

การศึกษาการแปลงข้อมูลความสูงไลดาร์บน WGS84 ลงสู่ระดับน้ำทะเลปานกลาง



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF THE TRANSFORMATION OF LIDAR'S Z DATA INTO MEAN SEA LEVEL FROM
WGS84

Mr. Worapod Masiri



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Survey Engineering
Department of Survey Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการแปลงข้อมูลความสูงไครดาร์บน WGS84 ลงสู่ระดับน้ำทะเลปานกลาง
โดย	นายวรพจน์ มาศิริ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ธงทิศ ฉายากุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(No data found)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ชวินทร์ ทินนโชติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ธงทิศ ฉายากุล) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

..... กรรมการ
(บรรเจ็ด พละการ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(สุกิจ วิเศษสินธุ์)

วรพจน์ มาศิริ : การศึกษาการแปลงข้อมูลความสูงไลดาร์บน WGS84 ลงสู่ระดับน้ำทะเลปานกลาง (A STUDY OF THE TRANSFORMATION OF LIDAR'S Z DATA INTO MEAN SEA LEVEL FROM WGS84) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ธงทิศ ฉายากุล, 82 หน้า.

การสำรวจด้วยระบบไลดาร์เป็นการสำรวจที่ให้ข้อมูลความถูกต้องทางดิ่งสูง ในการสำรวจด้วยระบบไลดาร์นั้นข้อมูลที่ได้จะมีความสูงอ้างอิงพื้นหลักฐานทธรณี WGS84 ในการประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ จะใช้ความสูงที่อ้างอิงกับระดับน้ำทะเลปานกลาง ทำให้ต้องมีกระบวนการแปลงพื้นหลักฐานจากพื้นหลักฐานทธรณี WGS84 ไปเป็นระดับน้ำทะเลปานกลาง ดังนั้นพื้นผิวที่ใช้แปลงความสูงจึงมีผลต่อความถูกต้องทางดิ่งของข้อมูลไลดาร์ที่จะนำไปใช้งาน ในการศึกษาครั้งนี้ได้เปรียบเทียบวิธีการแปลงพื้นหลักฐานข้อมูลไลดาร์ในพื้นที่กรุงเทพฯ ด้วยการหาค่าความสูงย็อยด์ (Geoid Undulation) ที่ได้จากวิธีต่าง ๆ ดังนี้ การประมาณค่าภายใน (interpolation) แบบ IDW, Spline, Kriging Triangulated Irregular Network (TIN) การแปลงค่าพิกัดด้วยแบบจำลองโพลีโนเมียล และการแปลงค่าพิกัดแบบนอนพาราเมตริกด้วยวิธี Loess เปรียบเทียบกับการแปลงด้วยพื้นผิวย็อยด์สากล EGM96 และ EGM2008 เมื่อได้วิธีการที่ให้ความถูกต้องดีที่สุด จะนำไปทดสอบการเปลี่ยนแปลงความถูกต้องเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนและตำแหน่งของจุดควบคุม เพื่อทดสอบว่าจำนวนและตำแหน่งจุดที่เหมาะสมในการแปลงความสูงข้อมูลไลดาร์ด้วยวิธีที่ทดสอบได้

จากการศึกษาการแปลงความสูงข้อมูลไลดาร์ด้วยวิธีการประมาณค่าภายในแบบ Spline ให้ค่า RMSE เท่ากับ 0.13 เมตร และค่า LE95 เท่ากับ 0.25 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองย็อยด์สากล EGM96 ซึ่งนิยมใช้ในกระบวนการเชิงพาณิชย์ที่ให้ค่า RMSE เท่ากับ 0.18 เมตร และค่า LE95 เท่ากับ 0.36 เมตร แสดงให้เห็นว่าสามารถนำวิธีการประมาณค่าภายในแบบ Spline มาประยุกต์ใช้ในการแปลงความสูงข้อมูลไลดาร์ได้ และเมื่อนำมาศึกษาผลกระทบของจำนวนและตำแหน่งจุดควบคุมพบว่า จุดควบคุมจำนวน 40 จุดต่อพื้นที่ 440 ตร.กม. เพียงพอในการใช้สร้างแบบจำลองความสูงย็อยด์เพื่อใช้แปลงความสูงข้อมูลไลดาร์

ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5670360321 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORDS: LIDAR / HEIGHT TRANSFORMATION / ACCURACY IMPROVEMENT

WORAPOD MASIRI: A STUDY OF THE TRANSFORMATION OF LIDAR'S Z DATA INTO MEAN SEA LEVEL FROM WGS84. ADVISOR: THONGTHIT CHAYAKULA, Ph.D., 82 pp.

The data from airborne LiDAR is height information of the area with a very high accuracy and also a very dense spatial resolution. The coordinate of the data is referenced by GNSS on Board, thus both vertical and horizontal coordinates are referred to the WGS84 ellipsoid. But most applications of LiDAR data use Mean-Sea-Level datum as reference. In the conversion process of WGS84 height to Mean-Sea-Level height Geoid Undulation is needed. Therefore the vertical accuracy of the data depends largely on Geoid Model. In this paper, Geoid modeling using Inverse Distance Weight (IDW), Spline, Kriging Triangulated Irregular Network (TIN) interpolation methods, Polynomials model Coordinate transformation and nonparametric model using Loess algorithm were tested to transform the LiDAR height to Mean-Sea-Level and then compared the transformed data with height using EGM96 and EGM2008 model on the selected checkpoints to study the effect of height and Geoid surface accuracy. The most accurate model was then selected for Location and Number of control point which effected the accuracy of geoid model.

The research result showed that the RMSE 0.13 meter and LE95 0.25 meter accuracy of spline geoid interpolation method. It provided the best accuracy from the transformation height. Compare with the EGM96, The accuracy of EGM96 performed only the RMSE 0.19 meter and LE95 0.36 meter. The geoid undulation from spline interpolation and provide a comparable accuracy with, EGM96 and EGM2008, in which led to the acceptable accuracy of the mean sea level height. With the Location and a Number test of 40 control point distributed all over the study area. They are the optimize number for the geoid interpolation with spline method.

Department: Survey Engineering Student's Signature

Field of Study: Survey Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยการสนับสนุนเป็นอย่างดีจากหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร. ธงทิศ ฉายากุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำปรึกษา คำแนะนำ พร้อมทั้งตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้กับข้าพเจ้า รวมทั้งคณาจารย์ในภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ให้ความรู้ และ คำแนะนำต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร. สุกิจ วิเศรษฐ์สินธุ์ ผู้คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำใน ระหว่างการทำงานวิจัย นางสาวพัชรากร ศรีโสมะสังจะกุล นายสิทธิเดชน์ เอี้ยวสกุล นายอลงกรณ์ ตั้งใจเปี่ยม ที่ได้ช่วยทำงานรังวัดในสนาม และบริษัท อีเอสอาร์ไอ ประเทศไทย จำกัด ที่เอื้อเฟื้อ อุปกรณ์สำรวจ ข้อมูล โปรแกรม และสถานที่ที่ใช้ในงานวิจัยจนเสร็จสิ้นงานวิจัย

ท้ายสุดนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณบิดามารดา และครอบครัว ที่ได้สนับสนุน ช่วยเหลือ และให้กำลังใจข้าพเจ้าจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 กรณีสึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	11
2.1 พื้นหลักฐานทางดิ่ง.....	11
2.2 ยีออยด์.....	12
2.3 การประมวลผลข้อมูลไลดาร์ (LiDAR DATA Processing)	14
2.4 Loess non parametric function	22
2.5 การหาความสูงต่างระหว่างพื้นผิวयीออยด์และพื้นผิวทรงรี	23
2.6 การประมาณค่าภายในด้วยวิธี Spline	23
2.7 การประมาณค่าภายในด้วยวิธี Inverse Distance Weight (IDW).....	25
2.8 การประมาณค่าภายในด้วยวิธี Kriging.....	26
2.9 วิธีการประมาณค่าภายในแบบ Triangulated Irregular Network (TIN)	28

บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	30
3.1 ข้อมูลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	31
3.2 การเลือกจุดควบคุมและจุดตรวจสอบ	34
3.3 การรังวัดจุดที่เลือกในสนาม	36
3.4 การสร้างพื้นผิวฮัยออยด์และการแปลงความสูง	38
3.5 การตรวจสอบและเปรียบเทียบความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลง	39
3.6 การตรวจสอบผลของจำนวนและตำแหน่งต่อความถูกต้องของการแปลงความสูง	39
บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย	42
4.1 การตรวจสอบข้อมูล	42
4.1.1 จุดควบคุม	42
4.1.2 จุดตรวจสอบ	44
4.2 การแปลงความสูงด้วยวิธีการประมาณค่าภายในและการตรวจสอบ	44
4.2.1 พื้นผิวฮัยออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าภายในแบบ Spline	48
4.2.2 พื้นผิวฮัยออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าภายในแบบ Kriging	50
4.2.3 การสร้างพื้นผิวฮัยออยด์ด้วยการประมาณค่าภายในแบบ TIN	51
4.2.4 การสร้างพื้นผิวฮัยออยด์ด้วยการประมาณค่าภายในแบบ IDW	53
4.3 การแปลงความสูงด้วยวิธีการแปลงค่าด้วยแบบจำลองและการตรวจสอบ	54
4.3.1 การแปลงความสูงด้วยแบบจำลองโพลีโนเมียล	54
4.3.2 การแปลงความสูงด้วยแบบจำลองนอนพาราเมตริกด้วยวิธี Loess	56
4.4 การแปลงความสูงด้วยฮัยออยด์สากล EGM96 และ EMG2008 และการตรวจสอบ	58
4.5 ผลการตรวจสอบผลของจำนวนและตำแหน่งต่อความถูกต้องของการแปลงความสูง	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	73
5.1 ผลการศึกษาวิจัย	73

5.2 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย	76
5.3 ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย	76
5.4 ข้อเสนอแนะ	77
รายการอ้างอิง	78
ภาคผนวก.....	81
การตรวจสอบกล่องระดับ	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	82



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ผลการตรวจสอบวิธีการแบบพาราเมตริกฟังก์ชัน	5
ตารางที่ 2 ผลการตรวจสอบวิธีการแบบนอนพาราเมตริกอัลกอริทึม	6
ตารางที่ 3 ผลการศึกษาจำนวนจุดที่ทราบค่าความสูงย่อยด์ที่มีต่อความถูกต้อง	7
ตารางที่ 4 ค่าพิกัดจุดควบคุม (หน่วยเมตร)	43
ตารางที่ 5 ค่าพิกัดจุดตรวจสอบ (หน่วยเมตร)	44
ตารางที่ 6 ค่าความสูงย่อยด์ของจุดควบคุม (หน่วยเมตร)	45
ตารางที่ 7 ความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่แปลงความสูงด้วยวิธี Spline และการ ตรวจสอบ (หน่วยเมตร)	49
ตารางที่ 8 ความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่แปลงความสูงด้วยวิธี Kriging และการ ตรวจสอบ (หน่วยเมตร)	51
ตารางที่ 9 ความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่แปลงความสูงด้วยวิธี TIN และการตรวจสอบ (หน่วยเมตร)	52
ตารางที่ 10 ความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่แปลงความสูงด้วยวิธี IDW และการ ตรวจสอบ (หน่วยเมตร)	53
ตารางที่ 11 แสดงค่าความสูงย่อยด์ ความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงด้วยแบบจำลองโพล ลิโนเมียล (หน่วยเมตร)	56
ตารางที่ 12 แสดงค่าความสูงย่อยด์ ความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงด้วยวิธีนอนพารา เมตริกแบบ Loess (หน่วยเมตร)	58
ตารางที่ 13 การแปลงความสูงด้วยแบบจำลองย่อยด์สากล EGM96 และ EGM2008 (หน่วย เมตร)	59
ตารางที่ 14 ผลการตรวจสอบความสูงออร์โทเมตริกที่แปลงได้จากพื้นผิวย่อยด์ที่ได้จากการ ประมาณค่าแบบ spline ด้วยจุดควบคุมจำนวนต่าง ๆ (หน่วยเมตร)	Error! Bookmark not defined.

ตารางที่ 15 ผลการตรวจสอบความสูงออร์โทเมตริกที่แปลงได้จากพื้นผิวย่อยที่ได้จากการ
ประมาณค่าแบบ Kriging ด้วยจุดควบคุมจำนวนต่าง ๆ (หน่วยเมตร)**Error! Bookmark not
defined.**

ตารางที่ 16 ผลการตรวจสอบความสูงออร์โทเมตริกที่แปลงได้จากพื้นผิวย่อยที่ได้จากการ
ประมาณค่าแบบ TIN ด้วยจุดควบคุมจำนวนต่าง ๆ (หน่วยเมตร) **Error! Bookmark not defined.**

ตารางที่ 17 ผลการตรวจสอบความสูงออร์โทเมตริกที่แปลงได้จากพื้นผิวย่อยที่ได้จากการ
ประมาณค่าแบบ TIN ด้วยจุดควบคุมจำนวนต่าง ๆ (หน่วยเมตร) **Error! Bookmark not defined.**

ตารางที่ 18 แสดงค่า RMSE ของผลการตรวจสอบการแปลงความสูงด้วยจุดควบคุมจำนวนและ
ตำแหน่งในแต่ละรูปแบบ 72

ตารางที่ 19 สรุปค่าทางสถิติของการตรวจสอบความสูงด้วยวิธีแปลงค่าต่าง ๆ (หน่วยเมตร)..... 73

ตารางที่ 20 ผลการวัดสอบกล่องระดับ..... 81



สารบัญรูป

	หน้าที่
รูปที่ 1 จุดสีฟ้าแสดงจุดที่มีค่าความสูงยี่ออยด์ N	6
รูปที่ 2 จุดสีฟ้าคือจุดที่มีความสูงยี่ออยด์	7
รูปที่ 3 หมุด BMA หมุดอ้างอิงทางดิ่งหมุดแรก ที่ ต.เกาะหลัก อ.เมือง จ.ประจวบคีรีขันธ์	11
รูปที่ 4 แสดงความสูงออร์โทเมตริกและยี่ออยด์	12
รูปที่ 5 แสดงความสูงทวงรี และยี่ออยด์อันดูละชั้น	13
รูปที่ 6 แผนผังการประมวลผลข้อมูลไลดาร์จากข้อมูลดิบไปเป็นข้อมูลกลุ่มจุดความหนาแน่นสูง (point Cloud).....	14
รูปที่ 7 แสดงอุปกรณ์ของระบบไลดาร์ ALS70-HP	15
รูปที่ 8 ผลการวัดสอบระบบไลดาร์จากโรงงาน	17
รูปที่ 9 แสดงการประมวลผล DGNSS ของข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยด้วยโปรแกรม Graft Nav 8.20	18
รูปที่ 10 แสดงกราฟ combined separation ซึ่งได้จากการประมวลผลข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย	19
รูปที่ 11 แกนอ้างอิงของระยะเหลือระหว่างเสาอากาศระบบรังวัดด้วยดาวเทียมจุดสีดำด้านบน กับจุดศูนย์กลางของระบบไลดาร์จุดสีแดง	19
รูปที่ 12 แสดงค่าต่างระหว่างค่าระยะเหลือที่นำเข้าและระยะเหลือที่คำนวณได้	20
รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าเศษเหลือของค่าพิกัดที่คำนวณได้ในแต่ละแนวแกน	21
รูปที่ 14 กราฟแสดงลักษณะน้ำหนักในแต่ละรูปแบบของ Power Function.....	25
รูปที่ 15 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ Spherical	27
รูปที่ 16 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ Circular	27
รูปที่ 17 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ Exponetial.....	27
รูปที่ 18 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ Gaussian	28
รูปที่ 19 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ Linear.....	28

รูปที่ 20 การสร้าง TIN ตามวิธีแบบ Delaunay	29
รูปที่ 21 แผนผังการดำเนินงานวิจัย.....	30
รูปที่ 22 แสดงพื้นที่ที่ใช้ในการวิจัย.....	32
รูปที่ 23 ข้อมูลกลุ่มจุดความหนาแน่นสูงที่ใช้ในงานวิจัย.....	32
รูปที่ 24 หมุดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพมหานคร	33
รูปที่ 25 ตำแหน่งหมุดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพฯ.....	34
รูปที่ 26 ตำแหน่งและลักษณะพื้นที่ของจุดควบคุม.....	35
รูปที่ 27 ตำแหน่งหมุดควบคุมทางดิ่ง จุดควบคุม และ จุดตรวจสอบ.....	36
รูปที่ 28 ตำแหน่งหมุดควบคุม.....	37
รูปที่ 29 การถ่ายค่าระดับระหว่างหมุดควบคุมทางดิ่งและจุดควบคุมในสนาม	38
รูปที่ 31 ตำแหน่งจุดควบคุม 10 จุด.....	40
รูปที่ 30 ตำแหน่งจุดควบคุม 5 จุด	40
รูปที่ 33 ตำแหน่งจุดควบคุม 20 จุด.....	40
รูปที่ 32 ตำแหน่งจุดควบคุม 15 จุด.....	40
รูปที่ 34 ตำแหน่งจุดควบคุม 25 จุด.....	41
รูปที่ 35 ตำแหน่งจุดควบคุม 30 จุด.....	41
รูปที่ 36 ตำแหน่งจุดควบคุม 35 จุด.....	41
รูปที่ 37 ตำแหน่งจุดควบคุม 40 จุด.....	41
รูปที่ 38 พื้นผิวฮัยออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธี spline.....	46
รูปที่ 39 พื้นผิวฮัยออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธี Kriging.....	47
รูปที่ 40 พื้นผิวฮัยออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธี TIN.....	47
รูปที่ 41 พื้นผิวฮัยออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธี IDW	48
รูปที่ 42 พื้นผิวความสูงฮัยออยด์จากแบบจำลองโพลีโนเมียล	55
รูปที่ 43 พื้นผิวความสูงฮัยออยด์จากแบบนอนพาราเมตริก ด้วยวิธี Loess.....	57
รูปที่ 44 พื้นผิวฮัยออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 5 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ	60
รูปที่ 45 พื้นผิวฮัยออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 10 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ	61

รูปที่ 46 พื้นผิวเยื่อออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 15 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ	62
รูปที่ 47 พื้นผิวเยื่อออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 20 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ	63
รูปที่ 48 พื้นผิวเยื่อออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 25 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ	64
รูปที่ 49 พื้นผิวเยื่อออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 30 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ	65
รูปที่ 50 พื้นผิวเยื่อออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 35 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ	66
รูปที่ 51 พื้นผิวเยื่อออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 40 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ	67
รูปที่ 52 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความถูกต้อง โดย แกน X เป็นจำนวนจุดควบคุม และแกน Y เป็นค่า RMSE หน่วยเมตร	72
รูปที่ 53 การทดสอบกล่องระดับ Two peg test.....	81

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเริ่มนำการสำรวจด้วยระบบโลดาร์มาใช้เพื่อทำการสำรวจข้อมูลความสูงภูมิประเทศ กระบวนการสำรวจด้วยระบบโลดาร์เป็นกระบวนการที่ให้ข้อมูลผลลัพธ์เป็นกลุ่มของจุดที่มีค่าพิกัดสามมิติจำนวนมาก (Point Cloud) ที่มีความละเอียดและถูกต้องสูงได้อย่างรวดเร็ว ข้อมูลที่ได้สามารถนำมาสร้างแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลข (Digital Surface Model: DSM) เมื่อผ่านกระบวนการจำแนกข้อมูล (Data Classification) จะสามารถสร้างแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข (Digital Terrain Model: DTM) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ในงานด้านต่าง ๆ ได้เช่น การตรวจวัดประมาณคาร์บอนในผืนป่า การปรับปรุงเขตปลอดภัยในการเดินอากาศ การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ เป็นต้น

กระบวนการสำรวจด้วยระบบโลดาร์จากอากาศยาน จะแบ่งเป็นสองส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือ การหาระยะระหว่างภูมิประเทศกับระบบโลดาร์ การหาระยะนั้นจะใช้แสงเลเซอร์เป็นตัววัดระยะทาง เมื่อเริ่มวัดระยะระบบจะยิงเลเซอร์พร้อมกับเริ่มจับเวลา แสงเลเซอร์เดินทางไปกระทบกับภูมิประเทศและสะท้อนกลับมาสู่ระบบโลดาร์ ระยะเวลาที่แสงเดินทางจากระบบโลดาร์ไปกระทบวัตถุจนกลับสู่ระบบโลดาร์อีกครั้งจะถูกนำไปใช้คำนวณระยะทางระหว่างระบบโลดาร์กับภูมิประเทศ ส่วนที่สองคือระบบระบุตำแหน่ง ทิศทาง และการวางตัวของระบบโลดาร์ ระบบระบุตำแหน่งของระบบโลดาร์จะใช้การรังวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียม (Global Navigation Satellite System: GNSS) ระบบระบุทิศทางและการวางตัวจะใช้ระบบวัดทิศทางและการวางตัว (Initial Measurement Unit: IMU) ในการวัดทิศทางและการวางตัวของอากาศยาน ค่าพิกัดของระบบโลดาร์ที่วัดได้จะมีการประมวลผลเพื่อปรับปรุงความถูกต้องด้วยการประมวลผลแบบ Differential GNSS (DGNSS) ร่วมกับสถานีฐานที่ทำการตั้งเครื่องรังวัดเพื่อรับดาวเทียมพร้อมกับทำการบินสำรวจด้วยระบบโลดาร์ ในกระบวนการเชิงพาณิชย์จะใช้สถานีฐานเพียง 1 จุด ต่อพื้นที่สำรวจที่มีรัศมีไม่เกิน 80 กิโลเมตร ค่าพิกัดที่ได้จะนำไปประมวลผลร่วมกับ ทิศทาง การวางตัวของระบบ และ ระยะทางจากระบบถึงภูมิประเทศเพื่อคำนวณเป็นค่าพิกัดจุดบนภูมิประเทศ ระบบดาวเทียมที่ใช้ในการรังวัดด้วยดาวเทียมจะมีค่าพิกัดวงโคจรอ้างอิงกับระบบอ้างอิงทรงรี WGS84 ดังนั้นค่าพิกัดทางราบและทางตั้งที่ได้จากการประมวลผล DGNSS จะอ้างอิงอยู่กับระบบอ้างอิงทรงรี WGS84 ทั้งทางราบและทางตั้ง

ความสูงที่ใช้ในงานวิศวกรรม งานวิเคราะห์ต่าง ๆ จะเป็นความสูงที่อ้างอิงกับระดับน้ำทะเลปานกลาง (Mean Sea Level: MSL) หรือความสูงออร์โธเมตริก (Orthometric Height) ประเทศไทยจะใช้ระดับทะเลปานกลางที่เกาะหลัก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ เป็นพื้นหลักฐานอ้างอิงทางตั้ง พื้นผิวระดับทะเลปานกลางนี้มีความใกล้เคียงกับพื้นผิวยอเย็ด (Geoid) ซึ่งเป็นพื้นผิวที่นิยมใช้แทนสัณฐานของโลก แต่ค่าพิกัดที่ได้จากการสำรวจด้วยระบบโลดาร์จะมีค่าพิกัดทางตั้งอ้างอิงกับทรงรี WGS84 หรือเรียกว่าความสูงทรงรี (Ellipsoidal Height) ทำให้ต้องมีการแปลงค่าความสูงจากความ

สูงทธรี่ WGS84 ไปสู่ความสูงที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง การแปลงความสูงจะต้องหาค่าต่างความสูงระหว่างพื้นผิวทธรี่ WGS84 กับพื้นผิวระดับทะเลปานกลางหรือย็อยด์ ความสูงต่างนี้เรียกว่าความสูงย็อยด์ (Geoid Undulation: N) โดยความสูงย็อยด์ ความสูงที่อ้างอิงทธรี่ WGS84 และความสูงออร์โทเมตริก มีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$h = H + N$$

