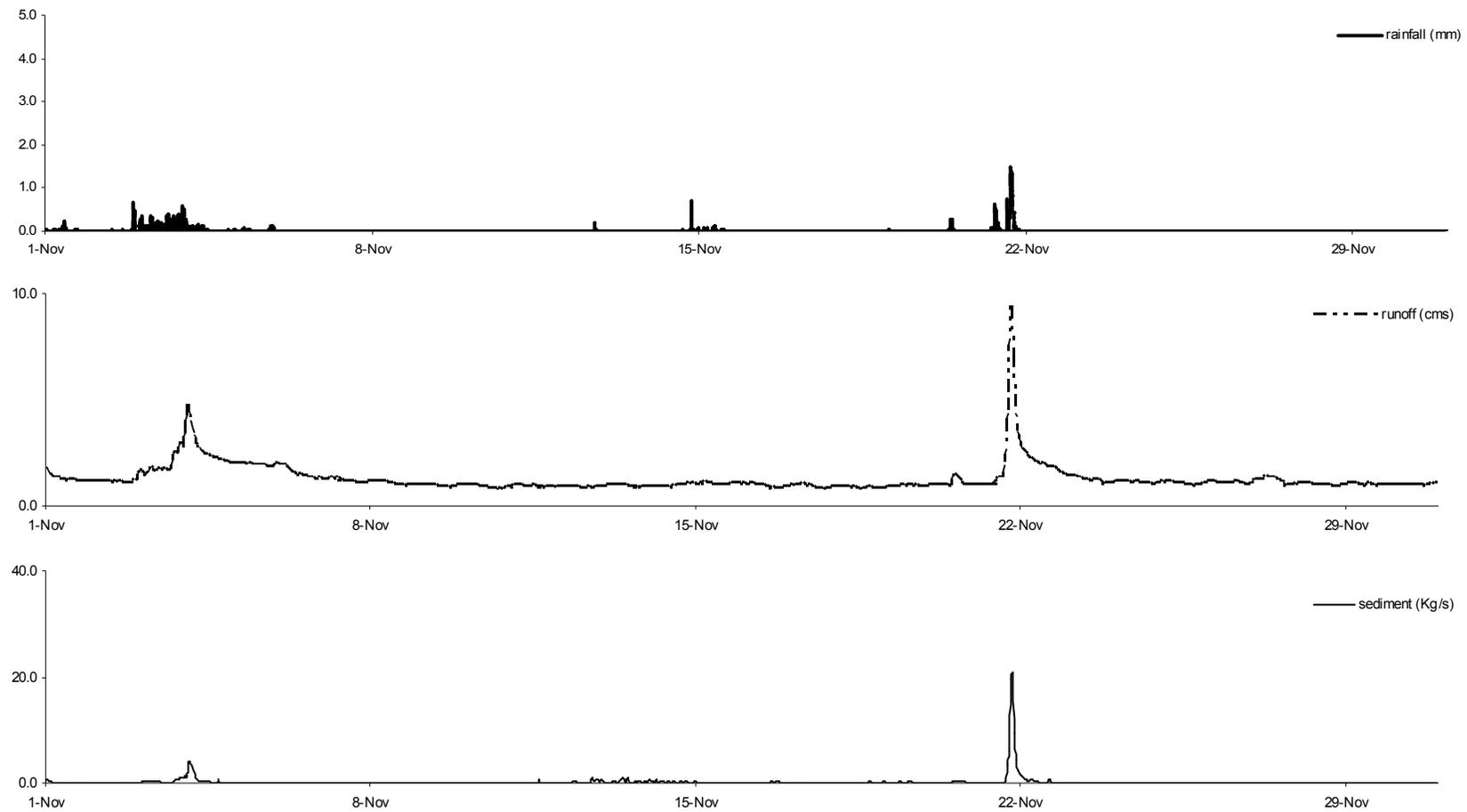
ภาพผนวกที่ 20 ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่
ประจำเดือนกันยายน พ.ศ. 2550