โดย H คือ ความสูงออร์โทเมตริก
h คือ ความสูงทธรี่ WGS84
N คือ ความสูงย็อยด์

ประเทศไทยยังไม่มีพื้นผิวย็อยด์ท้องถิ่นทำให้ในการแปลงความสูงที่อ้างอิงทธรี่ WGS84 ไปเป็นความสูงออร์โทเมตริก ต้องใช้พื้นผิวย็อยด์สากล EGM96 หรือ EMG2008 ที่มีพื้นผิวย็อยด์ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยในการแปลงความสูง จากการตรวจสอบการใช้แบบจำลองย็อยด์สากล EGM96 ในการแปลงความสูงนั้นมีความถูกต้องประมาณ 50 เซนติเมตร ธนัช สุขวิมลเสรี (2548) ได้ทำการตรวจสอบและประเมินความถูกต้องความสูงออร์โทเมตริกของค่าพิกัดที่รังวัดด้วยดาวเทียม GPS ที่แปลงความสูงด้วยแบบจำลองความสูงย็อยด์ EGM96 เมื่อตรวจสอบกับความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับเกณฑ์งานชั้น 3 พบว่าความถูกต้องของความสูงออร์โทเมตริกที่แปลงได้จะมีความถูกต้องในระดับเดซิเมตร ในกระบวนการประมวลผลข้อมูลไลดาร์เชิงพานิชย์ EGM96 จะถูกใช้ในการแปลงความสูงข้อมูลไลดาร์จากทธรี่ WGS84 มาสู่ระดับน้ำทะเลปานกลางทำให้ผลลัพธ์ของข้อมูลไลดาร์ที่ได้มีความถูกต้องอยู่ในระดับเดซิเมตรเช่นเดียวกัน

Pérez et al. (2011) ได้ศึกษาจำนวนและตำแหน่งของค่าความสูงย็อยด์ที่ใช้ในการแปลงความสูงข้อมูลไลดาร์ว่ามีผลต่อความถูกต้องทางดิ่งหรือไม่ ผลจากการศึกษาพบว่าความผิดพลาดของการแปลงค่าความสูงข้อมูลไลดาร์จะขึ้นกับระยะห่างจากจุดที่มีค่าความสูงย็อยด์ Martina et al. (2008) ได้ศึกษาการแปลงความสูง (Height Transformation) ค่าพิกัดที่รังวัดด้วยดาวเทียม (GPS) มาเป็นความสูงที่อ้างอิงบนพื้นหลักฐาน Croatian Height Reference System (HVR71) พบว่าแบบจำลองฟังก์ชันพาราเมตริก แบบโพลีโนเมียล สามารถใช้เป็นฟังก์ชันในการประมาณค่าพื้นผิวเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงหรือลักษณะของพื้นผิวภูมิประเทศได้ แต่ถ้าต้องการพื้นผิวภูมิประเทศที่มีความถูกต้องหรือใช้ในการแปลงค่าความสูงที่อ้างอิงทธรี่มาเป็นความสูงออร์โทเมตริก ควรเลือกใช้แบบจำลองนอนพาราเมตริกโมเดลด้วยวิธี Loess algorithm คาร์ห์ ประต่งแกจ (2555) ได้ศึกษาการการสร้างพื้นผิวย็อยด์จากข้อมูลการรังวัดด้วยดาวเทียมร่วมกับงานระดับด้วยวิธีการประมาณค่าภายใน จากการศึกษาของคาร์ห์ พบว่าวิธีการประมาณค่าภายในสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแปลงความสูงค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียมได้

ดังนั้นค่าพิกัดที่ได้จากการสำรวจด้วยระบบไลดาร์เป็นค่าพิกัดที่ได้จากระบบการรังวัดด้วยดาวเทียม ความถูกต้องทางความสูงของค่าพิกัดจะขึ้นกับ ความละเอียดถูกต้องของพื้นผิวที่ย่อยดัดที่ใช้ในการแปลงความสูงเช่นเดียวกับการรังวัดด้วยดาวเทียม ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีแบบจำลองความสูงย่อยดัดท้องถิ่นที่มีความถูกต้องสูง ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาวิธีการแปลงความสูงจากความสูงทธรณี WGS84 ไปสู่ความสูงออร์โทเมตริก ในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงไม่มาก ด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองความสูงย่อยดัดด้วยวิธีการประมาณค่าภายใน (Interpolate method) และการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองต่าง ๆ จากจุดควบคุมที่เลือกขึ้นมาจากจุดไลดาร์ที่มีความสูงร่วมระหว่างความสูงที่จากระบบไลดาร์และค่าความสูงจากงานระดับ แบบจำลองความสูงย่อยดัดที่ได้จะนำไปใช้แปลงความสูงของจุดตรวจสอบที่เลือกขึ้นมาจากจุดไลดาร์มีความสูงร่วมระหว่างความสูงจากระบบไลดาร์ และความสูงจากงานระดับเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และนำไปเปรียบเทียบกับความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองความสูงย่อยดัด EGM96 และ 2008 ว่าวิธีการใดให้ความถูกต้องสูงที่สุด หลังจากนั้นจะนำวิธีการที่ได้ไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงความถูกต้องในแต่ละจำนวนและตำแหน่งของจุดควบคุมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองความสูงย่อยดัด เนื่องจากข้อมูลไลดาร์เป็นข้อมูลที่ถูกใช้วิเคราะห์ในด้านน้ำ การเปลี่ยนแปลงความสูงเพียงเล็กน้อยจึงมีผลต่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ ผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้จะได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานเชิงพาณิชย์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

การศึกษการแปลงค่าความสูงของข้อมูลไลดาร์จากพื้นหลักฐานทธรณี WGS84 ไปสู่ระดับน้ำทะเลปานกลางด้วยวิธีการประมาณค่าภายในและการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.3 กรณีศึกษาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.3.1 Isioye & Youngu (2009) ได้ศึกษาการแปลงความสูงที่ได้จากการรังวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสที่อ้างอิงกับทธรณี WGS84 ไปสู่ความสูงออร์โทเมตริก ด้วยการใช้แบบจำลองย่อยดัดสากล EGM96 ร่วมกับการปรับแก้ค่าเศษเหลือจากการแปลงความสูงด้วยสมการโพลีโนเมียล โดยใช้จุดควบคุมจำนวน 25 จุดที่มีการรังวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสและมีการรังวัดความสูงด้วยงานระดับ ทำให้สามารถคำนวณค่าความสูงย่อยดัดได้จากผลต่างความสูงที่ได้จากงานระดับกับความสูงที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียม นำความสูงย่อยดัดที่ได้ไปเปรียบเทียบกับความสูงย่อยดัดที่คำนวณได้จากแบบจำลองย่อยดัดสากล EGM96 ค่าต่างที่ได้คือเศษเหลือซึ่งจะใช้ในกระบวนการปรับแก้แบบกำลังสองน้อยที่สุดด้วยสมการโพลีโนเมียล สมประสิทธิ์ที่ได้จากการคำนวณจะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแก้ความสูงเพื่อให้ได้ความสูงออร์โทเมตริกที่มีความถูกต้องสูงขึ้น จากการศึกษาค่าต่าง

ระหว่างความสูงย็อยด์สากล EMG96 กับความสูงย็อยด์ที่ได้จากค่าต่างความสูงจากงานระดับและการรังวัดด้วยดาวเทียมมีค่าต่างประมาณ 13 เซนติเมตร เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าความสูงที่ได้รับ การปรับแก้ค่าแล้ว สมการโพลีโนเมียลกำลังสองและลำดับที่สองให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเมื่อนำไปตรวจสอบกับจุดตรวจสอบมีค่าต่างเฉลี่ย -4.67 เซนติเมตร และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3.41 เซนติเมตร

1.3.2 Tziavos et al. (2012) ได้ศึกษาการปรับแก้ข้อมูลร่วมระหว่างความสูงจากที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียม ความสูงย็อยด์ และ ความสูงออร์โทเมตริก เนื่องจากปัญหาการสำรวจจุดควบคุมทางดิ่งภายในประเทศกรีซ ข้อมูลโครงข่ายการสำรวจจุดควบคุมทางดิ่งทั้งหมดไม่ได้รับการปรับแก้เป็นโครงข่ายเดียวกัน จึงได้ทำการศึกษาการปรับแก้ค่าความสูงของจุดควบคุมทางดิ่ง ด้วยข้อมูลการความสูงจากงานระดับ ความสูงที่ได้จากการรังวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียม และความสูงที่ได้จากแบบจำลองย็อยด์ โดยใช้สมการการแปลงค่าพิกัดแบบ 4 พารามิเตอร์ สมการการแปลงค่าพิกัดแบบ 5 พารามิเตอร์ และสมการโพลีโนเมียลลำดับที่ 1, 2 และ 3 พร้อมทั้งตรวจสอบกับความสูงที่ได้จากแบบจำลองย็อยด์ EGM2008, GGM03c, GGM03s, EIGEN5c, EGM96 และแบบจำลองย็อยด์ท้องถิ่น ผลจากการศึกษาพบว่า สมการโพลีโนเมียลลำดับที่ 3 ให้ผลลัพธ์ในการแปลงที่ดีที่สุด โดยให้ค่าความผิดพลาด R.M.S.E (Root Mean Square Error) เท่ากับ 0.123 เมตร และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ ± 0.123 เมตร เมื่อพิจารณาผลการตรวจสอบแบบจำลองย็อยด์ต่าง ๆ พบว่าแบบจำลองย็อยด์ท้องถิ่นเป็นแบบจำลองย็อยด์ที่มีความเหมาะสมที่สุดในการแปลงความสูงโดยให้ค่า R.M.S.E เท่ากับ 0.104 เมตร และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ± 0.104 เมตร ภายหลังการปรับแก้ด้วยสมการโพลีโนเมียลลำดับที่ 3

1.3.3 Martina, et al., (2008) ได้ศึกษาการแปลงความสูงของค่าพิกัดที่รังวัดด้วยดาวเทียมมาเป็นความสูงที่อ้างอิงบนพื้นหลักฐาน Croatian Height Reference System (HVR571) โดยการหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองการแปลงความสูงเพื่อแปลงค่าความสูง การหาค่าพารามิเตอร์จะใช้จุดควบคุมจำนวน 27 จุด ที่รังวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียมทำให้ได้ค่าความสูงที่อ้างอิงกับทรงรี (ellipsoid height) และมีการรังวัดด้วยวิธีเดินระดับเพื่อหาความสูงออร์โทเมตริก แบบจำลองที่ได้จะสามารถนำไปหาค่าความสูงออร์โทเมตริกของค่าพิกัดที่รังวัดด้วยดาวเทียมในพื้นที่ได้

แบบจำลองที่ใช้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือแบบจำลองแบบ ฟังก์ชันพาราเมตริก (Parametric Function) และ นอนพาราเมตริก อัลกอริทึม (Nonparametric Algorithm) แบบจำลองฟังก์ชันพาราเมตริก ในการศึกษานี้ได้เลือกแบบจำลองโพลีโนเมียลขึ้นมาสามแบบจำลองด้วยกันเพื่อใช้ในการแปลงค่าความสูง แบบจำลองที่ใช้แสดงได้ดังนี้

$$\text{แบบจำลองที่ 1 : } z = a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + fxy + gx^3 + hy^3 + ixy^2 + jx^2y$$

$$\text{แบบจำลองที่ 2 : } z = a + \frac{b}{x} + cy + \frac{d}{x^2} + ey^2 + \frac{fy}{x} + \frac{g}{x^3} + hy^3 + \frac{iy^2}{x} + \frac{jy}{x^2}$$

$$\text{แบบจำลองที่ 3 : } z = a + \frac{b}{x} + \frac{c}{y} + \frac{d}{x^2} + \frac{e}{y^2} + \frac{f}{xy} + \frac{g}{x^3} + \frac{h}{y^3} + \frac{i}{xy^2} + \frac{j}{x^2y}$$

โดย x, y คือค่าพิกัดทางราบ

z คือค่าความสูงออร์โทเมตริก

แบบจำลองทั้งสามและจุดควบคุมทั้ง 27 จุด จะถูกนำมาคำนวณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองในแต่ละแบบด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด และนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ใช้ในกระบวนการตรวจสอบ

แบบจำลองแบบนอนพาราเมตริก อัลกอริทึม ที่ใช้ในการแปลงค่าความสูง Martina (2008) เลือกใช้วิธีการคำนวณสองวิธีคือ Watson algorithm เป็นวิธีการที่ใช้เลือกจุดโดยใช้ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักทางคณิตศาสตร์ (weight arithmetic mean) มาใช้ในการเลือกจุด เพื่อนำจุดที่เลือกได้ไปใช้ประมาณค่าภายใน (Interpolation) และวิธีการแบบ Loess algorithm เป็นวิธีการที่ใช้อัลกอริทึมในการทำ data smoothing หลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้ไปทำการประมาณค่าภายใน ทั้งสองวิธีการจะนำไปคำนวณร่วมกับ จุดควบคุมทั้ง 27 จุดและทำการหาค่าความสูงเพื่อใช้ในขั้นตอนตรวจสอบต่อไป

จากผลการตรวจสอบวิธีการแบบพาราเมตริกฟังก์ชันจากรายที่ 1 แบบจำลองฟังก์ชันพาราเมตริก ในแบบจำลองที่ 3 สามารถใช้เป็นฟังก์ชันในการประมาณค่าพื้นผิวเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงหรือลักษณะของพื้นผิวภูมิประเทศได้

	แบบจำลองที่ 1	แบบจำลองที่ 2	แบบจำลองที่ 3
MinAbs(r) (Number of GPS Point)	0.03 (3040)	0.28 (1037)	0.00 (1037)
MaxAbs(r) (Number of GPS Point)	26.99 (1081)	13.77 (4501)	12.70 (4501)
$\Sigma \sigma^2$	7.76	8.69	6.64
Average σ^2	5.36	5.67	5.05

ตารางที่ 1 ผลการตรวจสอบวิธีการแบบพาราเมตริกฟังก์ชัน

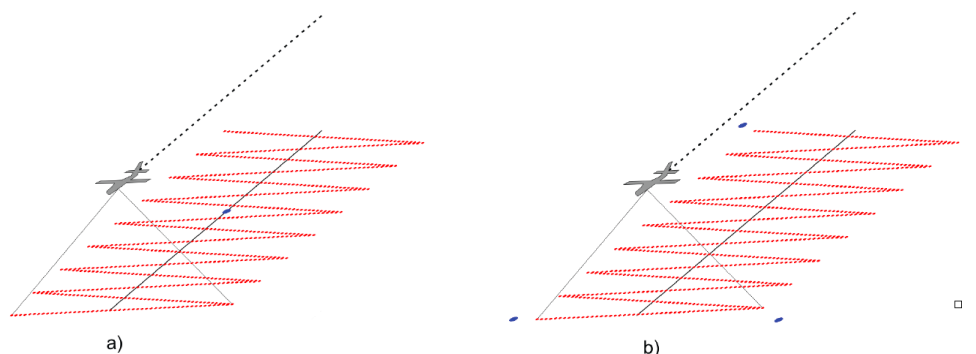
และในการตรวจสอบวิธีการแบบนอนพาราเมตริกอัลกอริทึมในตารางที่ 2 สรุปได้ว่าถ้าต้องการพื้นผิวภูมิประเทศที่มีความถูกต้องหรือใช้ในการแปลงค่าความสูงที่อ้างอิงทรงรีมาเป็นความสูงออร์โทเมตริก ควรเลือกใช้วิธีแบบ Loess algorithm

	Watson [cm]	Loess [cm]
MinAbs(r) (Number of GPS Point)	0.09 (4026)	0.04 (2795)
MaxAbs(r) (Number of GPS Point)	26.60 (1331)	18.70 (1018)
$\Sigma\sigma^2$	0.00	2.42
$\Sigma\sigma^2/27$	0.00	3.05

ตารางที่ 2 ผลการตรวจสอบวิธีการแบบนอนพาราเมตริกอัลกอริทึม

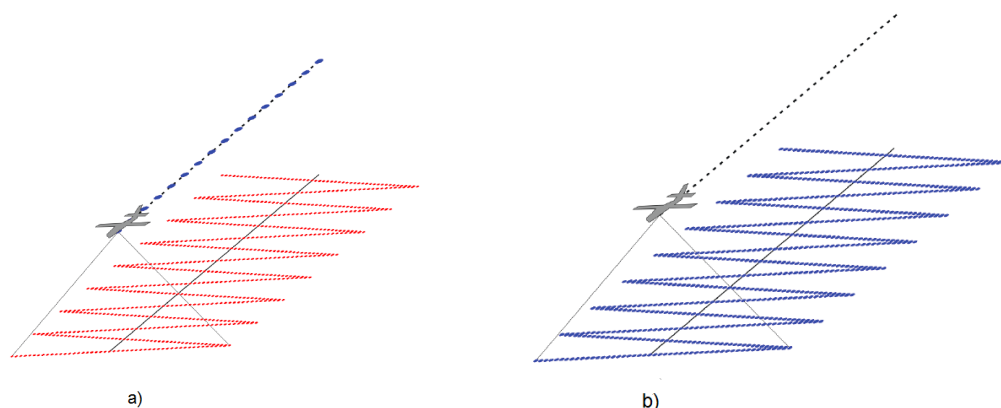
1.3.4 Pérez et al. (2011) ได้ศึกษาจำนวนจุดที่ทราบค่าความสูงยี่ออยด์ (geoid undulation, N) ว่ามีผลต่อความถูกต้องทางดิ่งของข้อมูลไลดาร์หรือไม่ วิธีการศึกษาจะทำการกำหนดรูปแบบการทดสอบสามรูปแบบคือ

1. หาค่าความสูงยี่ออยด์ N ที่จุดกึ่งกลางพื้นที่ทั้งหมด โดยแสดงเป็นจุดสีฟ้าในรูปที่ 1a และใช้ค่า N ที่ได้นั้นแปลงค่าความสูงข้อมูลไลดาร์ภายในพื้นที่
2. หาค่าความสูงยี่ออยด์ N ที่มุมทั้งสองของพื้นที่ทั้งหมดโดยแสดงเป็นจุดสีฟ้าในรูปที่ 1b นำค่า N ที่ได้ไปทำการประมาณค่าภายในด้วยวิธี Bilinear เพื่อสร้างพื้นผิวยี่ออยด์ ผลที่ได้นำไปแปลงค่าความสูงข้อมูลไลดาร์ภายในพื้นที่
3. หาค่าความสูงยี่ออยด์ N จากจุดที่อยู่ตามแนวบินสำรวจโดยใช้การประมาณค่าภายในแบบเส้นตรง (Linear Interpolation) เพื่อให้ได้ค่า N ตามแนวบินสำรวจ ดังรูปที่ 2a ค่า N ที่ได้จะนำไปทำการประมาณค่าภายนอก (extrapolate) ผลที่ได้จะนำไปใช้ในการแปลงความสูงข้อมูลไลดาร์ภายในพื้นที่



รูปที่ 1 จุดสีฟ้าแสดงจุดที่มีค่าความสูงยี่ออยด์ N

(ที่มา: Pérez et al. 2011)



รูปที่ 2 จุดสีฟ้าคือจุดที่มีความสูงย้อยยด์

(ที่มา: Pérez et al. 2011)

การทดสอบทั้งสามรูปแบบจะทำการเปรียบเทียบกับการหาค่าความสูงย้อยยด์ N ให้กับข้อมูลไลดาร์ทุกๆ จุดภายในพื้นที่ซึ่งจะใช้เป็นรูปแบบอ้างอิงดังรูปที่ 2b

ผลลัพธ์จากการศึกษาได้ผลดังตารางที่ 3 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบแล้ว รูปแบบที่สามจะมีผลต่างกับรูปแบบอ้างอิงน้อยที่สุด รูปแบบที่สองจะมีผลต่างในลำดับถัดมา และรูปแบบที่หนึ่งจะมีผลต่างจากรูปแบบอ้างอิงมากที่สุดทำให้ Pérez et al. (2011) สรุปว่าความผิดพลาดของการแปลงค่าความสูงข้อมูลไลดาร์จะขึ้นกับระยะห่างจากจุดที่ทราบความสูงย้อยยด์ N

		วิธีการที่ 1 (m)	วิธีการที่ 2 (m)	วิธีการที่ 3 (m)
LIDAR 1	Mean	-0.012	0.005	-0.001
	Maximum	-0.128	0.011	0.021
	Typical Deviation	0.050	0.003	0.012
LiDAR 2	Mean	-0.005	-0.008	-0.002
	Maximum	0.201	-0.015	-0.017
	Typical Deviation	0.107	0.004	0.007

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาจำนวนจุดที่ทราบค่าความสูงย้อยยด์ที่มีต่อความถูกต้อง

1.3.5 ดำริห์ ประงแตงกิจ (2555) ได้ศึกษาการคำนวณค่าย้อยยด์ด้วยวิธีประมาณค่าภายในบริเวณพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทยโดยใช้จุดควบคุมจำนวน 70 จุด จุดควบคุมที่ใช้จะมีการรังวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียม และมีการรังวัดค่าความสูงด้วยการทำระดับ (งานชั้นที่ 1) บนจุดเดียวกัน จากข้อมูลที่มีจะทำให้สามารถหาค่าความสูงย้อยยด์ (geoid undulation, N) ของจุดทั้ง 70 จุด ค่า N ที่ได้จะนำมาสร้างพื้นผิวย้อยยด์ ด้วยวิธีประมาณค่าภายใน ในการศึกษาได้ใช้การประมาณค่าภายใน 4 วิธีการด้วยกันคือ

1. การประมาณค่าภายในด้วยวิธี Invers Distance Weight (IDW)
2. การประมาณค่าด้วยวิธีการ Kriging
3. การประมาณค่าด้วยวิธีการ Spline
4. การประมาณค่าด้วยวิธีการโครงข่ายสามเหลี่ยม (Triangulated Irregular Network)

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของความสูงยี่ออยด์ที่ประมาณค่าได้ด้วยวิธี Kriging Spline และ TIN ณ จุดตรวจสอบอยู่ในเกณฑ์ที่ดีและมีค่าใกล้เคียงกัน แต่วิธี IDW มีค่าที่แตกต่างออกไป แสดงให้เห็นว่าวิธีการหาความสูงยี่ออยด์ด้วยวิธีการประมาณค่าภายในสามารถนำมาใช้ได้กับข้อมูลการรังวัดด้วยดาวเทียมได้

1.3.6 ธนัช สุขวิมลเสรี (2548) ได้ประเมินความถูกต้องของค่าความสูงออร์โทเมตริกที่ได้รับจากการรังวัดพิกัดด้วยดาวเทียมระบบ GPS โดยใช้แบบจำลองความสูงยี่ออยด์ EMG96 โดยใช้จุดควบคุมจำนวน 26 จุด ที่มีกรังวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียมแบบสถิต ผลลัพธ์ที่ได้นำมาประมวลผลเส้นฐาน (GPS baseline solution) จำนวน 22 เส้นฐาน ค่าพิกัดที่ประมวลผลได้จะแปลงความสูงด้วยแบบจำลองความสูงยี่ออยด์ EGM96 เพื่อให้ได้ค่าความสูงออร์โทเมตริก ร่วมกับการรังวัดความสูงจุดควบคุมทั้ง 26 จุดด้วยการเดินระดับด้วยกล้องระดับ ในเกณฑ์งานระดับชั้นที่ 3 ผลการศึกษาพบว่าความสูงออร์โทเมตริกจากงานระดับและความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการรังวัดดาวเทียมระบบ GPS ที่แปลงความสูงด้วยแบบจำลองความสูงยี่ออยด์ EGM96 มีค่าต่างโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.037 เมตร มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.392 เมตร มีค่าต่ำสุดเท่ากับ -0.208 เมตร และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.147 เมตร

เมื่อพิจารณางานวิจัยของ Pérez et al. (2011) จะพบว่าความละเอียดและความถูกต้องของพื้นผิวยี่ออยด์ที่ใช้ในการแปลงความสูงมีผลต่อความถูกต้องของข้อมูลไลดาร์ ในงานวิจัยของ ธนัช สุขวิมลเสรี (2548) พบว่าความถูกต้องของค่าพิกัดที่รังวัดด้วยดาวเทียมระบบ GPS เมื่อแปลงความสูงด้วยแบบจำลองความสูงยี่ออยด์สากล EGM96 มีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0.392 เมตร ถึง -0.208 เมตร และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.037 เมตร Isioye & Youngu (2009) ได้ศึกษาการแปลงความสูงที่อ้างอิงทรงรี WGS84 ไปสู่ความสูงออร์โทเมตริกโดยใช้แบบจำลองยี่ออยด์สากล EGM96 พบว่ามีความผิดพลาดจึงได้ศึกษาการปรับแก้เศษเหลือด้วยสมการโพลีโนเมียลซึ่งทำให้ค่าความถูกต้องของความสูงที่แปลงได้สูงขึ้น Tziavos et al. (2012) ได้ศึกษาการปรับแก้ความสูงของข้อมูลค่าพิกัดที่รังวัดด้วยดาวเทียมร่วมกับความสูงที่ได้จากงานระดับโดยใช้สมการการแปลงค่าพิกัดและสมการโพลีโนเมียลลำดับต่าง ๆ ผลการศึกษาศมการโพลีโนเมียลลำดับที่สามให้ความถูกต้องในการแปลงสูงที่สุดจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่ได้รับจากความถูกต้องของแบบจำลองความสูงยี่ออยด์ที่ใช้ในการแปลงความสูงและวิธีการในการปรับแก้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น จึงทำให้มี

แนวคิดที่จะนำแบบจำลองการแปลงค่าพิกัดที่ใช้แปลงความสูงค่าพิกัดที่รังวัดด้วยดาวเทียมในงานวิจัยของ Martina et al. (2008) และการสร้างพื้นผิวย่อยด้วยวิธีการประมาณค่าแบบต่าง ในงานวิจัยของ คำรวิทย์ ประจักษ์ (2555) มาประยุกต์ใช้ในการแปลงความสูงข้อมูลไลดาร์โดยจะเลือกใช้วิธีการดังนี้

วิธีที่ 1 ฟังก์ชัน พารามетริก แบบจำลองโพลีโนเมียล จากงานวิจัยของ Martina et al. (2008) มีสมการดังนี้

$$z = a + \frac{b}{x} + \frac{c}{y} + \frac{d}{x^2} + \frac{e}{y^2} + \frac{f}{xy} + \frac{g}{x^3} + \frac{h}{y^3} + \frac{i}{xy^2} + \frac{j}{x^2y}$$

วิธีที่ 2 นอนพารามетริก อัลกอริทึม วิธีการแบบ Loess จากงานวิจัยของ Martina et al. (2008)

วิธีที่ 3 การคำนวณย่อยแบบการประมาณค่าภายในด้วยวิธีการ Spline, Triangulated Irregular Network (TIN), Kriging และ Inverse Distant Weight แบบ tension จากงานวิจัยของ คำรวิทย์ ประจักษ์ (2555)

วิธีการทั้ง 3 วิธีจะนำมาทดสอบการแปลงค่าความสูงข้อมูลไลดาร์จากทรงรี WGS84 ไปเป็นความสูงออร์โทเมตริก โดยใช้จุดควบคุม 40 จุด และตรวจสอบความถูกต้องของการแปลงในแต่ละวิธีด้วยจุดตรวจสอบ 20 จุด เพื่อหาวิธีที่ดีที่สุดในการแปลงความสูงข้อมูลไลดาร์จากทรงรี WGS84 ไปเป็นความสูงออร์โทเมตริก

หลังจากนั้นจะทำการทดสอบว่าจำนวนจุดที่ควบคุมที่ใช้มีผลต่อความถูกต้องในการแปลงค่าความสูงข้อมูลไลดาร์ โดยใช้วิธีประมาณค่าภายในทั้ง 4 วิธี นำมาสร้างพื้นผิวย่อยด้วยจำนวนจุดควบคุมตั้งแต่ 5 10 15...40 จุด พื้นผิวย่อยที่ได้จะนำไปแปลงค่าความสูงจุดตรวจสอบ ตรวจสอบความสูงที่แปลงได้ด้วยความสูงที่ได้จากงานระดับเพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงความถูกต้องที่ได้ในแต่ละจำนวนจุดควบคุม

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.4.1 พื้นที่ที่ใช้ศึกษา ใช้พื้นที่ จังหวัดกรุงเทพมหานคร และปทุมธานี ครอบคลุมพื้นที่ละติจูด 13° 55' ถึง 13° 42' เหนือ ลองติจูด 100° 34' ถึง 100° 44' ตะวันออก เป็นพื้นที่ประมาณ 440 ตร.กม. มีความสูงโดยเฉลี่ย 1 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง เป็นพื้นที่ราบที่มีการเปลี่ยนแปลงความสูงเพียงเล็กน้อย

1.4.2 จุดควบคุมทางดิ่ง ใช้จุดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพมหานครที่มีการสำรวจค่าระดับด้วยงานระดับ ชั้น 3 เมื่อปีพ.ศ. 2557 ซึ่งติดตั้งอยู่บนถาวรวัตถุ มีสมมติฐานว่าไม่มีผลการเปลี่ยนแปลงความสูงเนื่องจากการทรุดตัวของพื้นที่

1.4.3 ศึกษาการแปลงความสูงโดยใช้แบบจำลองการแปลงการสองวิธีการด้วยการคือแบบจำลองการแปลงแบบพาราเมตริก ฟังก์ชันแบบโพลีโนเมียล ซึ่งมีสมการดังนี้

$$z = a + \frac{b}{x} + \frac{c}{y} + \frac{d}{x^2} + \frac{e}{y^2} + \frac{f}{xy} + \frac{g}{x^3} + \frac{h}{y^3} + \frac{i}{xy^2} + \frac{j}{x^2y}$$

และแบบจำลองการแปลงแบบ นอนพาราเมตริกอัลกอริทึม แบบ Loess ฟังก์ชัน

1.4.4 ศึกษาการแปลงความสูงด้วยการสร้างพื้นผิวออยด์แบบการประมาณค่าภายใน (interpolation) ด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

วิธี Spline ด้วยวิธีแบบ tension

วิธี Kriging ด้วยวิธีแบบ Ordinary ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ spherical

วิธี IDW กำหนด power เท่ากับ 2

วิธี TIN แบบ Constrained Deluanay

1.4.5 ศึกษาผลของความถูกต้องเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนจุดควบคุมโดยใช้การสร้างพื้นผิวออยด์แบบการประมาณค่าภายในด้วยวิธี IDW, Kriging, Spline และ TIN โดยใช้จุดควบคุมจำนวน 5, 10, 15...40 จุด สร้างพื้นผิวออยด์เพื่อใช้ในการแปลงความสูง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ทราบความถูกต้องทางดิ่งของข้อมูลไลดาร์

1.5.2 ได้วิธีการที่เหมาะสมที่ใช้ในการแปลงค่าความสูงข้อมูลไลดาร์

1.5.3 ได้ทราบถึงผลของจำนวนและตำแหน่งจุดควบคุมว่ามีผลต่อความถูกต้องของการแปลงข้อมูลความสูงข้อมูลไลดาร์

1.5.4 ได้ทราบถึงจำนวนจุดควบคุมที่เหมาะสมในการสร้างพื้นผิวออยด์

บทที่ 2 ทฤษฎีบทที่เกี่ยวข้องของกบังงานวิจัย

2.1 พื้นหลักฐานทางดิ่ง

พื้นหลักฐานทางดิ่งคือพื้นผิวที่มีความสูงเท่ากับศูนย์และใช้เป็นพื้นผิวอ้างอิงในการหาความสูงของจุดอื่น ๆ โดยเทียบกับพื้นผิวนี้นี้ พื้นผิวทางดิ่งถูกใช้ในงานสำรวจมากที่สุดในปัจจุบันคือ พื้นหลักฐานที่อ้างอิงระดับทะเลปานกลาง (Tidal Datum)

ระดับทะเลปานกลางหาได้จากระดับน้ำทะเลขึ้นลงเฉลี่ยในช่วงเวลายาวนาน ประเทศไทยใช้การรังวัดระดับน้ำทะเล ณ สถานีวัดน้ำ กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ต. เกาะหลัก อ.เมือง จ. ประจวบคีรีขันธ์ โดยการบันทึกการขึ้นลงของระดับน้ำทะเลแล้วนำมาเฉลี่ยเพื่อหาค่าระดับน้ำทะเลปานกลาง จากนั้นจึงได้รังวัดค่าจากระดับน้ำทะเลปานกลางมายังหมุดอ้างอิงทางดิ่งหมุดแรกเป็นจุดศูนย์กำเนิด ซึ่งมีชื่อว่า “BMA.” ได้ค่า 1.4477 เมตร เรียกระดับน้ำทะเลปานกลางนี้ว่า “พื้นหลักฐานทางดิ่งเกาะหลัก 2458” (Kolak 1915 Vertical Datum) และใช้เป็นจุดอ้างอิงในการทำงานระดับของประเทศไทยจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 3 หมุด BMA หมุดอ้างอิงทางดิ่งหมุดแรก ที่ ต.เกาะหลัก อ.เมือง จ.ประจวบคีรีขันธ์

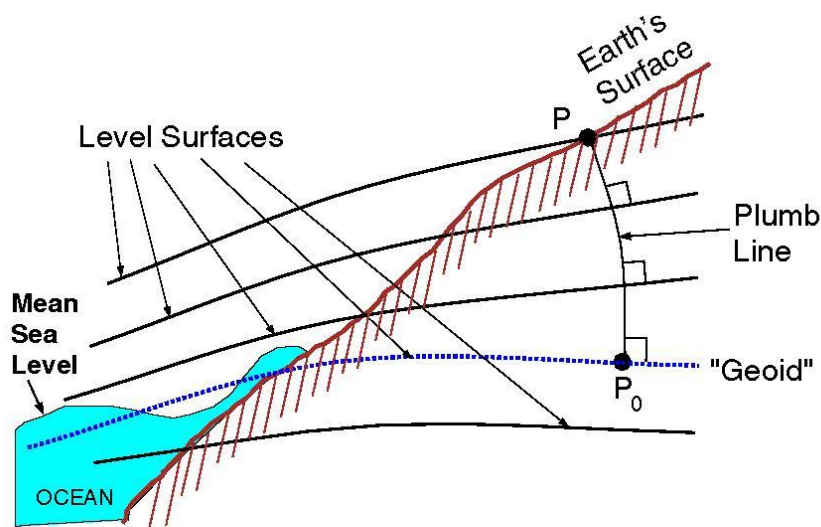
(ที่มา: http://www.rtsd.mi.th/section/New_Section/Geodesy/Documents_Geo.html)

2.2 ยีอออยด์

ยีอออยด์คือ ลักษณะที่แท้จริงของพื้นผิวโลกเมื่ออนุมานให้โลกครอบคลุมไปด้วยพื้นผิวทะเลทั้งหมด ยีอออยด์จึงหมายความถึงพื้นผิวทะเลนี้ หรืออีกนัยหนึ่งคือพื้นผิวที่มีศักย์โน้มถ่วงเท่ากัน (Surface of equal gravitational potential) ดังนั้นจึงใช้ระดับทะเลปานกลางแทนพื้นผิวยีอออยด์ได้ การทำงานระดับค่าความสูงจึงอ้างอิงกับพื้นผิวยีอออยด์

Ellipsoid คือ ทรงรีที่ใช้แทนพื้นผิวโลก ระบบพิกัดทางราบจะใช้รูปทรงรีเป็นระบบอ้างอิง ในอดีตประเทศไทยใช้พื้นหลักฐาน Indian 1975 เป็นพื้นหลักฐานอ้างอิงทางราบ แต่ปัจจุบันได้ปรับเปลี่ยนมาใช้พื้นหลักฐาน WGS84 (World Geodetic System 1984) เป็นพื้นหลักฐานอ้างอิง แทน จุดศูนย์กลางกำเนิดของพื้นหลักฐาน ยังเป็นจุดศูนย์กลางของวงโคจรดาวเทียมที่ใช้ในการรังวัดค่าพิกัด ดังนั้นค่าพิกัดที่รังวัดได้จากระบบการรังวัดด้วยดาวเทียมจึงมีค่าพิกัดอ้างอิงกับพื้นหลักฐาน WGS84

ความสูงออร์โทเมตริก(Orthometric Height: H) เป็นระยะที่ตั้งฉากจากพื้นผิวศักย์สมดุลงจนถึงจุดบนพื้นผิวโลก โดยระยะนี้จะขนานกับแนวสายตึงและตั้งฉากกับพื้นผิวระดับดังรูปที่ 4



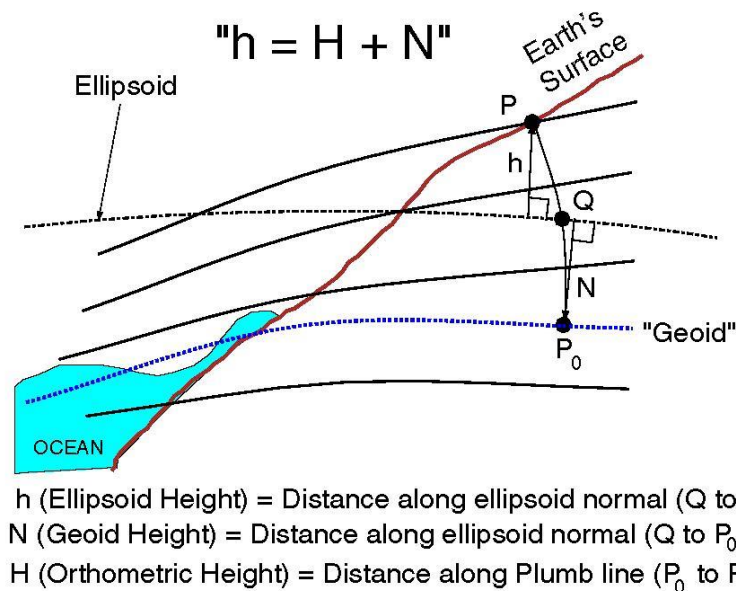
Level Surface = Equipotential Surface

H (Orthometric Height) = Distance along Plumb line (P_0 to P)

รูปที่ 4 แสดงความสูงออร์โทเมตริกและยีอออยด์

(ที่มา: <http://www.ngs.noaa.gov/GEOID/IMAGES/d04.jpg>)

ความสูงทรงรี (Ellipsoidal Height: h) คือระยะที่ตั้งฉากจากทรงรีจนถึงจุดบนพื้นผิวโลก และเมื่อพิจารณายีออยด์กับทรงรีระยะห่างที่ตั้งฉากกับทรงรีถึงจุดบนยีออยด์จะเรียกว่าความสูงยีออยด์ (Geoid Undulation: N) เนื่องจากทรงรีมีจุดศูนย์กลางคั่นที่กับจุดศูนย์กลางมวลของโลก ดังนั้นพื้นผิวทรงรีจึงไม่ขนานกับพื้นผิวระดับ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงความสูงทรงรี และยีออยด์อันดูเลชัน

(ที่มา: <http://www.ngs.noaa.gov/GEOID/IMAGES/d05.jpg>)

ในทางปฏิบัติระหว่างแนวสายดิ่งกับความสูงทรงรีและความสูงยีออยด์ เป็นมุมที่เล็กมาก อนุมาณให้ใช้เป็นเส้นเดียวกันได้ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงทรงรี ความสูงออร์โทเมตริก และความสูงยีออยด์ จึงมีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$h = H + N$$

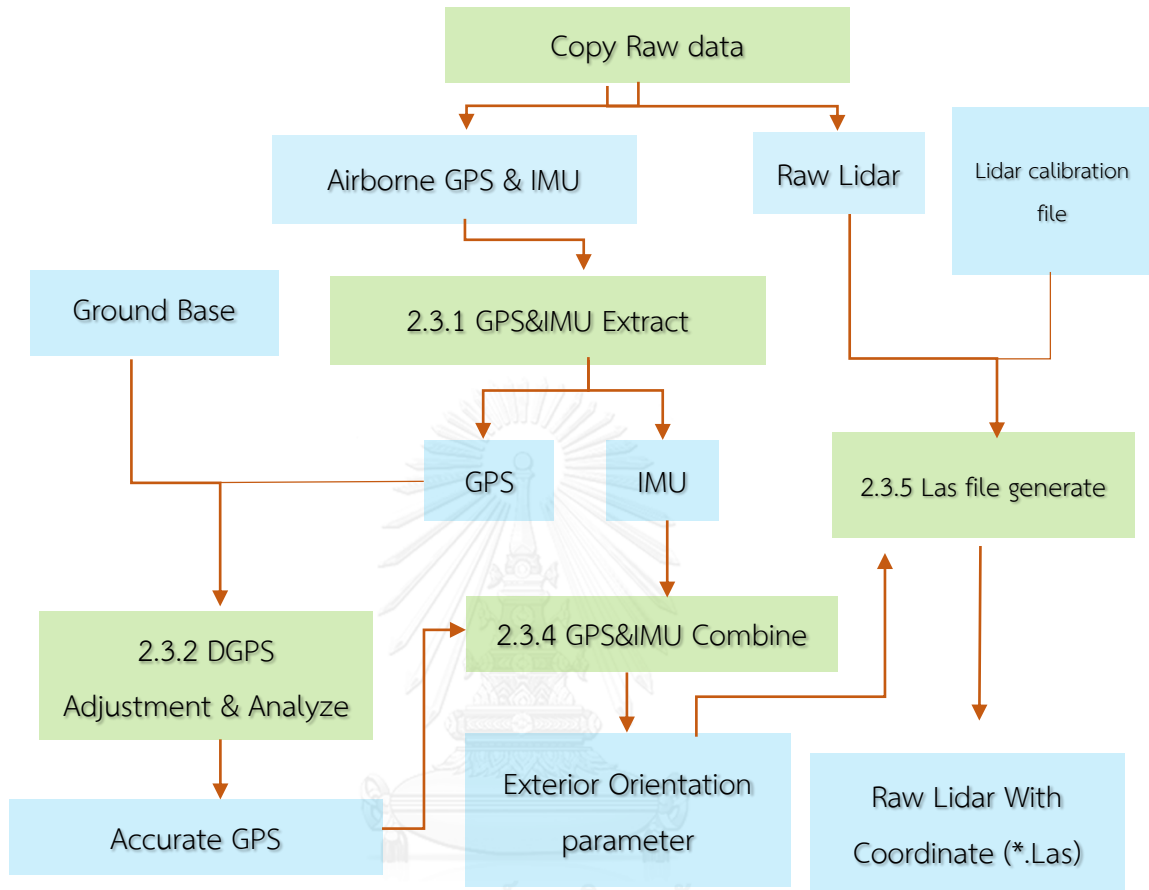
โดย h คือ ความสูงทรงรี

H คือ ความสูงออร์โทเมตริก

N คือ ความสูงยีออยด์

2.3 การประมวลผลข้อมูลไลดาร์ (LIDAR DATA Processing)

การประมวลผลข้อมูลไลดาร์มีกระบวนการดังแผนผังด้านล่าง



รูปที่ 6 แผนผังการประมวลผลข้อมูลไลดาร์จากข้อมูลดิบไปเป็นข้อมูลกลุ่มจุดความหนาแน่นสูง (point Cloud)

ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจด้วยระบบไลดาร์ก่อนการประมวลผลจะถูกเรียกว่าข้อมูลดิบ (Raw Data) ยังไม่สามารถแสดงผลหรือใช้งานได้ ต้องผ่านกระบวนการประมวลผลเพื่อให้ได้ข้อมูลผลลัพธ์ที่นำไปใช้งานได้ต่อไป ในกระบวนการประมวลผลนี้จะอ้างอิงจากการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากการสำรวจด้วยระบบไลดาร์ ยี่ห้อ Leica รุ่น ALS70-HP รูปที่ 7 แสดงอุปกรณ์ของระบบไลดาร์ AL70-HP



รูปที่ 7 แสดงอุปกรณ์ของระบบไลดาร์ ALS70-HP

(ที่มา: <http://www.geo-matching.com>)

ระบบไลดาร์ ALS70-HP ที่ใช้ในการสำรวจข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยมีคุณสมบัติดังนี้

LS70 (Laser Head)

Dimensions:	602mm (flight direction) x 369mm W x 273mm H
Weight:	42.3 kg with CUS6 IMU
Max Pulse Rate:	250 kHz (500 kHz effective on LS70-LP)
Max Scan Rate:	100 Hz (200 kHz effective on LS70-LP)
Scan Pattern:	Sinusoidal, via closed-loop galvanometer actuation
Orientation Measurement:	IPAS IMU triagle or raster

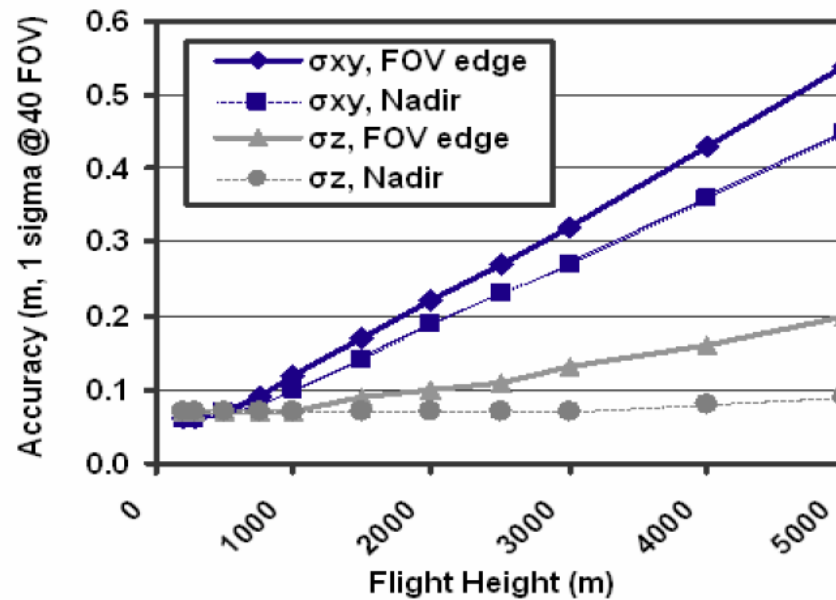
Laser specification

Description	ALS70-HP
Maximum average radiant Power (per channel)	2.0 W (20kHz - 100kHz) 4.0 W (100kHz - 300kHz)
Maximum peak radiant energy (per channel)	100 μ J (at 20kHz) 13 μ J (at 300kHz)
Pulse duration	9ns (20kHz - 100kHz) 4ns (100kHz - 300kHz)
Pulse repetition frequency, PRF	20kHz...300kHz
Wavelength	1064nm (INVISIBLE)
Beam divergence (full angle at 1/e)	0.15 mrad
Waist diameter (at 1/e)	6mm
Waist location	at exit window
Nominal Ocular Hazard Distance (NOHD), Scanning at 20kHz at 300kHz	324m / 1063ft 159m / 522ft
Extended Nominal Ocular Hazard Distance (E-NOHD), Scanning at 20kHz at 300kHz	2333m / 7654ft 1441m / 4728ft

GNSS/IMU system

General:	Leica IPAS20 embedded in System Controller
GNSS receiver:	Internal 54 - channel dual frequency GNSS (GPS and GLONASS) receiver L1/L2, low noise, 20 Hz raw data, DGPS ready GPS and GLONASS
IMU:	Honeywell type MicroIRS 200Hz Ring Laser Gyro Weight 4.45 kg Absolute Accuracy after post processing (RMS) Position 0.05-0.3 m, Velocity 0.005 m/s, Roll & Pitch 0.0025 deg, Heading 0.005 deg
Real-time solution:	Deeply coupled GNSS/IMU solution
GNSS/IMU data storage:	On MM70 removable solid state disk mass memory

และมีผลการตรวจสอบความถูกต้องของระบบที่ระยะทางต่าง ๆ ดังกราฟการวัดสอบที่ได้ จากคู่มือ Leica ALS Document (2011) ดังรูปที่ 8



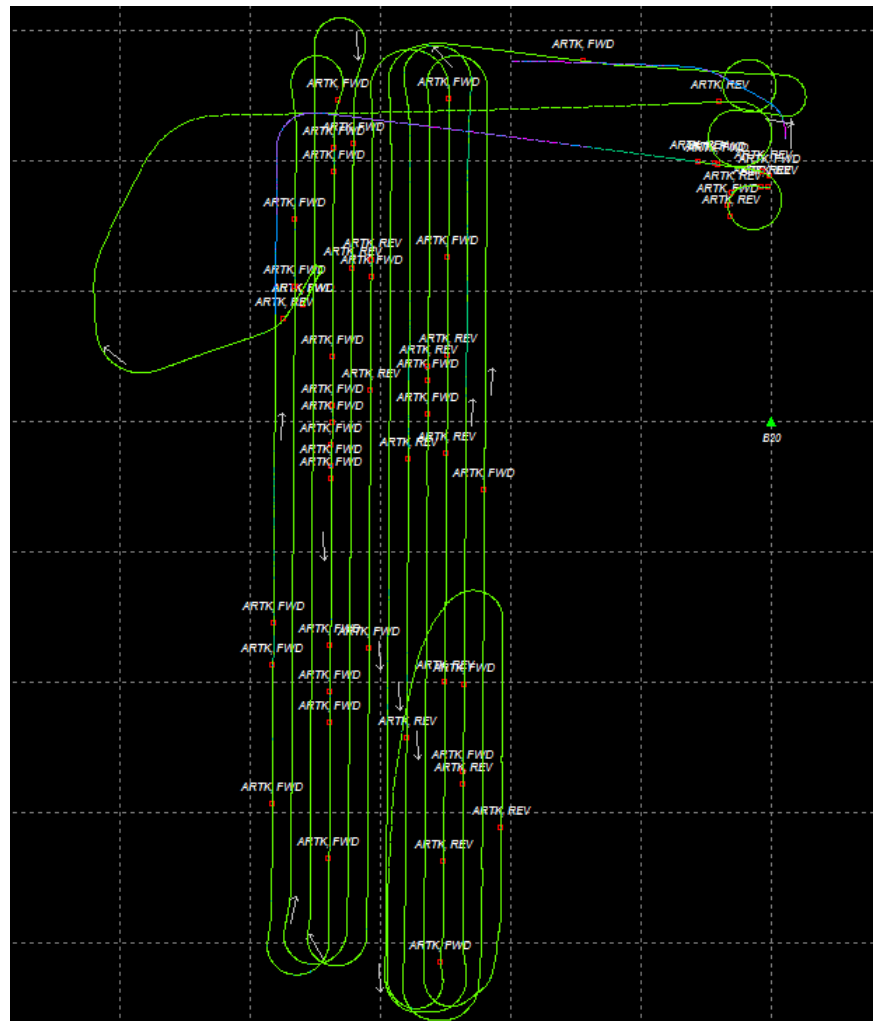
รูปที่ 8 ผลการวัดสอบระบบไลดาร์จากโรงงาน

(ที่มา: Leica ALS Document (2011))