หมายเหตุ \longleftrightarrow ช่วงเวลาของสตรมฝนที่เลือกทำการศึกษา

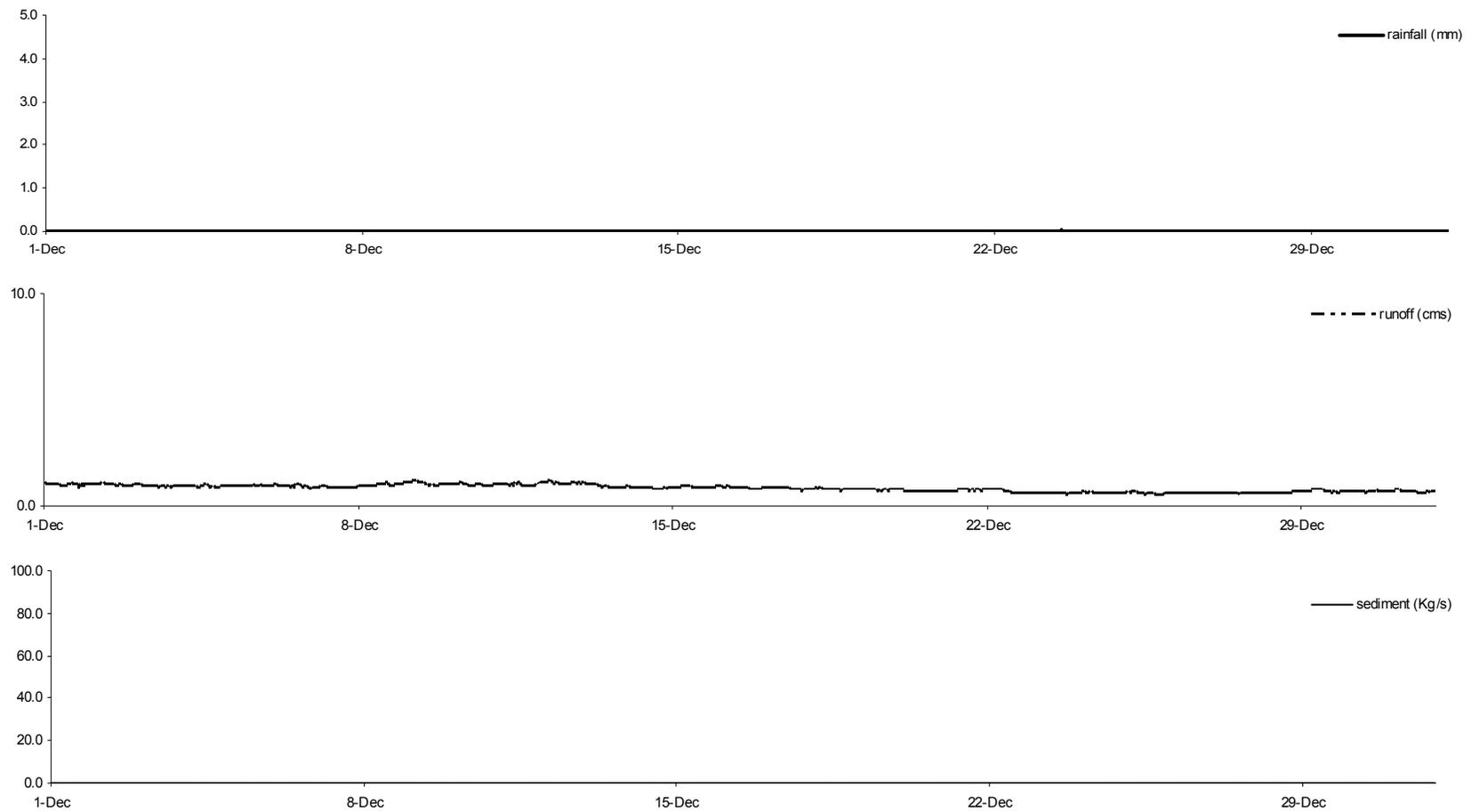


ภาพผนวกที่ 21 ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่
ประจำเดือนตุลาคม พ.ศ. 2550

หมายเหตุ \longleftrightarrow ช่วงเวลาของสตอร์มฝนที่เลือกทำการศึกษา



ภาพผนวกที่ 22 ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่
ประจำเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2550



ภาพผนวกที่ 23 ผลผลิตตะกอน และปริมาณน้ำท่า ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำสาขาแม่สา จังหวัดเชียงใหม่
ประจำเดือนธันวาคม พ.ศ. 2550

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวอนุสรรา อินทมา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	27 กรกฎาคม พ.ศ. 2527
สถานที่เกิด	อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก
ประวัติการศึกษา	วทบ. (วนศาสตร์) เกียรตินิยมอันดับสอง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักวิชาการป่าไม้
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนคุณภาพงานวิจัย ระดับบัณฑิตศึกษา