จากกราฟจะพบว่าเมื่อทำการบินสำรวจด้วยความสูงบิน 2000 เมตร ซึ่งเป็นความสูงบินที่ใช้ในการบินสำรวจข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ข้อมูลที่สำรวจในครั้งนี้จะมีความถูกต้องไม่น้อยกว่า 10 เซนติเมตร

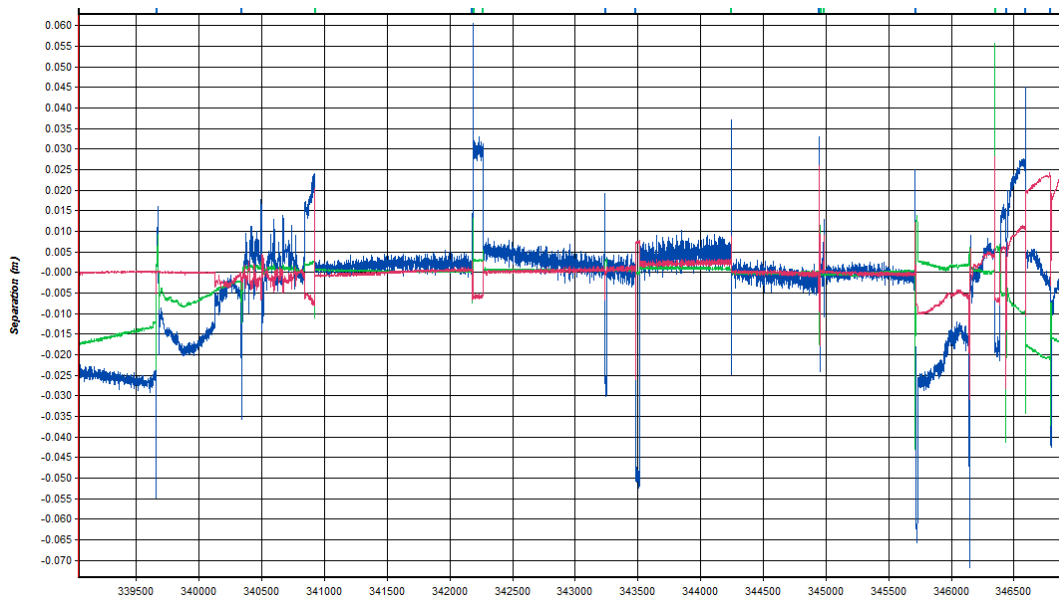
2.3.1 ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจประกอบไปด้วยข้อมูลสองส่วนคือ ข้อมูลการวัดระยะด้วยแสงเลเซอร์ และข้อมูลตำแหน่งที่ได้จากการรังวัดดาวเทียมรวมทั้งการวางตัวของอากาศยาน ข้อมูลทั้งหมดจะถูกเก็บในรูปแบบข้อมูลดิบจากระบบไลดาร์ซึ่งประกอบไปด้วยแฟ้มข้อมูลชื่อ IPAS ใช้เก็บตำแหน่งและข้อมูลการวางตัวของอากาศยานของระบบ แฟ้มข้อมูลชื่อ RawLaser, RawTDC, RawWFD ใช้เก็บข้อมูลการวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์

2.3.2 การประมวลผลข้อมูลจะทำการประมวลผลข้อมูลตำแหน่งและการวางตัวของอากาศยานก่อน โดยทำการแยกข้อมูลตำแหน่ง ออกจากข้อมูลการวางตัวของอากาศยาน เนื่องจากระบบบันทึกข้อมูลรวมเป็นข้อมูลเดียวกัน ข้อมูลตำแหน่งที่ทำการแยกออกมาจะนำไปประมวลผลแบบ Differential GNSS (DGNSS) ร่วมกับสถานีฐานที่เก็บข้อมูลในช่วงเวลาเดียวกันกับการบินสำรวจ รูปที่ 9 แสดงแนวบินสำรวจและสถานีฐานที่ใช้ประมวลผลแบบ DGNSS



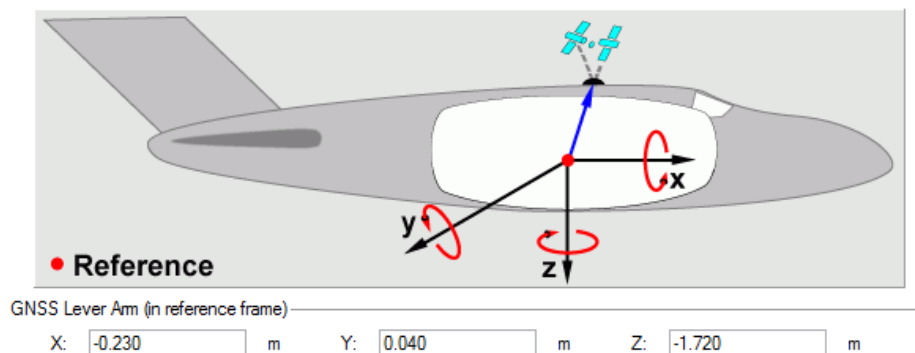
รูปที่ 9 แสดงการประมวลผล DGSS ของข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยด้วยโปรแกรม Graft Nav 8.20 เส้นสีเขียวแสดงแนวบิน จุดด้านขวามือแสดงสถานีฐานที่ใช้ในการปรับแก้

2.3.3 ข้อมูลที่ผ่านการประมวลผล DGSS จะต้องตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลโดยพิจารณาจากกราฟ Combined Separation Plot เป็นกราฟที่แสดงถึงความต่างระหว่างผลการคำนวณไป และคำนวณย้อนกลับ ผลการคำนวณที่ดีจะต้องมีค่าต่างระหว่างการคำนวณไปและย้อนกลับไม่ต่างกันมากนัก รูปที่ 10 กราฟแสดง combined separation แสดงค่าต่างระหว่างการคำนวณไปและย้อนกลับซึ่งต่างกันสูงสุด 0.06 เมตร และต่ำสุดที่ 0.07 เมตร ซึ่งได้จากการประมวลผลข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้



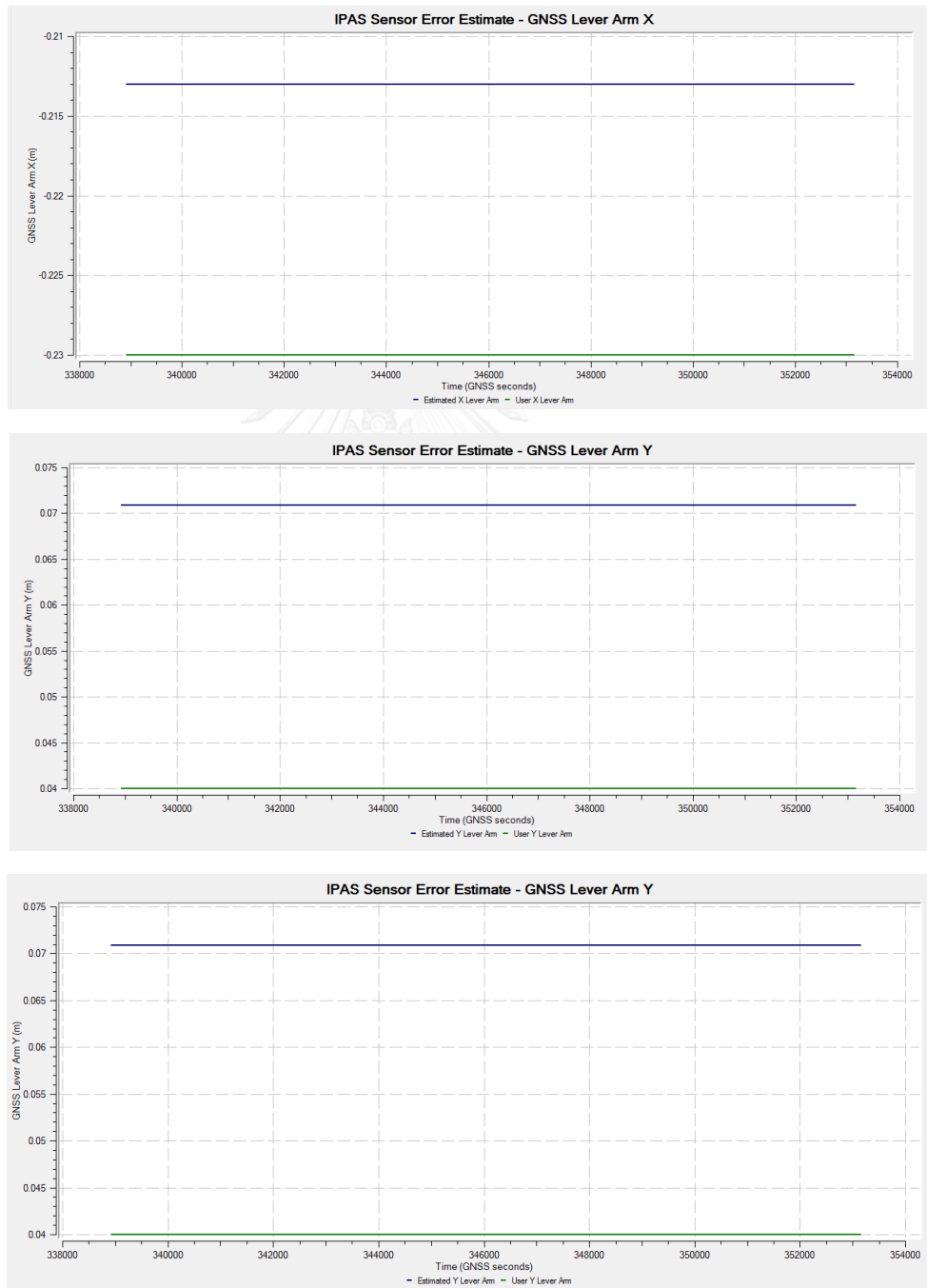
รูปที่ 10 แสดงกราฟ combined separation ซึ่งได้จากการประมวลผลข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย โดยแกน Y เป็นค่าต่างในหน่วยเมตร และแกน X เป็น GPS time เส้นสีแดงแสดงค่าเศษเหลือในแกน x เส้นสีเขียวแสดงเศษเหลือในแกน y และเส้นน้ำเงินแสดงเศษเหลือในแกน z

2.3.4 หลังจากตรวจสอบข้อมูลตำแหน่งที่ผ่านการประมวลผล DGNSs ข้อมูลที่ได้จะนำไปประมวลผลกับข้อมูลการวางตัวของอากาศยานเพื่อให้ได้เป็นค่าตำแหน่งและการวางตัวของอากาศยานของระบบไลดาร์ ในกระบวนการนี้จะมีข้อมูลสำคัญอีกข้อมูลหนึ่งคือข้อมูลระยะเหลือมในการติดตั้งระบบไลดาร์กับเสาอากาศของระบบการรังวัดด้วยดาวเทียม (Lever arm) รูปที่ 11 แสดงแกนอ้างอิงของระยะเหลือมในแกนต่าง ๆ เนื่องจากในการติดตั้งระบบเราไม่สามารถทำการติดตั้งให้จุดศูนย์กลางของระบบของระบบไลดาร์ ให้ตรงกับจุดศูนย์กลางเสาอากาศของระบบรังวัดด้วยดาวเทียมทำให้เกิดระยะเหลือมขึ้น ในการประมวลผลจะใช้ระยะเหลือมนี้ไปปรับแก้ตำแหน่งจากจุดศูนย์กลางเสาอากาศของระบบการรังวัดด้วยดาวเทียมเพื่อทำให้ค่าพิกัดที่ได้เป็นค่าพิกัดที่ศูนย์กลางของระบบไลดาร์



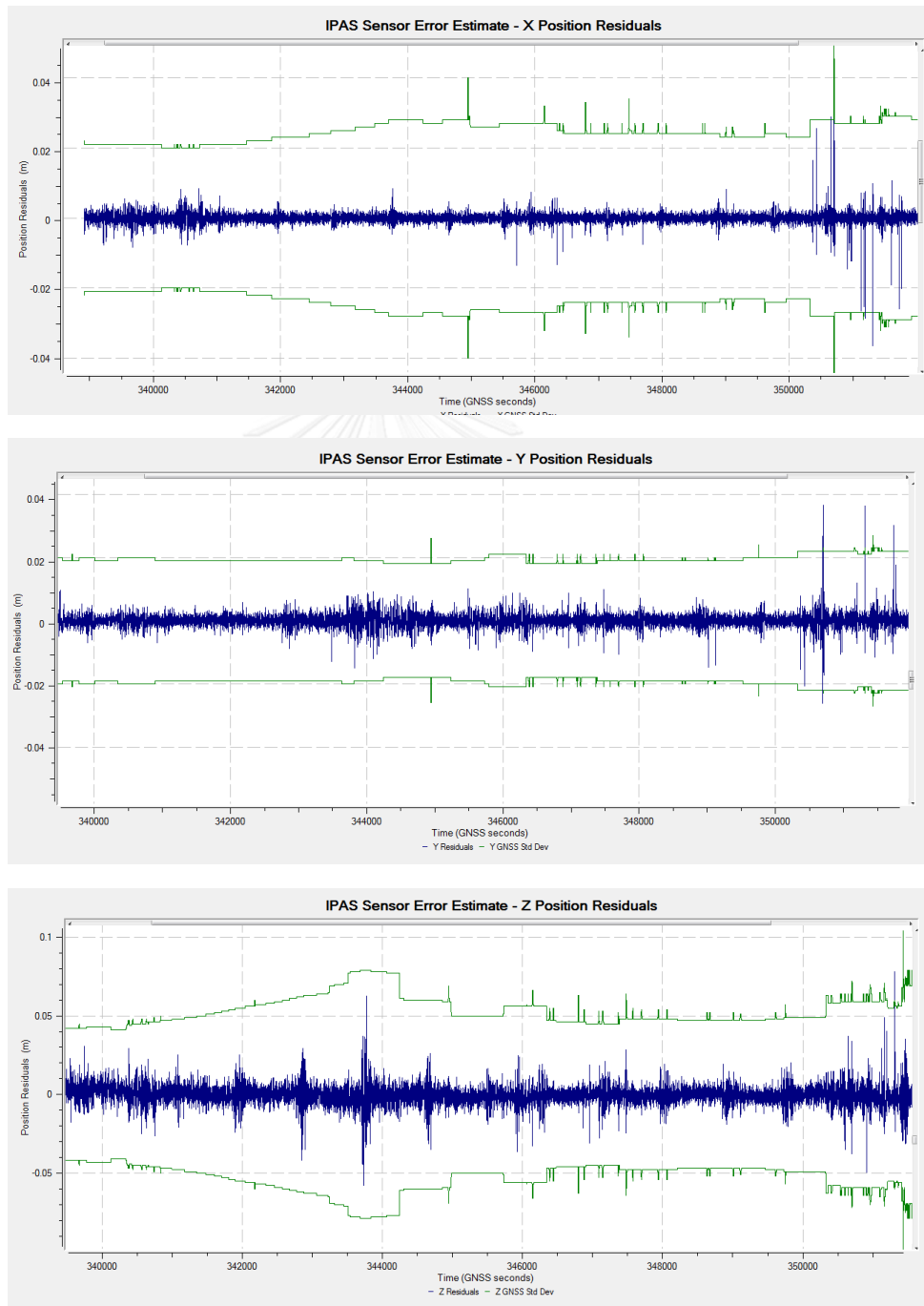
รูปที่ 11 แกนอ้างอิงของระยะเหลือมระหว่างเสาอากาศระบบรังวัดด้วยดาวเทียมจุดสีดำด้านบนกับจุดศูนย์กลางของระบบไลดาร์จุดสีแดง

การตรวจสอบภายหลังประมวลผลจะทำการตรวจสอบกราฟแสดงค่าระยะเลื่อมในแต่ละแนวแกนว่ามีค่าความผิดพลาดสูงหรือไม่ กราฟจะแสดงค่าระยะเลื่อมที่นำเข้าเทียบกับค่าระยะเลื่อมที่ได้จากการประมวลผล ระยะเลื่อมที่ดีจะต้องมีค่าต่างระหว่างค่าที่นำเข้าและค่าที่ประมวลผลไม่มาก ดังในรูปที่ 12 แสดงให้เห็นถึงค่าต่างของค่าที่นำเข้าและค่าที่ประมวลผลได้ในแกน x ,y และ z มีค่าต่างกันไม่เกิน 0.05 เมตร



รูปที่ 12 แสดงค่าต่างระหว่างค่าระยะเลื่อมที่นำเข้าและระยะเลื่อมที่คำนวณได้ โดยแกน y เป็น ค่าระยะเลื่อมในหน่วยเมตร แกน x เป็น GPS time

เมื่อตรวจสอบกราฟความผิดพลาดของระยะเหลือในแต่ละแนวแกนแล้วจะทำการตรวจสอบค่าพิกัดที่คำนวณได้โดยพิจารณาจากกราฟเศษเหลือของค่าพิกัดที่คำนวณได้ ค่าพิกัดที่ดีควรมีค่าเศษเหลือไม่สูงมาก ดัง รูปที่ 13 แสดงให้เห็นถึงค่าเศษเหลือของค่าพิกัดทางราบที่มีค่าไม่เกิน ± 0.05 เมตร และทางดิ่งไม่เกิน ± 0.10 เมตร



รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าเศษเหลือของค่าพิกัดที่คำนวณได้ในแต่ละแนวแกน แกน y เป็นค่าเศษเหลือหน่วยเมตร แกน x เป็น GPS time เส้นสีน้ำเงินแสดงค่าเศษเหลือ และเส้นสีเขียวแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแต่ละแนวแกน

2.3.5 ข้อมูลตำแหน่งและการวางตัวของอากาศยานที่ได้จะอยู่ในระบบอ้างอิง WGS84 ทั้งทางราบและทางตั้ง ค่าพิกัดนี้จะนำมาประมวลผลรวมกับข้อมูลการวัดระยะ เพื่อสร้างเป็นข้อมูลกลุ่มจุด (Point Cloud) และบันทึกข้อมูลแบบไบนารีนามสกุล *.las ซึ่งเป็นรูปแบบข้อมูลมาตรฐานในการเก็บข้อมูลไลดาร์ นอกจากข้อมูลตำแหน่ง ข้อมูลการวางตัวของอากาศยาน ข้อมูลการวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ ยังจำเป็นต้องใช้ข้อมูลการวัดสอบการติดตั้งระบบ (Boresight Calibrate) เป็นการวัดสอบการติดตั้งระบบเนื่องจากในการติดตั้งไม่สามารถติดตั้งให้ระบบอยู่ในแนวราบและมีแกนตั้งตั้งฉากกับแนวราบได้พอดี ทำให้ต้องมีค่าปรับแก้ความผิดพลาดจากการติดตั้งนี้ ดังนั้นในการติดตั้งระบบไลดาร์ทุกครั้งจะต้องมีการวัดสอบการติดตั้งระบบทุกครั้งก่อนนำไปใช้งาน ในกระบวนการเชิงพาณิชย์ ขณะประมวลผลข้อมูลไลดาร์จะมีการแปลงความสูงจากทรงรี WGS84 ไปเป็นความสูงออร์โทเมตริกด้วยแบบจำลองย็อยด์สากล EGM96 เพื่อนำข้อมูลไปใช้งานแต่ในงานวิจัยนี้จะสร้างข้อมูลขึ้นมาสองชุดข้อมูลคือข้อมูลที่มีความสูงออร์โทเมตริกซึ่งการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองย็อยด์สากล EGM96 และ ข้อมูลที่มีความสูงอ้างอิงกับทรงรี WGS84 เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป

2.4 Loess non parametric function

Dias (2001) อธิบายวิธีการ Loess ไว้ว่า วิธีการ Loess จะรู้จักกันอีกชื่อคือ Locally weighted scatterplot smooth จะใช้การกำหนดน้ำหนักภายในพื้นที่ (Local weighted) ร่วมกับสมการเชิงเส้นในการทำข้อมูลให้ต่อเนื่อง การทำให้ต่อเนื่อง (Smoothing) จะพิจารณาภายในกลุ่มข้อมูลเท่านั้น เนื่องจากการทำให้ต่อเนื่องจะใช้ข้อมูลรอบข้างที่มีอยู่ในการคำนวณ กระบวนการทำงานจะต้องมีการกำหนดน้ำหนักให้กับฟังก์ชันที่ใช้ในการถดถอย (Regression) ซึ่งน้ำหนักจะใช้ข้อมูลภายในกลุ่มข้อมูลเป็นตัวกำหนด วิธีการ Loess จะใช้สมการในการคำนวณน้ำหนักของฟังก์ชันวิเคราะห์การถดถอย (Regression Function) ด้วยสมการ Quadratic Polynomial ซึ่งจะมีกระบวนการในการทำงานดังนี้

1. คำนวณน้ำหนักของการถดถอยที่ใช้กำหนดให้กับจุดข้อมูลจากสมการ

$$w_i = \left(1 - \left|\frac{x - x_i}{d(x)}\right|^3\right)^3$$

โดย x คือค่าที่ของจุดข้อมูลที่ต้องการทำให้ต่อเนื่อง

x_i คือ ค่าของจุดข้อมูลที่ใกล้ x ที่สุด

$d(x)$ คือ ระยะทางระหว่าง x จุดที่ใกล้ที่สุดในกลุ่มข้อมูล

2. ทำการคำนวณปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด สมการที่ใช้ปรับแก้ด้วยวิธี Loess คือ โพลีโนเมียลลำดับที่ 2

3. ข้อมูลที่ผ่านการทำให้ต่อเนื่องที่ได้จะมีน้ำหนักที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าที่สนใจ

2.5 การหาความสูงต่างระหว่างพื้นผิวย็อยด์และพื้นผิวทรงรี

เฉลิมชนม์ สติระพจน์ (2556) ได้สรุปวิธีการหาความสูงต่างระหว่างพื้นผิวย็อยด์และพื้นผิวทรงรีไว้ดังนี้ วิธีการหาความสูงต่างระหว่างพื้นผิวย็อยด์และพื้นผิวทรงรีมี 3 วิธีคือ Geopotential model of the earth's gravity field, Gravimetric measurements and Stokes integral, Interpolation Method โดยมีรายละเอียดในแต่ละวิธีโดยสรุปดังนี้

วิธี Geopotential model of the earth's gravity field สร้างจากข้อมูลสนามความถ่วงพิภพจากดาวเทียมและข้อมูลจากภาคพื้นดิน นำมาสร้างแบบจำลองด้วยอนุกรมฮาร์โมนิกทรงกลมพร้อมกับสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง ในการหาค่าความสูงย็อยด์จะใช้ข้อมูล ละติจูด ลองจิจูด และความสูงทรงรี มาคำนวณร่วมกับแบบจำลองเพื่อหาค่าความสูงย็อยด์ที่จุดนั้น ความถูกต้องของความสูงย็อยด์ที่คำนวณด้วยวิธีนี้ขึ้นกับปริมาณข้อมูลสนามความถ่วงที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้สร้างแบบจำลองย็อยด์สากล EGM96 และปัจจุบันมีการสร้างแบบจำลอง EGM2008 ขึ้นมาใช้ ซึ่งเป็นแบบจำลองย็อยด์สากลล่าสุดที่มีใช้ในปัจจุบัน เป็นวิธีการที่สะดวกและนิยมใช้ในซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ทั่วไป

วิธี Gravimetric ใช้ข้อมูลค่าความถ่วงพิภพภาคพื้นดินร่วมกับวิธีการ Stokes's Integral เพื่อสร้างเป็นพื้นผิวย็อยด์ท้องถิ่น เป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องของความสูงย็อยด์ที่ดีที่สุดเมื่อข้อมูลที่ใช้มีจำนวนและการกระจายตัวในพื้นที่มากพอ

วิธี Interpolation method ใช้ข้อมูลจุดที่มีค่าความสูงออร์โทเมตริกและความสูงทรงรีนำมาหาค่าต่างความสูง ค่าต่างความสูงที่ได้จะนำไปสร้างพื้นผิวค่าต่างความสูงด้วยการประมาณค่าภายใน พื้นผิวที่ได้จะนำไปใช้ในการหาค่าต่างความสูงของจุดอื่น ความถูกต้องของวิธีนี้ขึ้นกับ ความถูกต้องของค่าต่างความสูง จำนวนจุด และการกระจายตัวของจุดที่ใช้ในการประมาณค่าภายใน

2.6 การประมาณค่าภายในด้วยวิธี Spline

How Spline works ("ArcGIS Help 10.1", 2012) ได้อธิบายวิธีการประมาณค่าภายในแบบ Spline ไว้ว่าเป็นวิธีการประมาณค่าทางพื้นที่ โดยกำหนดค่าความสูงของจุดที่ไม่ทราบค่าความสูงด้วยการสร้างเส้นโค้งให้สอดคล้องกับจุดที่มีอยู่ จะใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาเส้นโค้งระหว่างจุดที่มีอยู่ทั้งสองจุด แล้วนำสมการเส้นโค้งที่ได้ไปประมาณค่าจุดที่ต้องการทราบที่อยู่ระหว่างจุดที่มีอยู่ ทำให้วิธี Spline ใช้จุดจำนวนไม่มากในการประมาณค่าจุดที่ต้องการทราบ สมการในการประมาณค่าด้วยวิธี Spline แสดงได้ดังนี้

$$S(x, y) = T(x, y) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j)$$

โดย $j = 1, 2, \dots, N$

N คือ จำนวนจุดที่มีอยู่

λ_j คือ สัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรง

r_j คือ ระยะห่างระหว่างจุด (x, y) ถึงจุด j^{th}

$T(x, y)$ และ $R(r_j)$ คือสมการในแต่ละรูปวิธีของ spline ที่ใช้ประมาณค่ามีสองวิธีด้วยกันคือ Regularized และ Tension

วิธี Regularized จะใช้สมการ $T(x, y)$ ดังนี้

$$T(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y$$

โดย a คือ สัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรงและสมการ $R(r)$ ดังนี้

$$R(r) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{r^2}{4} \left[\ln \left(\frac{r}{2\tau} \right) + c - 1 \right] + \tau^2 \left[K_0 \left(\frac{r}{\tau} \right) + c + \ln \left(\frac{r}{2\pi} \right) \right] \right\}$$

โดย r คือ ระยะห่างระหว่างจุดที่ทราบกับจุดที่ต้องการทราบค่า

τ^2 คือ ค่าน้ำหนัก

K_0 คือ Bessel function

c คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.577215

วิธี Tension จะใช้สมการ $T(x, y)$ ดังนี้

$$T(x, y) = a_1$$

โดย a_1 คือ สัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรง

และสมการ $R(r)$ ดังนี้

$$R(r) = \frac{1}{2\pi\varphi^2} \left[\ln\left(\frac{r\varphi}{2} + c + K_0(r\varphi)\right) \right]$$

โดย r คือ ระยะห่างระหว่างจุดที่ทราบค่ากับจุดที่ต้องการทราบค่า

φ^2 คือ ค่าน้ำหนัก

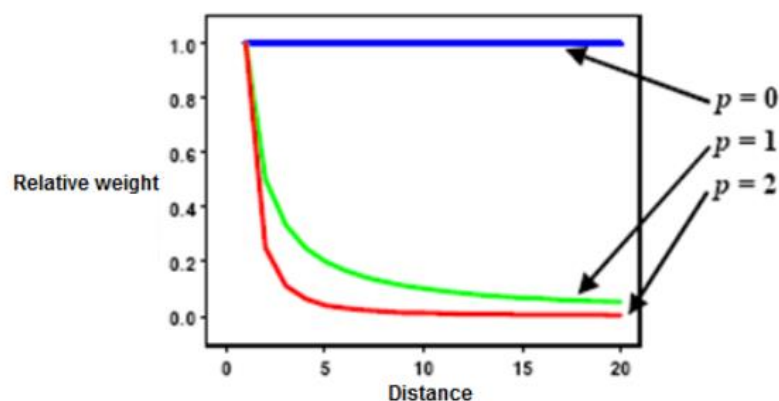
K_0 คือ Bessel function

C คือค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.577215

2.7 การประมาณค่าภายในด้วยวิธี Inverse Distance Weight (IDW)

How IDW works (“ArcGIS Help 10.1”, 2012) ได้อธิบายวิธีการประมาณค่าภายในแบบ IDW ไว้ว่าเป็นวิธีการมีสมมุติฐานว่า วัตถุที่อยู่ใกล้กันจะมีอิทธิพลต่อกันมากกว่าวัตถุที่อยู่ไกลกัน การประมาณค่าจุดที่ไม่ทราบค่าวิธีการ IDW จะใช้จุดรอบ ๆ มาประมาณค่าโดยให้ค่าน้ำหนักจุดที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งที่ต้องการประมาณค่ามากกว่าจุดที่อยู่ไกล ค่าของน้ำหนักจะแปรผกผันกับระยะทาง หมายความว่ายิ่งห่างจากจุดที่ต้องการทราบค่ามากเท่าไรน้ำหนักของข้อมูลที่จะนำมาใช้คำนวณนั้นก็ จะน้อยไปตามระยะทางที่มากขึ้น

Power function จากวิธีการข้างต้นการประมาณค่าด้วยวิธี IDW จะกำหนดน้ำหนักด้วย ระยะทาง ในการกำหนดน้ำหนักนี้จะมีวิธีการกำหนดน้ำหนักด้วยระยะทาง 3 รูปแบบซึ่งจะถูกเรียกว่า Power function เป็นการกำหนดน้ำหนักให้กับระยะทางระยะต่าง ๆ ที่ต่างกันออกไปตามแต่ละ รูปแบบ ดังกราฟในรูปที่ 14



รูปที่ 14 กราฟแสดงลักษณะน้ำหนักในแต่ละรูปแบบของ Power Function

(ที่มา: <http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/0031000002m000000>)

จากกราฟ จะมี Power function 3 รูปแบบด้วยกันคือ $p = 0$ เป็นการกำหนดน้ำหนักให้เท่ากับ 1 ทุกข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณหมายความว่าข้อมูลทุกตัวมีน้ำหนักเท่ากันหมด รูปแบบที่สอง $p=1$ และรูปแบบที่สาม $p=2$ เป็นรูปแบบที่มีการปรับลดน้ำหนักลงตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นหมายความว่ายิ่งระยะทางเพิ่มขึ้นน้ำหนักของข้อมูลนั้นก็ยิ่งน้อยลง รูปแบบ $p=1$ และ $p=2$ จะมีสมมุติฐานเดียวกันต่างกันที่การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตามระยะดังที่แสดงในกราฟรูปที่ 14 การกำหนดน้ำหนักทั้งสามรูปแบบจะถูกเลือกใช้ในการประมาณค่าด้วยวิธี IDW เพื่อคำนวณค่าของจุดที่ต้องการทราบค่าจากข้อมูลจุดทราบค่าที่มีอยู่

2.8 การประมาณค่าภายในด้วยวิธี Kriging

How Kriging works (“ArcGIS Help 10.1”, 2012) ได้อธิบายวิธีการประมาณค่าภายในแบบ Kriging ไว้ว่าเป็นวิธีการที่ใช้แบบจำลองทางสถิติเข้ามาช่วยในการคำนวณตำแหน่งของจุดที่ต้องการทราบค่า โดยวิธี Kriging มีสมมุติฐานที่ว่า ระยะทางและทิศทางระหว่างจุดจะแสดงความสัมพันธ์กันทางตำแหน่งซึ่งสามารถนำไปใช้แสดงพื้นผิวภูมิประเทศได้ วิธีการ Kriging จะทำการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (fit mathematical model) จากข้อมูลจุดทั้งหมดหรือภายในรัศมีที่กำหนด แล้วนำแบบจำลองที่ได้มาหาค่าของจุดที่ต้องการทราบ ในกระบวนการคำนวณนั้นจะเริ่มจากการ วิเคราะห์ทางสถิติกับข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ (Statistical Analysis), สร้างแบบจำลอง SemoVariogram, สร้างข้อมูลพื้นผิว (Creating Surface) และวิเคราะห์ความผันแปรของพื้นผิว (exploring a variance surface) Kriging เป็นวิธีการที่เหมาะสมเมื่อทราบความสัมพันธ์และทิศทางของข้อมูล ซึ่งนิยมใช้ในงานทางด้านปฐพีวิทยา และ ธรณีวิทยา

Kriging มีวิธีการที่คล้ายคลึงกับ IDW ที่จะให้น้ำหนักข้อมูลรอบข้างเพื่อนำมาคำนวณหาข้อมูลที่ต้องการทราบ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

โดย $Z(s_i)$ คือ ค่าของข้อมูลที่ i

λ_i คือ น้ำหนักของข้อมูลที่ i

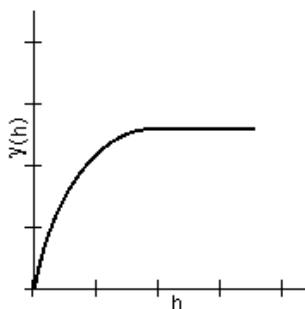
s_0 คือ ข้อมูลที่ต้องการทราบค่า

N คือ จำนวนข้อมูลที่ใช้

ค่า λ_i ในวิธีการ kriging ขึ้นกับแบบจำลองที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ทางตำแหน่งระหว่างตำแหน่งที่ทราบค่าและตำแหน่งที่ต้องการทราบค่า ดังนั้นวิธีการ Kriging จะมีกระบวนการ

สองกระบวนการคือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและการใช้ความสัมพันธ์นั้นคำนวณค่าที่ของจุดที่ต้องการทราบค่า ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งนั้นจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง โดยแบบจำลองที่นิยมใช้มีดังนี้

SPHERICAL



$$y(h) = c_0 + c \left(\frac{3h}{2\alpha} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{\alpha} \right)^3 \right) \quad 0 < h \leq \alpha$$

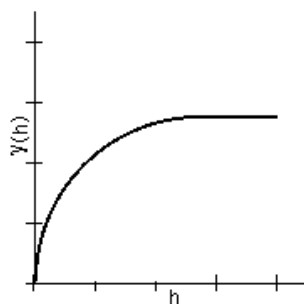
$$y(h) = c_0 + c \quad h > \alpha$$

$$y(0) = 0$$

รูปที่ 15 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ Spherical

(ที่มา: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z00000076000000>)

CIRCULAR



$$y(h) = c_0 + c \left(1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{h}{\alpha} \right) + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha^2}} \right) \quad 0 < h \leq \alpha$$

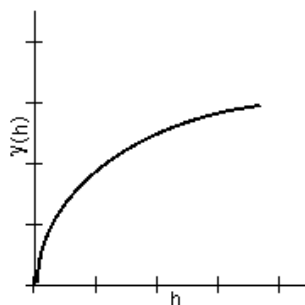
$$y(h) = c_0 + c \quad h > \alpha$$

$$y(0) = 0$$

รูปที่ 16 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ Circular

(ที่มา: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z00000076000000>)

EXPONENTIAL



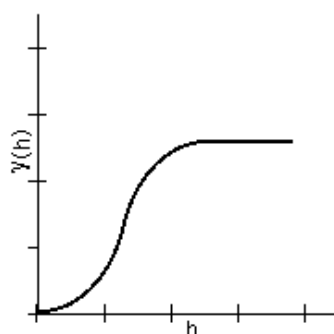
$$y(h) = c_0 + c \left(1 - \exp \left(-\frac{h}{r} \right) \right) \quad h > 0$$

$$y(0) = 0$$

รูปที่ 17 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ Exponential

(ที่มา: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z00000076000000>)

GAUSSIAN



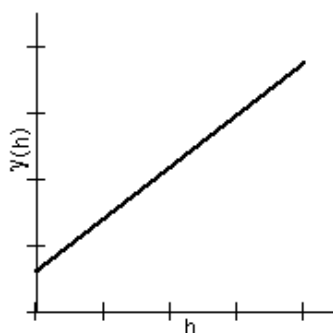
$$y(h) = c_0 + c \left(1 - \exp\left(-\frac{h^2}{r^2}\right) \right) \quad h > 0$$

$$y(0) = 0$$

รูปที่ 18 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ Gaussian

(ที่มา: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z00000076000000>)

LINEAR



$$y(h) = c_0 + c \left(\frac{h}{\alpha} \right) \quad 0 < h \leq \alpha$$

$$y(h) = c_0 + c \quad h > \alpha$$

$$y(0) = 0$$

รูปที่ 19 แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบ Linear

(ที่มา: <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z00000076000000>)

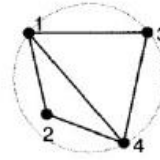
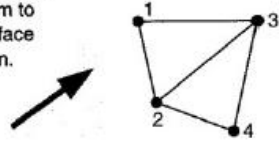
เมื่อได้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งแล้วจะนำแบบจำลองความสัมพันธ์ที่ได้ไปใช้หาระยะและความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง เพื่อใช้เป็นน้ำหนักในการคำนวณค่าของตำแหน่งที่ต้องการทราบค่า

2.9 วิธีการประมาณค่าภายในแบบ Triangulated Irregular Network (TIN)

สรรเพชญ์ ชื่อนิติไพศาล (2556) ได้อธิบายความหมายของ TIN และวิธีการหาค่าของจุดที่ต้องการทราบค่าจากพื้นผิวที่เก็บข้อมูลในลักษณะ TIN ในการสร้าง TIN จะใช้วิธีการสร้างสามเหลี่ยมที่ใช้แทนพื้นผิวภูมิประเทศด้วยวิธีแบบ Delaunay เป็นวิธีการในการเลือกจุดขึ้นมาสร้างเป็นมุมของรูปสามเหลี่ยม โดยพิจารณาจากการสร้างวงกลมจากจุดสามจุด หากวงกลมที่สร้างขึ้นไม่มีจุดอื่นอยู่ภายในวงกลม จุดทั้งสามนั้นก็จะใช้เป็นมุมทั้งสามมุมของรูปสามเหลี่ยมที่จะสร้าง ดังรูปที่ 20

The Delaunay Triangulation

A Delaunay triangulation uses an algorithm to optimize the surface representation.

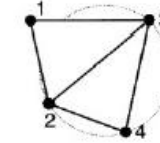
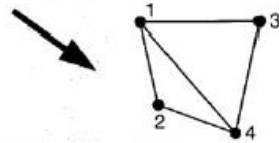


This triangulation fails the Delaunay test because the circle bounding nodes 1, 3, and 4 includes node 2.

- 1
- 2
- 3
- 4

From a simple case of four mass points, two triangulations are possible. Which is the valid TIN?

The definition of the Delaunay triangulation specifies that any circle around three nodes in a triangle will not include any other node.



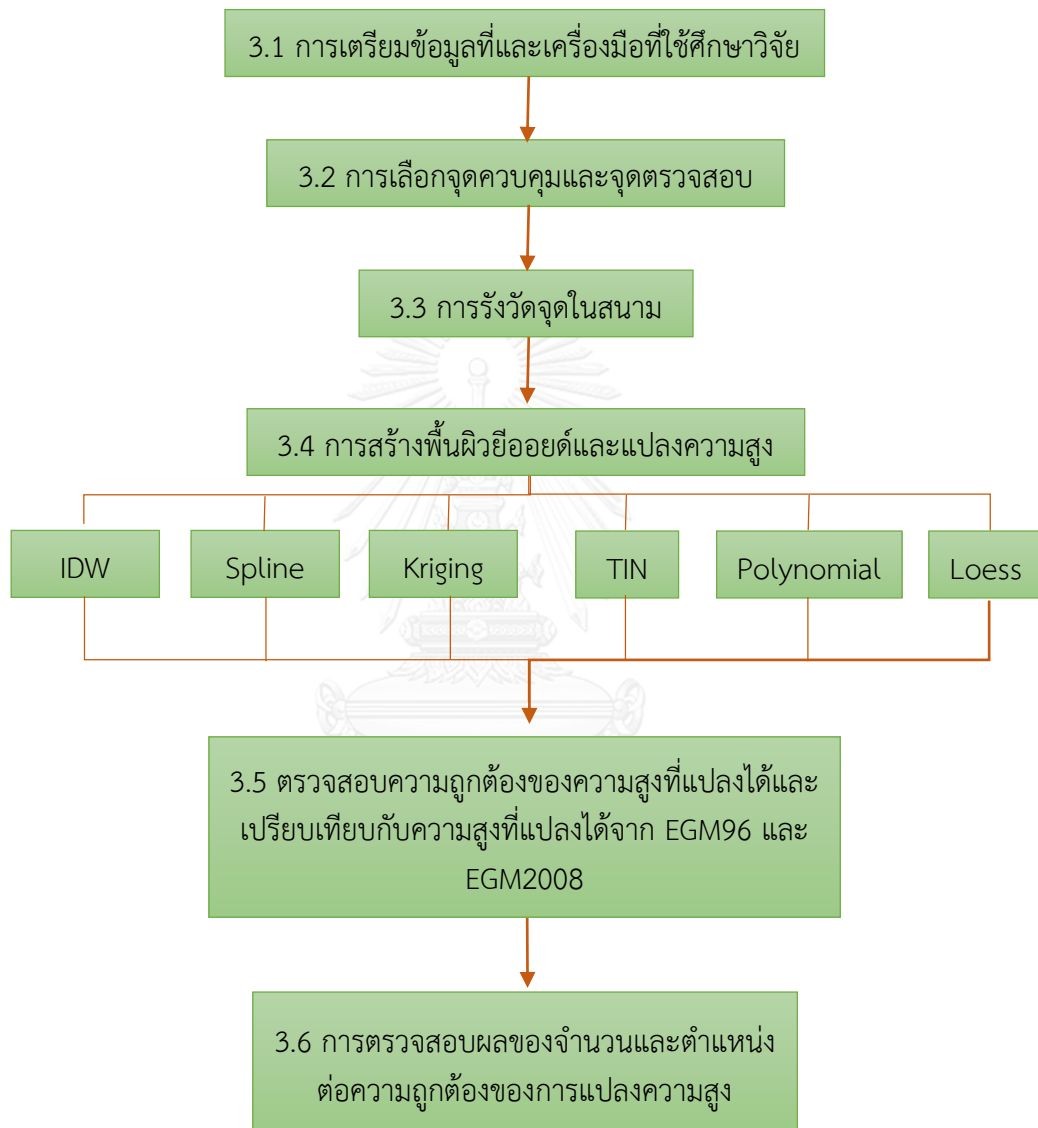
This triangulation satisfies the Delaunay test because a circle around each triangle contains no other nodes. This is the valid triangulation.

รูปที่ 20 การสร้าง TIN ตามวิธีแบบ Delaunay
(ที่มา: สรรเพชญ์ ชื่อนิติไพศาล, 2556)

เมื่อสร้างพื้นผิวได้แล้วการหาค่าของจุดที่ต้องการทราบค่าบนพื้นผิวนั้นจะใช้วิธีการแบบเชิงเส้นในการประมาณค่าจากสามเหลี่ยมที่จุดที่ต้องการทราบค่าไปปรากฏอยู่

บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยมีขั้นตอนการทำงานดังแผนผังการทำงานดังนี้



รูปที่ 21 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

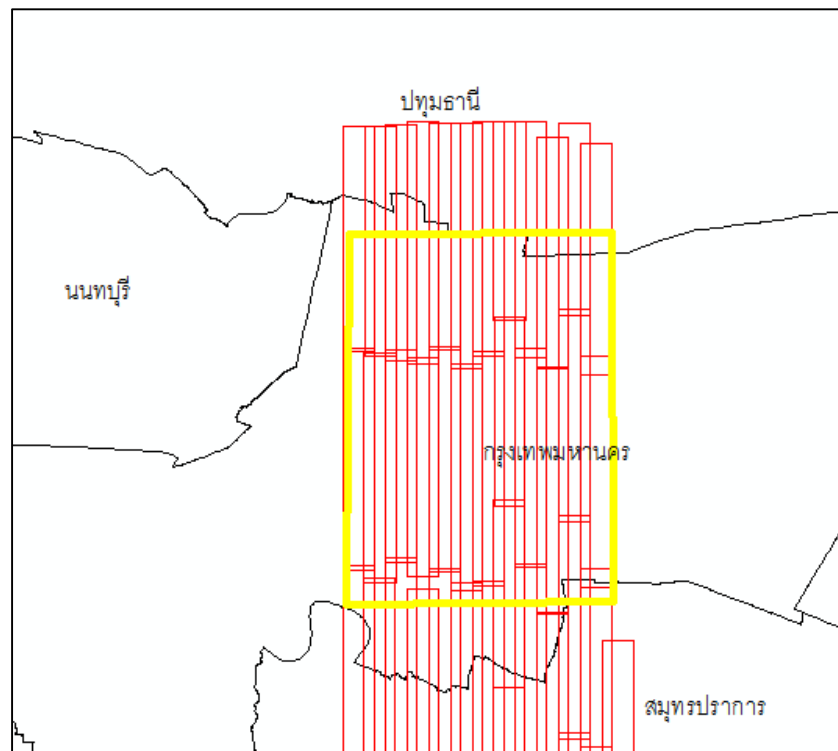
3.1 ข้อมูลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

3.1.1 ข้อมูลปริมิตที่ใช้ศึกษา

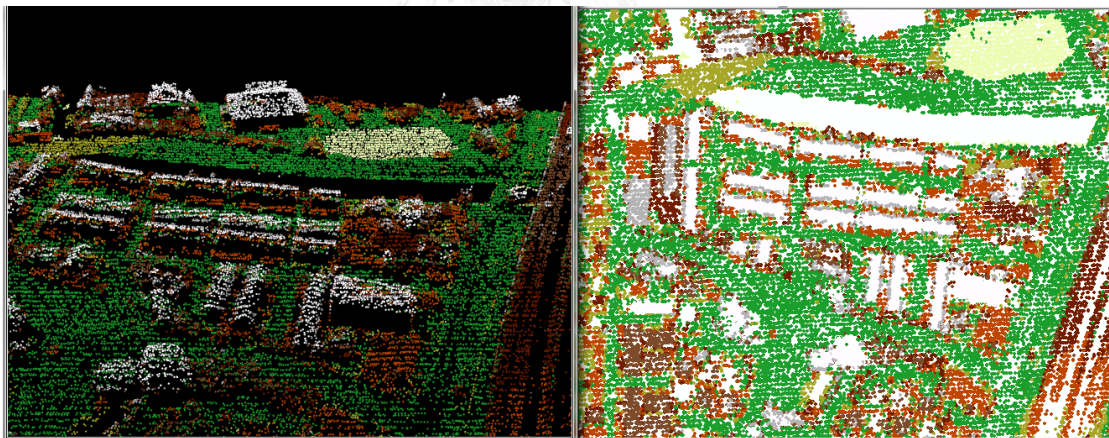
- ข้อมูลจุดความสูงที่ได้จากระบบไลดาร์ ทำการสำรวจด้วยระบบไลดาร์ยี่ห้อ Leica รุ่น ALS70 ในการสำรวจ บันทึกการสะท้อนกลับ (Return) ได้ 4 ระดับ มีความละเอียดโดยประมาณ 1 จุด ต่อพื้นที่ 1.5 ตร.ม. เป็นข้อมูลที่ใช้สำรวจภายในการบินสำรวจครั้งเดียวกันทั้งหมด ทำการสำรวจเมื่อวันที่ 19 ธันวาคม 2555 โดยมีรายละเอียดการตั้งค่าระบบไลดาร์เพื่อสำรวจเก็บข้อมูลดังนี้

Plus rate:	124700 Hz
Scan rate:	29 Hz
Field of View:	54 degree
Above Ground Level:	2000 ft.
Scan Pattern:	Sine

ข้อมูลจุดความสูงที่ได้จะบันทึกเป็นไฟล์ข้อมูลแบบไบนารี นามสกุล *.las แยกเก็บเป็น 1 ไฟล์ต่อ 1 แนวบิน มีความกว้างแนวบิน 1.6 กิโลเมตรต่อแนวบิน และมีความยาวตามแนวบินยาว 53 กิโลเมตรต่อแนวบิน ซึ่งพื้นที่วิจัยมีแนวบินสำรวจทั้งหมด 12 แนวบิน เป็นพื้นที่ประมาณ 440 ตร.กม. พื้นที่และแนวบินสำรวจแสดงไว้ดังรูปที่ 22 ข้อมูลจุดความสูงจากระบบไลดาร์ที่ได้จะมีจำนวนจุดจำนวนมาก ใน 1 แนวบินจะมีจำนวนจุดประมาณ 50 ล้านจุด กลุ่มข้อมูลจุดความหนาแน่นสูงนี้ถูกเรียกว่า “Point Cloud” ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยจะมี 2 ชุดข้อมูล ชุดข้อมูลแรกเป็นชุดข้อมูลที่มีค่าพิกัดความสูงอ้างอิงทรี WGS84 เพื่อใช้ศึกษาการแปลงความสูง และชุดข้อมูลที่สองเป็นชุดข้อมูลที่มีค่าพิกัดความสูงอ้างอิงทรีโทเมตริกผ่านการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองความสูงยี่ออยด์สากล EGM96 เพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องทางดิ่งของข้อมูลและเปรียบเทียบความถูกต้องที่ได้กับผลการตรวจสอบความถูกต้องทางดิ่งของข้อมูลชุดที่แรก ตัวอย่างข้อมูลกลุ่มจุดความหนาแน่นสูงที่ใช้ในงานวิจัยแสดงไว้ดังรูปที่ 23



รูปที่ 22 แสดงพื้นที่ที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ 23 ข้อมูลกลุ่มจุดความหนาแน่นสูงที่ใช้ในงานวิจัย

- ข้อมูลตำแหน่งจุดควบคุมทางดิ่ง และ ข้อมูลบรรยายหมุดของกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นโครงข่ายงานระดับถ่ายความสูงมาจากหมุดอ้างอิง BMR5 ของกรมแผนที่ทหารตั้งอยู่ที่เข้าหลวง จังหวัดราชบุรีมาสู่หมุดหมายเลข 5024 ฝังอยู่บนโคนเสาต่อม่อสะพานข้ามถนนกาญจนาภิเษกตัดถนนพระรามที่ 2 ในการเดินระดับจากหมุด BMR5 ถึงหมุด 5024 มีเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของการวัดไป-กลับ ในแต่ละตอนการระดับไม่เกิน $\pm 8\sqrt{K}$ มิลลิเมตร เมื่อ K เป็นระยะทางในหน่วยกิโลเมตร จากนั้นใช้หมุด 5024 ถ่ายค่าระดับด้วยงานระดับไปสู่หมุดภายในพื้นที่กรุงเทพมหานครจำนวน 989 หมุด จำนวนวงรอบ 208 จุด ตรวจสอบความถูกต้องแต่ละโครงข่ายด้วยเกณฑ์ ± 12

\sqrt{K} มิลลิเมตรหลังจากนั้นปรับเป็นโครงข่ายเดียวกันทั้งหมดด้วยวิธี Least Square ในรูปที่ 24 แสดงหมุดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นหมุดทองเหลืองฝังอยู่บนถาวรวัตถุ เช่นสะพาน หรือ โคนเสาต่อม่อ



รูปที่ 24 หมุดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพมหานคร

3.1.2 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการศึกษา

- โปรแกรม Table Curve 3D V4.0 ใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์และแปลงความสูงของข้อมูลที่ได้จากระบบไลดาร์ ด้วยแบบจำลองการแปลงค่าพิกัด
- โปรแกรม ArcGIS 10.3 ใช้ในการวางแผนการสำรวจภาคพื้นดิน และคำนวณพื้นที่ผิวย่อยด้วยวิธีการประมาณค่าภายใน
- โปรแกรม Microsoft Office Excel version 2013 ใช้ในการเปรียบเทียบและคำนวณค่าทางสถิติต่าง ๆ

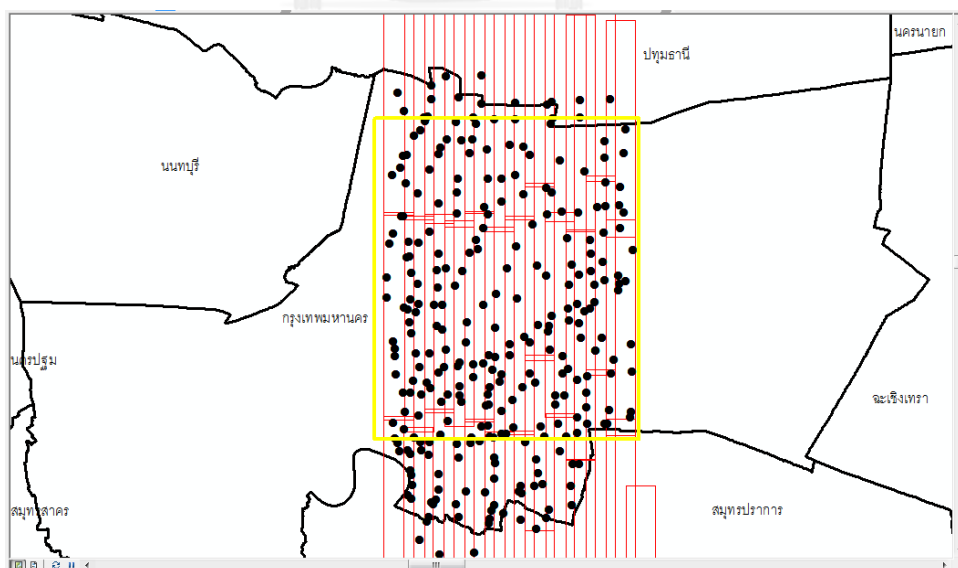
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

- กล้องระดับที่ใช้ในงานสำรวจชั้น 3 พร้อมขาตั้ง 1 ชุด
- ไม้สตาฟสำหรับทำงานระดับชั้น 3 จำนวน 2 อัน

- อุปกรณ์รับวัดค่าพิกัดจากดาวเทียมเพื่องานสำรวจ พร้อมอุปกรณ์จานรับดาวเทียม จำนวน 2 ชุด
- อุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์รับวัดค่าพิกัดจากดาวเทียมเพื่องานสำรวจเพื่อใช้ในการรับวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic, RTK) จำนวน 2 ชุด
- โพลพร้อมอุปกรณ์เสริมสำหรับรับวัดค่าพิกัดจากดาวเทียมแบบ RTK จำนวน 1 ชุด

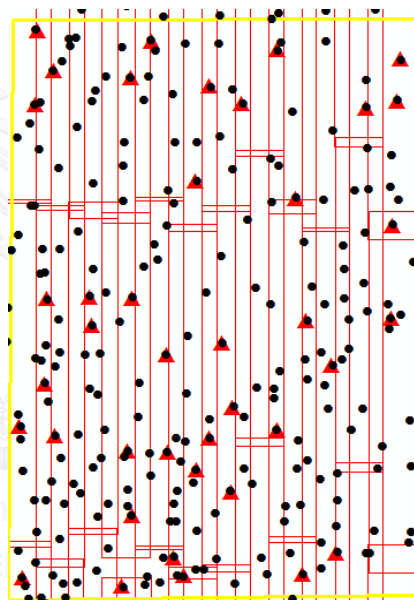
3.2 การเลือกจุดควบคุมและจุดตรวจสอบ

จุดควบคุมจำนวน 40 จุด และจุดตรวจสอบตรวจสอบจำนวน 20 จุด เป็นจุดที่ต้องทราบค่าพิกัดทางราบที่อ้างอิงกับทรงรี WGS84 และค่าความสูงร่วมระหว่าง ค่าความสูงที่อ้างอิงทรงรี WGS84 ความสูงออร์โทเมตริก และความสูงย็อยด์ เพื่อใช้ในการคำนวณและตรวจสอบความสูงที่ได้จากการแปลงความสูงด้วยวิธีต่าง ๆ ที่เลือกศึกษา วิธีการเลือกจุดควบคุมจะเลือกจุดควบคุมจากข้อมูลไลดาร์ซึ่งให้ค่าพิกัดที่อ้างอิงกับทรงรี WGS84 ทั้งทางราบและทางตั้ง ทำให้ต้องมีการรับวัดค่าพิกัดทางตั้งด้วยงานระดับเพื่อหาความสูงออร์โทเมตริก ดังนั้นตำแหน่งจุดควบคุมที่เลือกจะอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับหมุดควบคุมทางตั้งของกรุงเทพมหานครซึ่งภายในพื้นที่วิจัยมีหมุดควบคุมทางตั้งอยู่ทั้งหมด 232 จุด ดังรูปที่ 25



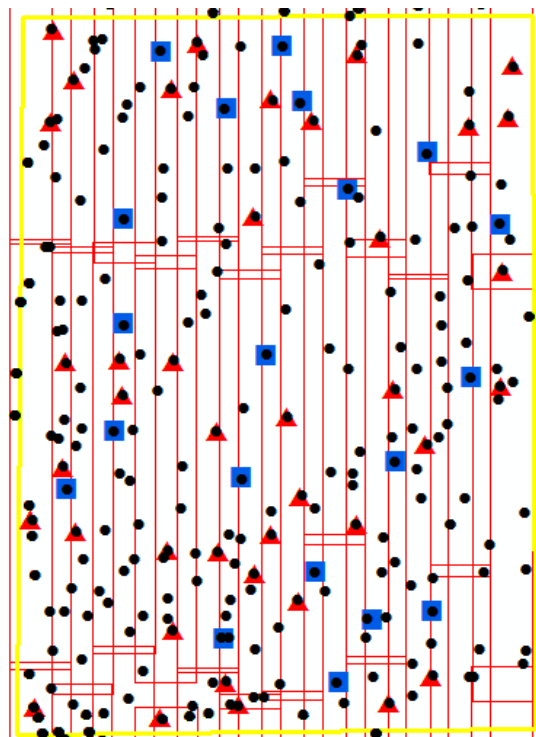
รูปที่ 25 ตำแหน่งหมุดควบคุมทางตั้งของกรุงเทพฯ จุดสีดำคือหมุดควบคุมทางตั้งของกรุงเทพมหานคร กรอบสีเหลืองคือพื้นที่ศึกษา กรอบสีแดงคือข้อมูลไลดาร์

ตำแหน่งของจุดควบคุมที่เลือกจะใช้วิธีสุ่มเลือกและกระจายทั่วทั้งพื้นที่ศึกษา ในแต่ละจุดจะต้องเป็นพื้นที่ที่มองเห็นหมดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพมหานครเพื่อให้สามารถถ่ายระดับจากหมดควบคุมทางดิ่งมาสู่จุดที่เลือกไว้ได้และที่เป็นพื้นราบเปิดโล่งเนื่องจากจำเป็นต้องใช้การรังวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียมเพื่อหาตำแหน่งทางราบของจุดควบคุม เช่น พื้นถนน ดังรูปที่ 26 ซ้าย แสดงบริเวณจุดควบคุมที่เลือกบนภาพออร์โท และรูป 26 ขวา สามเหลี่ยมสีแดงแสดงตำแหน่งจุดควบคุมทั้ง 40 จุดที่เลือก จุดแสดงหมดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพ เนื่องจากข้อจำกัดทางพื้นที่ ที่ต้องเลือกพื้นที่เปิดโล่งเพื่อรับสัญญาณดาวเทียมและเป็นพื้นที่ราบ สามารถมองเห็นหมดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพฯ เพื่อใช้ในการถ่ายระดับ ทำให้จากหมดควบคุมของกรุงเทพฯ ทั้งหมด 232 จุด มีจุดที่เหมาะสมในการเลือกใช้เป็นจุดควบคุมและจุดตรวจสอบจำนวน 60 จุดดังที่แสดงในรูปที่ 26



รูปที่ 26 ตำแหน่งและลักษณะพื้นที่ของจุดควบคุม ซ้ายแสดงตัวอย่างลักษณะพื้นที่ของจุดควบคุม วงกลมคือหมดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพฯ สามเหลี่ยมคือตำแหน่งจุดควบคุมที่เลือก ขวาจุดสามเหลี่ยมแสดงจุดควบคุมภายในพื้นที่ศึกษา วงกลมสีดำคือหมดควบคุมทางดิ่ง

เมื่อเลือกจุดควบคุมทั้ง 40 จุดได้ จะใช้จุดควบคุมที่เลือกไว้และหมดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพมหานครที่เหลือ เลือกตำแหน่งจุดตรวจสอบอีก 20 จุด ตำแหน่งจุดตรวจสอบจะสุ่มเลือกให้อยู่ในบริเวณพื้นที่ที่ไม่มีจุดควบคุมและกระจายทั่วทั้งพื้นที่ การเลือกพื้นที่จุดตรวจสอบจะเลือกลักษณะเดียวกับจุดควบคุม สีเหลี่ยมสีฟ้าในรูปที่ 21 คือตำแหน่งจุดตรวจสอบในพื้นที่ศึกษาจำนวน 20 จุด

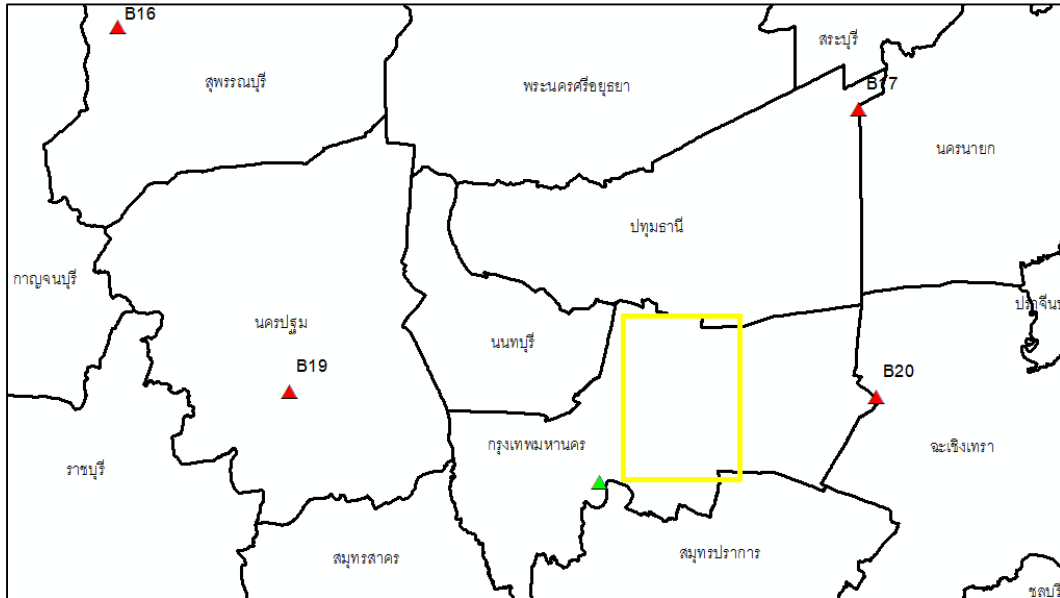


รูปที่ 27 ตำแหน่งหมุดควบคุมทางดิ่ง จุดควบคุม และ จุดตรวจสอบ โดยวงกลมสีดำคือหมุดควบคุมทางดิ่งสามเหลี่ยมสีแดงคือจุดควบคุม และสี่เหลี่ยมสีฟ้าคือจุดตรวจสอบ

3.3 การรังวัดจุดที่เลือกในสนาม

จุดควบคุมและจุดตรวจสอบที่เลือกไว้เป็นจุดจากข้อมูลไลดาร์ซึ่งมีค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยระบบไลดาร์ที่อ้างอิงทรงรี WGS84 ในการศึกษาวิจัยจะต้องใช้ค่าความสูงออร์โทเมตริกของจุดควบคุมทำให้ต้องมีการทำระดับถ่ายค่าความสูงจาหมุดควบคุมทางดิ่ง การทำงานในสนามจะใช้ค่าพิกัดทางราบที่ได้จากข้อมูลไลดาร์มากำหนดตำแหน่งจุดที่หาค่าความสูงออร์โทเมตริกด้วยงานระดับ การกำหนดตำแหน่งจะใช้การรังวัดดาวเทียมด้วยวิธีการทำงานแบบจลนในทันที (Real Time Kinematic) โดยติดตั้งและกำหนดค่าอุปกรณ์รังวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียมที่สถานีฐาน (Reference Base Station) ให้มีการทำงานแบบจลนในทันที และกำหนดค่าอุปกรณ์ รังวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียมสถานีจร (Rover Station) ให้ทำงานแบบจลนในทันทีเพื่อรังวัดค่าพิกัด หลักการของการรังวัดค่าพิกัดจากดาวเทียมแบบจลนในทันทีจะต้องมีสถานีฐานและสถานีจรเพื่อรับสัญญาณจากสถานีฐานมาปรับแก้ให้ได้ค่าพิกัดสถานีจรที่มีความถูกต้องมากขึ้น สถานีฐานในงานวิจัยนี้จะใช้ตำแหน่งหมุดบนชั้นดาดฟ้าของอาคาร CDG House ซึ่งมีค่าพิกัด 666929.756 E และ 1515419.613 N ในระบบ UTM WGS84 zone 47 และ สูง 77.514 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง ค่าพิกัดของหมุดได้มาจากการรังวัดค่าพิกัดจากดาวเทียมแบบสถิตจากการถ่ายค่าพิกัดมาจากหมุดควบคุมที่ใช้ในโครงการสำรวจไลดาร์ลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (GISTDA) หมุดที่ใช้ในโครงการนี้ได้มีการถ่ายค่าพิกัดทางราบมาจากหมุดหลักฐานทางราบ ชั้น 1 ของกรมแผนที่ทหาร ใน

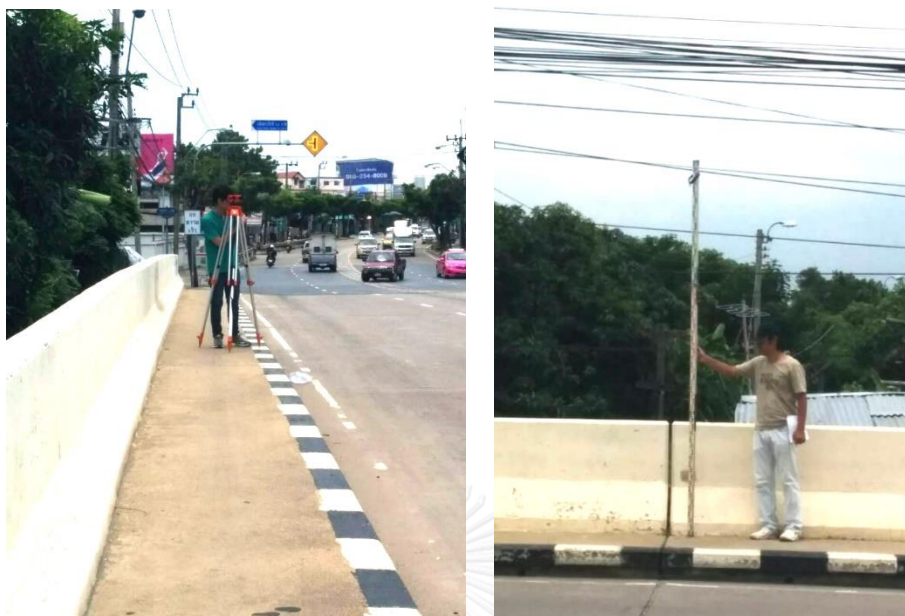
รูปที่ 28 แสดงตำแหน่งหมุดควบคุมของโครงการสำรวจไลดาร์ลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาและตำแหน่งหมุดอ้างอิงบนชั้นดาดฟ้าอาคาร CDG House และหมุดอ้างอิงบนชั้นดาดฟ้าอาคาร CDG House เป็นหมุดที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลไลดาร์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ จากการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในทันทีจะสามารถกำหนดตำแหน่งของจุดควบคุมและจุดตรวจสอบเพื่อใช้ในการถ่ายค่าความสูงจากหมุดควบคุมทางดิ่งด้วยงานระดับต่อไป



รูปที่ 28 ตำแหน่งหมุดควบคุม สามเหลี่ยมสีเขียวคือหมุดที่ยอดตึก cdg สามเหลี่ยมสีแดงคือหมุดควบคุมในโครงการไลดาร์ลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา

3.3.1 การตรวจสอบอุปกรณ์รังวัดทางดิ่ง ก่อนการรังวัดทำการตรวจสอบแนวเล็งของกล้องระดับว่าตั้งฉากกับแกนดิ่งหรือไม่ ด้วยวิธี Two peg test ก่อนที่จะเริ่มนำอุปกรณ์ไปรังวัดค่าความสูงของจุดที่ทำการเลือกไว้

3.3.2 กำหนดตำแหน่งจุดควบคุมด้วยการรังวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในทันที จากค่าพิกัดของจุดควบคุมที่ได้จากระบบไลดาร์ เมื่อได้ตำแหน่งจุดควบคุมแล้วจะนำไประดับมาตั้ง ณ จุดที่ได้พร้อมกับตั้งไม้ระดับไว้ที่หมุดควบคุมทางดิ่ง ตั้งกล้องระดับเพื่อถ่ายค่าระดับโดยเลือกจุดที่มีระยะจากกล้องระดับถึงจุดทั้งสองให้มีระยะทางใกล้เคียงกัน ทำการรังวัดค่าระดับจากหมุดอ้างอิงทางดิ่งไปสู่จุดควบคุม เมื่อทำการรังวัดเสร็จทำการย้ายตำแหน่งกล้องระดับใหม่โดยเลือกตำแหน่งในลักษณะเดียวกันเพื่อทำการรังวัดค่าระดับจากจุดควบคุมไปสู่หมุดอ้างอิงเพื่อใช้ในการตรวจสอบค่าระดับที่ได้และใช้วิธีเดียวกันนี้กับจุดตรวจสอบ รูปที่ 23 แสดงการถ่ายค่าระดับระหว่างหมุดควบคุมทางดิ่งและจุดควบคุมในสนาม



รูปที่ 29 การถ่ายค่าระดับระหว่างหมุดควบคุมทางดิ่งและจุดควบคุมในสนาม

3.4 การสร้างพื้นผิวออยด์และการแปลงความสูง

จุดควบคุมที่มีค่าพิกัดทางดิ่งร่วมระหว่างความสูงที่อ้างอิงทรงรี WGS84 และความสูงออร์โทเมตริกจะนำมาใช้คำนวณพารามิเตอร์ของแบบจำลองและสร้างพื้นผิวออยด์ด้วยวิธีประมาณค่า เพื่อใช้ในการแปลงความสูงจากทรงรี WGS84 ไปสู่ความสูงออร์โทเมตริก ด้วยวิธีต่าง ๆ ดังนี้

วิธีที่ 1 การแปลงความสูงด้วย แบบจำลองโพลีโนเมียลกำลังสามดั่งสมการ

$$z = a + \frac{b}{x} + \frac{c}{y} + \frac{d}{x^2} + \frac{e}{y^2} + \frac{f}{xy} + \frac{g}{x^3} + \frac{h}{y^3} + \frac{i}{xy^2} + \frac{j}{x^2y}$$

โดย x, y, z คือค่าพิกัดทางราบและทางดิ่ง

$a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$ คือพารามิเตอร์

จากสมการจะมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 10 ตัว ทำให้ต้องการสมการในการแก้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด 10 สมการ จากจุดควบคุมที่รังวัดในสนาม 1 จุดจะสามารถสร้างสมการได้ 1 สมการ ดังนั้นจุดควบคุมทั้ง 40 จุดจะสร้างสมการได้ 40 สมการส่งผลให้สมการมากกว่าจำนวนพารามิเตอร์ เรียกว่า Over determined System ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีการหาค่าพารามิเตอร์แบบกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square adjustment) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมสำรวจ เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของสมการด้วยโปรแกรม Table Curve 3D V4.0 ค่าพารามิเตอร์ที่

คำนวณได้จะนำไปใช้ร่วมกับแบบจำลองโพลีโนเมียลเพื่อคำนวณหาค่าความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบ เพื่อตรวจสอบกับความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับผลจากการตรวจสอบจะนำไปเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลกับวิธีอื่น ๆ

วิธีที่ 2 การแปลงความสูงด้วยนอนพาราเมตริก อัลกอริทึม วิธีการแบบ Loess จุดควบคุมจากการรังวัดในสนามจะนำไปทำ Data smoothing ด้วย Loess อัลกอริทึม หลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้ไปหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองด้วยการหาค่าพารามิเตอร์กำลังสองน้อยที่สุดด้วยโปรแกรม Table Curve 3D V4.0 พารามิเตอร์ที่ได้จะนำไปใช้ในการแปลงค่าความสูงของจุดตรวจสอบเพื่อหาค่าความสูงออร์โทเมตริกและนำไปเปรียบเทียบกับความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลกับวิธีอื่น ๆ

วิธีที่ 3 การคำนวณย้อยอดแบบการประมาณค่าภายในด้วยวิธีการ Spline , IDW, TIN, และ Kriging จุดควบคุมจากการรังวัดในสนามจะนำไปทำการหาค่าความสูงย้อยอด N โดยการหาค่าต่างระหว่างค่าความสูงที่ได้จากการวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียมซึ่งเป็นความสูงที่อ้างอิงกับทรวงรี และความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับในสนาม ค่าต่างที่ได้คือค่าความสูงย้อยอด N นำค่า N ที่คำนวณได้ทั้ง 40 จุดไปสร้างพื้นผิวย้อยอดแบบการประมาณค่าภายในด้วยวิธีการ Spline, IDW, TIN, และ Kriging ด้วยโปรแกรม Arcgis 10.3 พื้นผิวย้อยอดที่จะใช้ในการแปลงความสูงของจุดตรวจสอบเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลเทียบกับวิธีอื่น ๆ

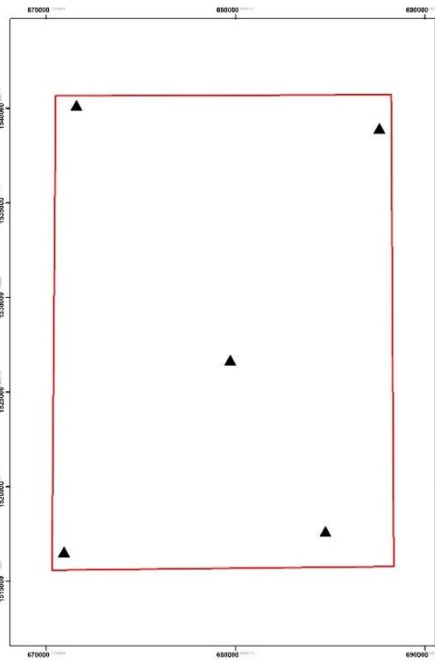
3.5 การตรวจสอบและเปรียบเทียบความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลง

ความสูงที่ได้จากการแปลงในแต่ละวิธีจะทำการตรวจสอบความถูกต้องโดยหาค่าต่างความสูงระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่แปลงได้เทียบกับความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับในสนามจำนวน 20 จุด ผลการตรวจสอบของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการแปลงสามมิติทั้งสามแบบพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับค่าความสูงด้วยแบบจำลอง EGM96 และ 2008 ด้วยค่าทางสถิติของผลการตรวจสอบกับจุดตรวจสอบในแต่ละวิธีเพื่อวิเคราะห์

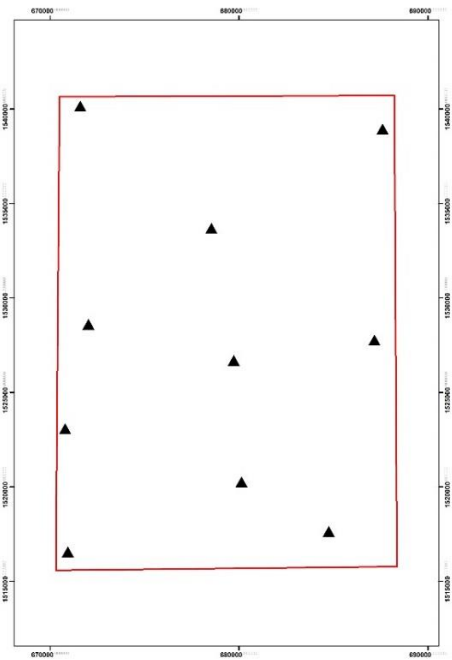
- การเปลี่ยนแปลงของความถูกต้องของข้อมูลหลังจากการคำนวณ
- แบบจำลองที่ให้ผลลัพธ์การแปลงที่ดีที่สุด

3.6 การตรวจสอบผลของจำนวนและตำแหน่งต่อความถูกต้องของการแปลงความสูง

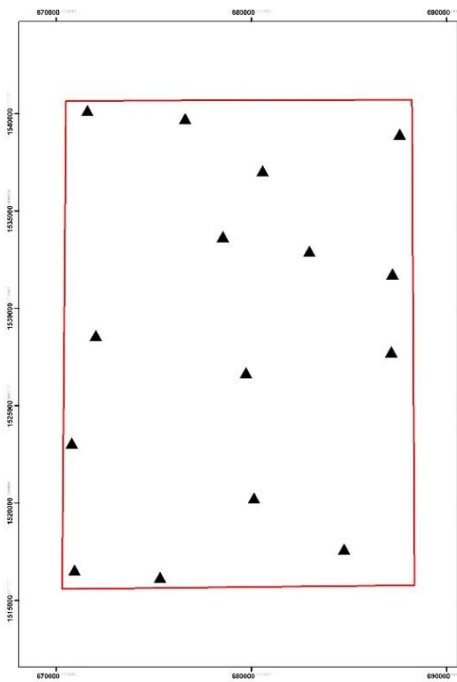
หลังจากทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของการแปลงความสูงด้วยพื้นผิวย้อยอดด้วยวิธีต่าง ๆ จะทำการสร้างพื้นผิวย้อยอดด้วยวิธีประมาณค่าภายในด้วยวิธี IDW, Kriging, Spline และ TIN ด้วยจุดควบคุมตั้งแต่ 5, 10, 15,...40 จุด ตามลำดับ พื้นผิวย้อยอดที่ได้จะนำไปใช้แปลงความสูงและตรวจสอบด้วยจุดตรวจสอบจำนวน 20 จุด เพื่อทำการทดสอบผลของจำนวนจุดควบคุมที่มีต่อความถูกต้องของการแปลงความสูง โดยตำแหน่งจุดควบคุมในกรณีต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 30 ได้ดังนี้



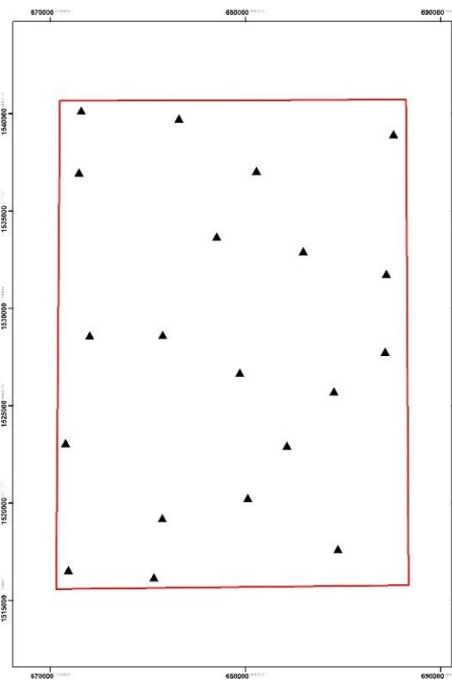
รูปที่ 31 ตำแหน่งจุดควบคุม 5 จุด



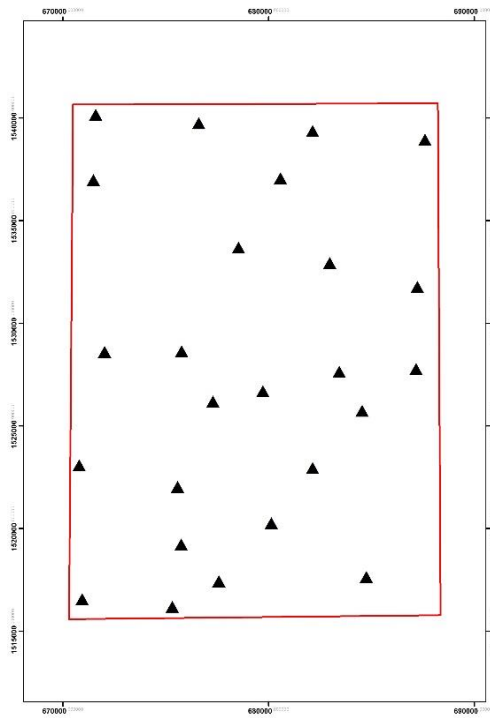
รูปที่ 30 ตำแหน่งจุดควบคุม 10 จุด



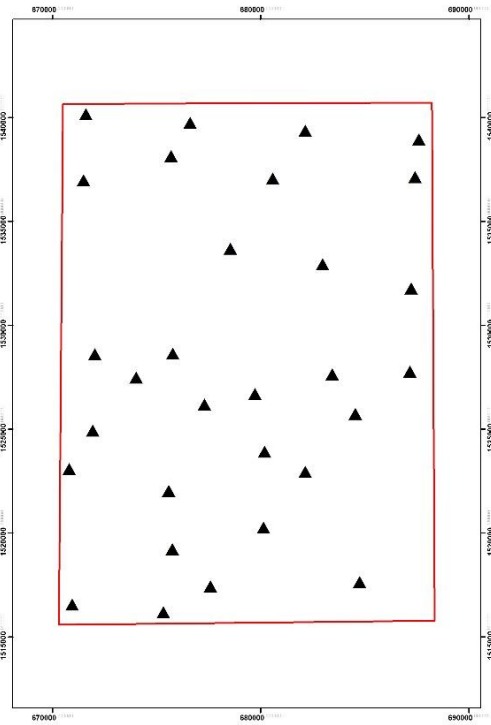
รูปที่ 33 ตำแหน่งจุดควบคุม 15 จุด



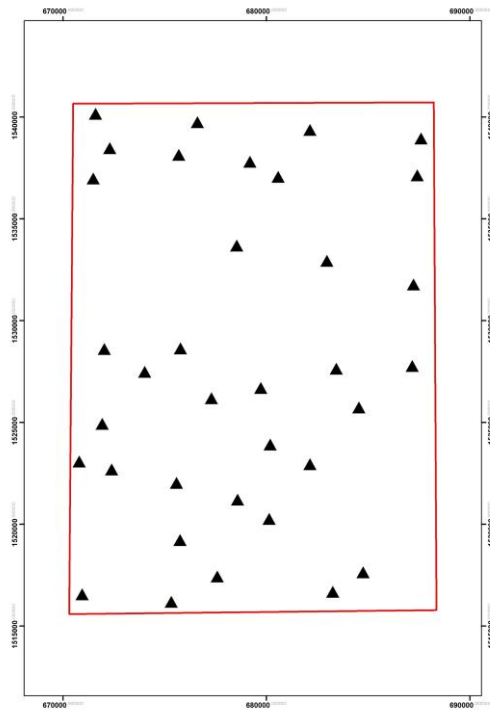
รูปที่ 32 ตำแหน่งจุดควบคุม 20 จุด



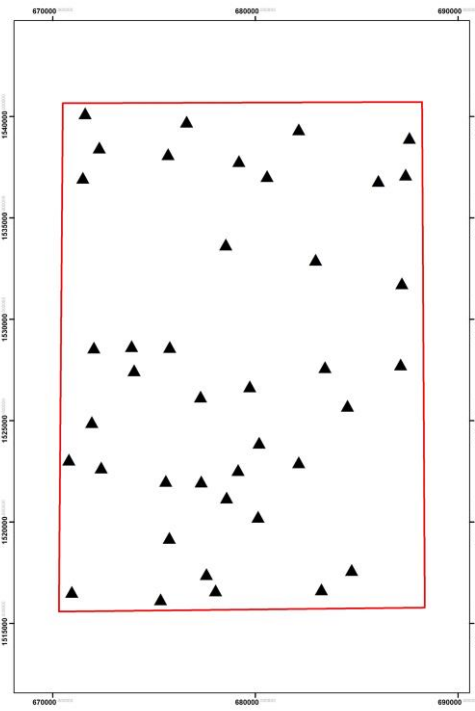
รูปที่ 34 ตำแหน่งจุดควบคุม 25 จุด



รูปที่ 35 ตำแหน่งจุดควบคุม 30 จุด



รูปที่ 36 ตำแหน่งจุดควบคุม 35 จุด



รูปที่ 37 ตำแหน่งจุดควบคุม 40 จุด

บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย

4.1 การตรวจสอบข้อมูล

4.1.1 จุดควบคุม

จุดควบคุมที่เลือกไว้ทั้ง 40 จุด จากจุดในข้อมูลไลดาร์ ทำการรังวัดถ่ายค่าระดับจากหมุดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพฯ ในบริเวณใกล้เคียงด้วยงานระดับ ทำการรังวัดถ่ายค่าระดับจากหมุดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพฯ ไปสู่จุดควบคุมจากจุดข้อมูลไลดาร์เป็นการรังวัดไป ทำการย้ายจุดตั้งกล้องและถ่ายค่าระดับจากจุดควบคุมจากจุดข้อมูลไลดาร์ไปสู่หมุดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพฯ เป็นการถ่ายค่าระดับกลับเพื่อทำการตรวจสอบข้อมูลผลจากสำรวจแสดงดังตารางที่ 4 คอลัมน์ PID คือหมายเลขจุดควบคุมจากข้อมูลไลดาร์ คอลัมน์ BMAID คือหมายเลขหมุดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพฯ ในบริเวณใกล้เคียงจุดควบคุมจากข้อมูลไลดาร์ที่ใช้เป็นหมุดอ้างอิงเพื่อถ่ายค่าระดับ คอลัมน์ BMAOH คือความสูงออร์โทเมตริกของหมุดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพฯ คอลัมน์ E และ N คือค่าพิกัดทางราบของจุดควบคุมจากข้อมูลไลดาร์บนระบบพิกัด UTM WGS84 คอลัมน์ Forward คือค่าต่างระดับจากหมุดควบคุมทางดิ่งไปสู่จุดควบคุมจากข้อมูลไลดาร์ที่รังวัดได้จากงานระดับ คอลัมน์ Backward คือค่าต่างระดับจากจุดควบคุมจากข้อมูลไลดาร์ไปสู่หมุดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพฯ ที่รังวัดได้จากงานระดับ คอลัมน์ diff แสดงความคลาดเคลื่อนบรรจบซึ่งคำนวณจากการทำระดับในขาไปในคอลัมน์ Forward และการทำระดับขากลับในคอลัมน์ Backward และคอลัมน์ MSL คือความสูงออร์โทเมตริกหรือความสูงที่อ้างอิงระดับน้ำทะเลปานกลางของจุดควบคุมจากข้อมูลไลดาร์ที่รังวัดได้จากงานระดับ จากตารางในคอลัมน์ diff จะแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนบรรจบของการทำระดับในแต่ละจุดควบคุมที่มีค่าอยู่ในระดับมิลลิเมตร จากค่าความคลาดเคลื่อนบรรจบที่น้อยมาก ทำให้สามารถนำค่าความสูงออร์โทเมตริกไปใช้เป็นค่าความสูงของจุดควบคุมในการคำนวณหาพื้นที่ผิวย่อยด้วยวิธีการประมาณค่าและวิธีการแปลงค่าด้วยแบบจำลองได้

PID	BMA	BMAOH	E	N	Forward	Backward	diff	MSL
002	3008	2.373	671597.209	1540165.156	-0.7310	0.7300	-0.0010	1.6425
003	3089	3.066	687597.216	1538949.651	-1.2250	1.2250	0.0000	1.8410
010	3080	1.547	687171.571	1527773.395	-0.5300	0.5300	0.0000	1.0170
015	4020	2.250	678029.691	1516638.587	-1.4830	1.4800	-0.0030	0.7685
020	2120	0.936	670788.239	1523092.320	-0.2040	0.2040	0.0000	0.7320
021	3085	3.444	687226.413	1531778.343	-1.4240	1.4230	-0.0010	2.0205
023	4088	2.799	684547.716	1525737.773	-1.6940	1.6920	-0.0020	1.1060
025	4019	3.929	683260.288	1516688.726	-0.1800	0.1780	-0.0020	3.7500
029	2098	3.070	675767.308	1528646.881	-0.7770	0.7760	-0.0010	2.2935
031	3046	3.298	678543.375	1533689.248	-1.5260	1.5250	-0.0010	1.7725
037	3014	4.940	671485.840	1536987.785	-2.0780	2.0790	0.0010	2.8615
043	3033	3.185	679183.320	1537804.797	-1.4570	1.4560	-0.0010	1.7285
044	3036	2.938	676607.017	1539753.859	-0.1900	0.1900	0.0000	2.7480
045	3041	2.497	682138.002	1539374.505	-0.7110	0.7110	0.0000	1.7860
047	3065	3.655	686063.354	1536829.850	-1.0250	1.0270	0.0020	2.6290
051	3072	2.981	683431.634	1527648.088	-1.0330	1.0300	-0.0030	1.9490
057	1086	1.180	670932.835	1516566.792	-0.5680	0.5650	-0.0030	0.6130
058	1109	1.582	675322.822	1516192.525	-0.8000	0.7990	-0.0010	0.7820
059	1110	1.802	675755.574	1519231.590	-1.3220	1.3250	0.0030	0.4785
061	2131	1.286	677327.209	1522006.127	-0.6440	0.6440	0.0000	0.6420
062	4074	2.580	680132.554	1520268.761	-2.2860	2.2840	-0.0020	0.2950
069	4123	1.200	679717.411	1526698.560	-0.4190	0.4190	0.0000	0.7810
072	4084	2.312	679146.906	1522574.522	-1.2550	1.2570	0.0020	1.0560
073	4116	2.215	680180.073	1523924.188	-1.3790	1.3780	-0.0010	0.8365
082	3090	3.435	687419.260	1537142.310	-0.0040	0.0050	0.0010	3.4305
083	2111	1.511	672032.420	1528611.450	-0.3420	0.3400	-0.0020	1.1700
084	2014	1.625	673892.001	1528682.659	-0.5940	0.5930	-0.0010	1.0315
085	2013	2.803	674016.060	1527486.840	-1.1900	1.1890	-0.0010	1.6135
086	2137	2.702	677297.420	1526192.990	-1.2650	1.2660	0.0010	1.4365
087	2121	2.061	672390.650	1522693.650	-0.9510	0.9510	0.0000	1.1100
091	1103	1.236	677583.910	1517440.970	-0.7710	0.7740	0.0030	0.4635
092	4029	2.252	684748.750	1517648.040	-1.3640	1.3640	0.0000	0.8880
097	3061	2.936	682969.960	1532942.610	-1.2760	1.2760	0.0000	1.6600
100	3043	2.993	680570.490	1537067.830	-0.5260	0.5240	-0.0020	2.4680
101	3029	3.960	675691.410	1538146.162	-0.0110	0.0090	-0.0020	3.9700
102	3016	2.914	672299.010	1538480.050	-1.5560	1.5550	-0.0010	1.3585
105	4083	2.830	682139.768	1522957.521	-1.6800	1.6790	-0.0010	1.1505
106	2129	2.423	675579.830	1522037.052	0.2130	-0.2130	0.0000	2.6360
107	4114	0.993	678582.671	1521213.227	-0.5000	0.4990	-0.0010	0.4935
108	2117	2.292	671921.042	1524943.194	-1.2050	1.2030	-0.0020	1.0880

ตารางที่ 4 ค่าพิกัดจุดควบคุม (หน่วยเมตร)

4.1.2 จุดตรวจสอบ

จุดตรวจสอบจำนวน 20 จุด จากข้อมูลไลดาร์จะทำการรังวัดด้วยวิธีเดียวกันกับจุดควบคุม มีการรังวัดตรวจสอบการรังวัดไปและกลับ ค่าพิกัดและค่าระดับที่ได้จากงานสนามได้ผลดังตารางที่ 5

CheckID	BMAID	BMAOH	E	N	FwHeight	BwHeight	diff	Check_MSL
013	3039	2.434	679514.835	1539641.709	-0.421	0.421	0.000	2.013
033	2107	2.447	674006.797	1529924.395	-0.620	0.622	0.002	1.826
039	2103	2.614	673977.798	1533605.280	-0.779	0.780	0.001	1.835
041	3031	3.653	677573.058	1537460.717	-1.284	1.283	-0.001	2.370
046	3058	2.996	684591.458	1535920.215	-1.497	1.497	0.000	1.499
048	3056	2.662	681815.994	1534630.532	-0.524	0.522	-0.002	2.139
052	2135	1.805	678107.644	1524581.903	-1.351	1.350	-0.001	0.455
054	2012	2.537	673687.253	1526188.822	-1.561	1.559	-0.002	0.977
060	1102	0.862	677465.733	1518939.777	-0.579	0.580	0.001	0.283
063	4076	2.799	681503.178	1517425.707	-0.247	0.252	0.005	2.550
065	4078	2.697	684733.847	1519896.773	-2.023	2.023	0.000	0.674
070	2140	2.057	678981.396	1528846.068	-0.721	0.723	0.002	1.335
078	4126	1.615	680670.664	1521259.857	-1.232	1.233	0.001	0.383
080	3087	3.448	687145.698	1533408.858	-0.825	0.825	0.000	2.623
095	3022	2.589	675297.780	1539428.780	-0.522	0.519	-0.003	2.069
098	3070	1.562	686127.060	1528072.530	-0.663	0.663	0.000	0.899
099	4076	2.799	682676.460	1519583.620	-2.382	2.373	-0.009	0.422
103	3042	2.173	680212.269	1537696.346	-0.485	0.483	-0.002	1.689
104	4087	2.139	683463.281	1525129.052	-0.373	0.372	-0.001	1.767
109	2118	2.599	672028.827	1524140.731	-1.439	1.438	-0.001	1.161

ตารางที่ 5 ค่าพิกัดจุดตรวจสอบ (หน่วยเมตร)

จากตารางที่ 5 คอลัมน์ diff แสดงความคลาดเคลื่อนบรรจบของการรังวัดขาไปในคอลัมน์ FwHeight และการทำระดับขากลับในคอลัมน์ BwHeight ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของการทำระดับในแต่ละจุดตรวจสอบที่มีค่าอยู่ในระดับมิลลิเมตร จากค่าความคลาดเคลื่อนบรรจบที่น้อยมาก ทำให้สามารถนำค่าความสูงออร์โทเมตริกไปใช้เป็นค่าความสูงของจุดตรวจสอบ เพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องความสูงออร์โทเมตริกที่แปลงได้จากวิธีการสร้างพื้นผิวย้อยดัดที่เลือกศึกษา

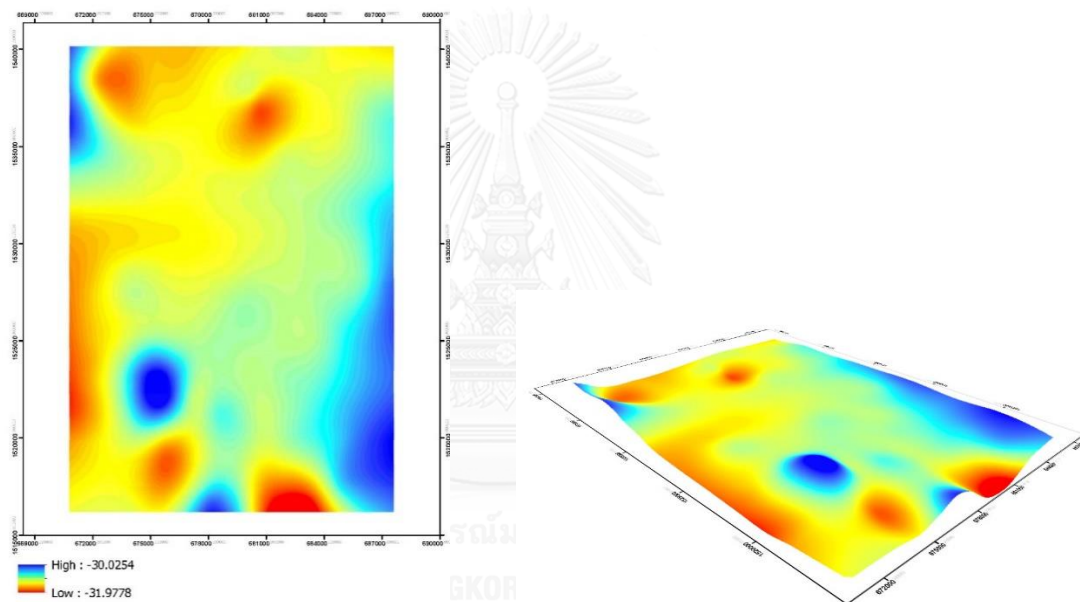
4.2 การแปลงความสูงด้วยวิธีการประมาณค่าภายในและการตรวจสอบ

จุดควบคุมทางดิ่งทั้ง 40 จุดเป็นจุดที่มีค่าความสูงที่อ้างอิงกับทรวงรี WGS84 และความสูงออร์โทเมตริก จากสมการความสัมพันธ์ $H = h + N$ โดย h คือความสูงทรวงรี H คือความสูงออร์โทเมตริก และ N คือความสูงย้อยดัด ทำให้สามารถคำนวณค่าความสูงย้อยดัดของจุดควบคุมทั้ง 40 จุดได้ดังตารางที่ 6

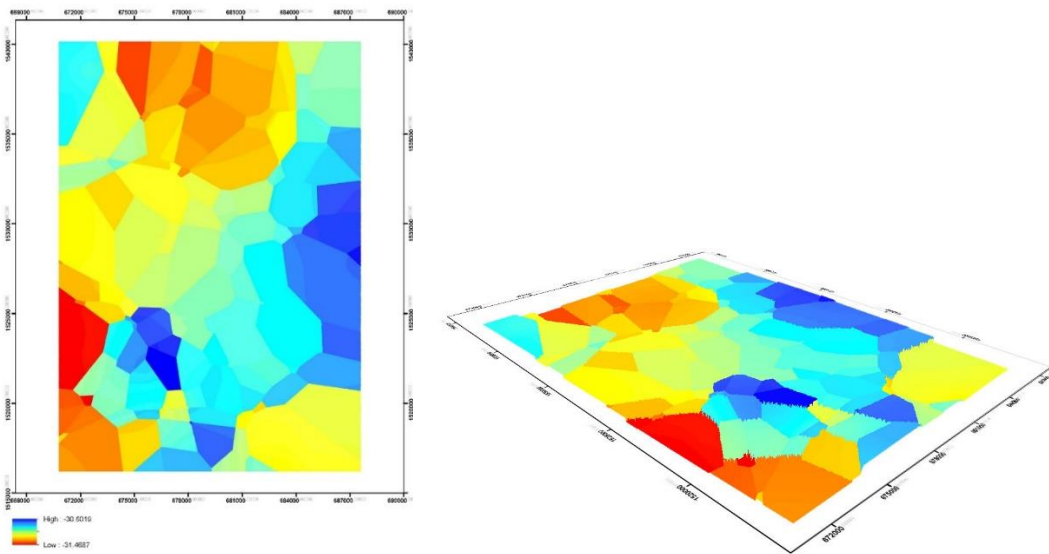
PID	E	N	EllH (h)	MSL (H)	N
002	671597.209	1540165.156	-29.026	1.643	-30.669
003	687597.216	1538949.651	-29.298	1.841	-31.139
010	687171.571	1527773.395	-29.466	1.017	-30.483
015	678029.691	1516638.587	-29.614	0.769	-30.383
020	670788.239	1523092.320	-30.890	0.732	-31.622
021	687226.413	1531778.343	-28.614	2.021	-30.635
023	684547.716	1525737.773	-29.705	1.106	-30.811
025	683260.288	1516688.726	-28.022	3.750	-31.772
029	675767.308	1528646.881	-28.859	2.294	-31.153
031	678543.375	1533689.248	-29.372	1.773	-31.145
037	671485.840	1536987.785	-27.741	2.862	-30.603
043	679183.320	1537804.797	-29.389	1.729	-31.118
044	676607.017	1539753.859	-28.621	2.748	-31.369
045	682138.002	1539374.505	-29.296	1.786	-31.082
047	686063.354	1536829.850	-28.311	2.629	-30.940
051	683431.634	1527648.088	-28.998	1.949	-30.947
057	670932.835	1516566.792	-30.549	0.613	-31.162
058	675322.822	1516192.525	-30.416	0.782	-31.198
059	675755.574	1519231.590	-31.053	0.479	-31.532
061	677327.209	1522006.127	-30.384	0.642	-31.026
062	680132.554	1520268.761	-30.636	0.295	-30.931
069	679717.411	1526698.560	-30.114	0.781	-30.895
072	679146.906	1522574.522	-29.854	1.056	-30.910
073	680180.073	1523924.188	-30.130	0.837	-30.967
082	687419.260	1537142.310	-27.406	3.431	-30.837
083	672032.420	1528611.450	-30.176	1.170	-31.346
084	673892.001	1528682.659	-30.072	1.032	-31.104
085	674016.060	1527486.840	-29.364	1.614	-30.978
086	677297.420	1526192.990	-29.595	1.437	-31.032
087	672390.650	1522693.650	-30.142	1.110	-31.252
091	677583.910	1517440.970	-30.412	0.464	-30.876
092	684748.750	1517648.040	-29.794	0.888	-30.682
097	682969.960	1532942.610	-29.335	1.660	-30.995
100	680570.490	1537067.830	-29.089	2.468	-31.557
101	675691.410	1538146.162	-27.339	3.970	-31.309
102	672299.010	1538480.050	-30.067	1.359	-31.426
105	682139.768	1522957.521	-29.736	1.151	-30.887
106	675579.830	1522037.052	-27.435	2.636	-30.071
107	678582.671	1521213.227	-30.271	0.494	-30.765
108	671921.042	1524943.194	-30.269	1.088	-31.357

ตารางที่ 6 ค่าความสูงย่อยของจุดควบคุม (หน่วยเมตร)

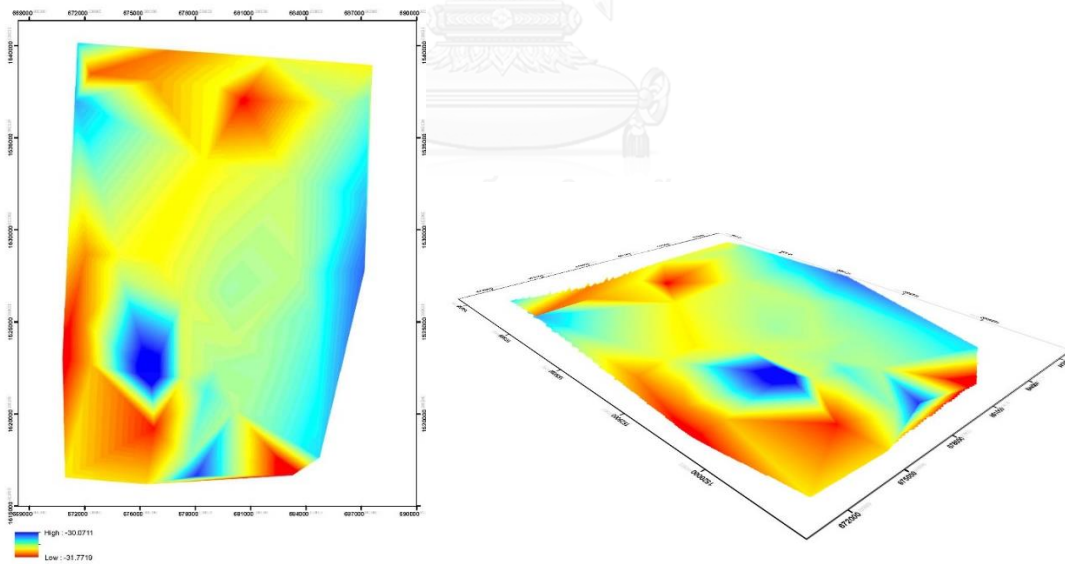
ค่าความสูงยี่ออยด์ที่ได้จะนำไปใช้คำนวณหาพื้นผิวความสูงยี่ออยด์ด้วยต่าง ๆ ดังนี้ วิธีการประมาณค่าภายในด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN, และ IDW โดยใช้โปรแกรม ArcGIS 10.3 กำหนดขนาดของพื้นผิวที่สร้างขึ้นให้มีความละเอียด 1x1 เมตร เพื่อให้ทุกๆจุดของข้อมูลไลดาร์มีค่าความสูงยี่ออยด์ เนื่องจากข้อมูลไลดาร์มีความละเอียดประมาณ 1 จุดต่อ 1.5 ตารางเมตร วิธีการสร้างพื้นผิวยี่ออยด์จากแบบจำลองโพลีโนเมียล และวิธีการสร้างพื้นผิวยี่ออยด์จากแบบจำลองนอนพาราเมตริกซึ่งจะให้โปรแกรม Table cruved 3D ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของแต่ละแบบจำลองและใช้สร้างพื้นผิวยี่ออยด์ ผลลัพธ์ของพื้นผิวยี่ออยด์ที่ได้ในแต่ละวิธีแสดงไว้ดังรูปที่ 38-41



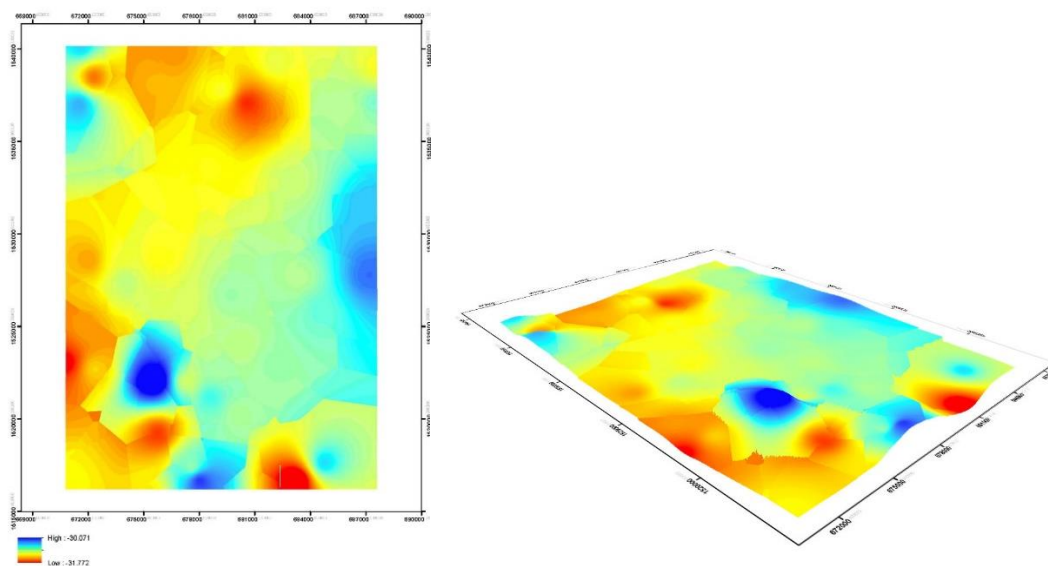
รูปที่ 38 พื้นผิวยี่ออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธี spline



รูปที่ 39 พื้นผิวย่อยดัดที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธี Kriging



รูปที่ 40 พื้นผิวย่อยดัดที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธี TIN



รูปที่ 41 พื้นผิวไฮออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธี IDW

4.2.1 พื้นผิวไฮออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าภายในแบบ Spline

ค่าต่างความสูงไฮออยด์ที่คำนวณได้ทั้ง 40 จุด จะนำมาสร้างพื้นผิวความสูงไฮออยด์ด้วยการประมาณค่าภายในแบบ Spline ซึ่งจะใช้จุดควบคุมมาหาเส้นโค้งที่เชื่อมต่อระหว่างจุด นำสมการเส้นโค้งที่ได้ไปใช้ในการประมาณค่าจุดที่ไม่ทราบค่า การสร้างพื้นผิวไฮออยด์ด้วยการประมาณค่าด้วยโปรแกรม ArcGIS จะใช้ฟังก์ชัน Spline มีการกำหนดรูปแบบการคำนวณแบบ Tension กำหนด Weight เท่ากับ 0.1 และกำหนดจำนวนจุดที่ใช้ในการหาสมการเส้นโค้ง (Point) เท่ากับ 3 จุด พื้นผิวความสูงไฮออยด์ที่สร้างได้ จะนำไปแปลงความสูงจุดตรวจสอบจากความสูงที่อ้างอิงทรงรี WGS84 ไปเป็นความสูงออร์โทเมตริก ทำการตรวจสอบด้วยความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับผลการแปลงความสูงและการตรวจสอบแสดงดังตารางที่ 7

PID	LidarEllH	SPGeoidH	OrHSP	MSL	diff	diff^2
013	-29.183	-31.108	1.925	2.013	0.088	0.0077
033	-29.451	-31.206	1.755	1.826	0.071	0.0051
039	-29.179	-30.979	1.800	1.835	0.034	0.0012
041	-28.851	-31.152	2.301	2.370	0.068	0.0046
046B	-29.630	-31.057	1.427	1.499	0.072	0.0053
048	-28.951	-31.320	2.369	2.139	-0.230	0.0531
052	-30.471	-31.001	0.530	0.455	-0.075	0.0057
054	-30.162	-30.966	0.804	0.977	0.173	0.0298
060	-30.886	-31.193	0.307	0.283	-0.025	0.0006
063	-29.011	-31.439	2.428	2.550	0.121	0.0147
065	-29.951	-30.458	0.507	0.674	0.167	0.0279
070	-29.799	-30.985	1.186	1.335	0.149	0.0222
078	-30.623	-30.937	0.314	0.383	0.069	0.0047
080	-28.152	-30.669	2.517	2.623	0.106	0.0112
095	-29.277	-31.433	2.156	2.069	-0.088	0.0077
098	-29.918	-30.626	0.708	0.899	0.191	0.0365
099	-30.456	-31.038	0.582	0.422	-0.161	0.0258
103	-29.452	-31.383	1.931	1.689	-0.242	0.0584
104	-29.190	-30.889	1.699	1.767	0.067	0.0045
109	-30.211	-31.334	1.123	1.161	0.038	0.0014
Avg/RMSE					0.0297	0.1281
S.D./LE95					0.1278	0.2510

ตารางที่ 7 ความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่แปลงความสูงด้วยวิธี Spline และการตรวจสอบ (หน่วยเมตร)

จากตาราง 7 คอลัมน์ PID คือหมายเลขจุดตรวจสอบ คอลัมน์ LidarEllH คือความสูงอ้างอิงทรงรี WGS84 ของจุดตรวจสอบ คอลัมน์ SPGeoidH คือความสูงพื้นผิวออยด์ของจุดตรวจสอบที่สร้างด้วยการประมาณค่าแบบ Spline คอลัมน์ OrHSP คือความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบ คำนวนได้จากนำความสูงทรงรีในคอลัมน์ LidarEllH ลบด้วยความสูงพื้นผิวออยด์ที่สร้างได้ในคอลัมน์ SPGeoidH คอลัมน์ MSL คือความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่ได้จากงานระดับ คอลัมน์ diff คือค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่แปลงได้และความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับ คอลัมน์ diff^2 คือค่าต่างความสูงในคอลัมน์ diff นำมายกกำลังสอง ค่าทางสถิติของค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงและงานระดับของจุดตรวจสอบทั้ง 20 จุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.03 เมตร มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.128 มีค่า Root Mean Square Error (RMSE) เท่ากับ 0.128 เมตร และมีค่าความถูกต้อง LE95 เท่ากับ 0.2510 เมตร ตามมาตรฐาน FGDC

ซึ่งคำนวณได้จาก นำค่า $RMSE \times 1.96 = LE95$ ค่าที่ได้เป็นค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ 95% ความเชื่อมั่น

4.2.2 พื้นผิวเยื่อยัดที่ได้จากการประมาณค่าภายในแบบ Kriging

ค่าต่างความสูงเยื่อยัดของจุดควบคุมทั้ง 40 จุด นำมาสร้างพื้นผิวความสูงเยื่อยัดด้วยการประมาณค่าภายในแบบ Kriging ด้วยฟังก์ชัน Kriging ในโปรแกรม ArcGIS 10.3 โดยใช้ Semivariogram แบบ Circle ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลลัพธ์ในการสร้างพื้นผิวเยื่อยัดได้ดีที่สุดจากแบบจำลอง Semivariogram ที่มีในฟังก์ชัน อ้างอิงจากงานวิจัยของ ดำริห์ ประสงค์กิจ (2555) ผลจากการสร้างพื้นผิวความสูงเยื่อยัดด้วยการประมาณค่าภายในแบบ Kriging พื้นผิวความสูงเยื่อยัดที่สร้างได้จะนำไปแปลงความสูงจุดตรวจสอบจากความสูงที่อ้างอิงทรงรี WGS84 ไปเป็นความสูงออร์โทเมตริก ทำการตรวจสอบด้วยความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับผลการแปลงความสูงและการตรวจสอบแสดงดังตารางที่ 8 คอลัมน์ PID คือหมายเลขจุดตรวจสอบ คอลัมน์ LidarELLH คือความสูงอ้างอิงทรงรี WGS84 ของจุดตรวจสอบ คอลัมน์ Kriging คือความสูงพื้นผิวเยื่อยัดของจุดตรวจสอบที่สร้างด้วยการประมาณค่าแบบ Kriging คอลัมน์ OrHKrig คือความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบ คำนวนได้จากนำความสูงทรงรีในคอลัมน์ LidarELLH ลบด้วยความสูงพื้นผิวเยื่อยัดที่สร้างได้ในคอลัมน์ Kriging คอลัมน์ MSL คือความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่ได้จากงานระดับ คอลัมน์ diff คือค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่แปลงได้และความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับ คอลัมน์ diff² คือค่าต่างความสูงในคอลัมน์ diff นำมายกกำลังสอง ค่าทางสถิติของค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงและงานระดับของจุดตรวจสอบทั้ง 20 จุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.007 เมตร มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.184 มีค่า Root Mean Square Error (RMSE) เท่ากับ 0.1794 เมตร และมีค่าความถูกต้อง LE95 เท่ากับ 0.3516 เมตร

PID	LidarEllH	Kriging	OrHKrig	MSL	diff	diff^2
013	-29.183	-31.247	2.064	2.013	-0.051	0.0026
033	-29.451	-31.200	1.749	1.826	0.078	0.0060
039	-29.179	-31.010	1.831	1.835	0.003	0.0000
041	-28.851	-31.262	2.411	2.370	-0.041	0.0017
046	-29.630	-30.925	1.295	1.499	0.204	0.0415
048	-28.951	-31.230	2.279	2.139	-0.140	0.0195
052	-30.471	-30.971	0.500	0.455	-0.045	0.0020
054	-30.162	-31.147	0.985	0.977	-0.008	0.0001
060	-30.886	-30.943	0.057	0.283	0.225	0.0508
063	-29.011	-31.139	2.128	2.550	0.421	0.1773
065	-29.951	-31.100	1.149	0.674	-0.475	0.2253
070	-29.799	-31.024	1.225	1.335	0.110	0.0121
078	-30.623	-30.870	0.247	0.383	0.135	0.0183
080	-28.152	-30.793	2.641	2.623	-0.018	0.0003
095	-29.277	-31.367	2.090	2.069	-0.021	0.0005
098	-29.918	-30.736	0.818	0.899	0.081	0.0065
099	-30.456	-31.120	0.664	0.422	-0.243	0.0588
103	-29.452	-31.257	1.805	1.689	-0.116	0.0134
104	-29.190	-30.880	1.690	1.767	0.076	0.0058
109	-30.211	-31.409	1.198	1.161	-0.037	0.0014
Avg/RMSE					0.007	0.1794
S.D./LE95					0.184	0.3516

ตารางที่ 8 ความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่แปลงความสูงด้วยวิธี Kriging และการตรวจสอบ (หน่วยเมตร)

4.2.3 การสร้างพื้นผิวย่อยด้วยการประมาณค่าภายในแบบ TIN

ค่าต่างความสูงย่อยของจุดควบคุมทั้ง 40 จุด นำมาใช้สร้างพื้นผิวย่อยด้วยการประมาณค่าแบบ TIN ด้วยฟังก์ชัน Create TIN ในโปรแกรม ArcGIS 10.3 โดยใช้ค่าต่างความสูงย่อยและค่าพิกัดของจุดตรวจสอบเป็นข้อมูลในการสร้างพื้นผิว การสร้างพื้นผิวจะกำหนดรูปแบบ TIN ตามเงื่อนไขของ Delauney พื้นผิวความสูงย่อยที่สร้างได้ จะนำไปแปลงความสูงจุดตรวจสอบจากความสูงที่อ้างอิงทรงรี WGS84 ไปเป็นความสูงออร์โทเมตริก ทำการตรวจสอบด้วยความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับผลการแปลงความสูงและการตรวจสอบแสดงดังตารางที่ 9

PID	LidarELLH	GeoidTIN	OrHTIN	MSL	diff	diff^2
013	-29.183	-30.9890	1.806	2.013	0.207	0.0428
033	-29.451	-31.0553	1.604	1.826	0.222	0.0492
039	-29.179	-30.8916	1.713	1.835	0.122	0.0149
041	-28.851	-31.2048	2.354	2.370	0.016	0.0002
046	-29.630	-31.0345	1.405	1.499	0.094	0.0089
048	-28.951	-31.2270	2.276	2.139	-0.137	0.0188
052	-30.471	-30.9783	0.507	0.455	-0.053	0.0028
054	-30.162	-30.9608	0.799	0.977	0.178	0.0318
060	-30.886	-30.9899	0.104	0.283	0.179	0.0319
063	-29.011	-31.3031	2.292	2.550	0.257	0.0663
065	-29.951	-30.7123	0.761	0.674	-0.087	0.0076
070	-29.799	-30.9911	1.192	1.335	0.143	0.0204
078	-30.623	-30.9159	0.293	0.383	0.090	0.0080
080	-28.152	-30.7078	2.556	2.623	0.067	0.0045
095	-29.277	-31.3611	2.084	2.069	-0.016	0.0002
098	-29.918	-30.6258	0.708	0.899	0.191	0.0366
099	-30.456	-30.8064	0.350	0.422	0.071	0.0051
103	-29.452	-31.3079	1.856	1.689	-0.167	0.0279
104	-29.190	-30.8487	1.659	1.767	0.108	0.0116
109	-30.211	-31.3334	1.122	1.161	0.038	0.0015
Avg/RMSE					0.076	0.1398
S.D./LE 95					0.120	0.2740

ตารางที่ 9 ความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่แปลงความสูงด้วยวิธี TIN และการตรวจสอบ (หน่วยเมตร)

จากตาราง 9 คอลัมน์ PID คือหมายเลขจุดตรวจสอบ คอลัมน์ LidarELLH คือความสูงอ้างอิงทรงรี WGS84 ของจุดตรวจสอบ คอลัมน์ GeoidTIN คือความสูงพื้นผิวย่อยของจุดตรวจสอบที่สร้างด้วยการประมาณค่าแบบ TIN คอลัมน์ OrHTIN คือความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบ คำนวนได้จากนำความสูงทรงรีในคอลัมน์ LidarELLH ลบด้วยความสูงพื้นผิวย่อยที่สร้างได้ในคอลัมน์ GeoidTIN คอลัมน์ MSL คือความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่ได้จากงานระดับ คอลัมน์ diff คือค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่แปลงได้และความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับ คอลัมน์ diff^2 คือค่าต่างความสูงในคอลัมน์ diff นำมายกกำลังสอง ค่าทางสถิติของค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงและงานระดับของจุดตรวจสอบทั้ง 20 จุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.063 เมตร มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.119 มีค่า Root Mean Square Error (RMSE) เท่ากับ 0.1324 เมตร และมีค่าความถูกต้อง LE95 เท่ากับ 0.2595 เมตร

4.2.4 การสร้างพื้นผิวย้อยอดด้วยการประมาณค่าภายในแบบ IDW

ค่าต่างความสูงย้อยอดและค่าพิกัดของจุดควบคุมทั้ง 40 จุด จะนำมาใช้คำนวณพื้นผิวความสูงย้อยอดด้วยการประมาณค่าแบบ IDW ด้วยฟังก์ชัน IDW ในโปรแกรม ArcGIS 10.3 กำหนดค่าการประมวลผลพารามิเตอร์ Power = 2 และใช้จุดรอบข้างจำนวน 3 จุดมาคำนวณพื้นผิว ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นค่าที่ให้พื้นผิวความสูงย้อยอดที่มีความถูกต้องดีที่สุดในวิธี IDW อ้างอิงจากงานวิจัยของดำรงห์ ประุ่งแต่งกิจ (2555) พื้นผิวความสูงย้อยอดที่สร้างได้ จะนำไปแปลงความสูงจุดตรวจสอบจากความสูงที่อ้างอิงทรงรี WGS84 ไปเป็นความสูงออร์โทเมตริก ทำการตรวจสอบด้วยความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับผลการแปลงความสูงและการตรวจสอบแสดงดังตารางที่ 10

PID	LidarELLH	GeoidIDW	OrHIDW	MSL	diff	diff^2	
013	-29.183	-31.210	2.027	2.013	-0.014	0.0002	
033	-29.451	-31.155	1.704	1.826	0.122	0.0148	
039	-29.179	-30.983	1.804	1.835	0.030	0.0009	
041	-28.851	-31.231	2.380	2.370	-0.010	0.0001	
046	-29.630	-30.928	1.298	1.499	0.201	0.0403	
048	-28.951	-31.187	2.236	2.139	-0.097	0.0093	
052	-30.471	-30.979	0.508	0.455	-0.053	0.0029	
054	-30.162	-31.086	0.924	0.977	0.053	0.0028	
060	-30.886	-31.012	0.126	0.283	0.156	0.0245	
063	-29.011	-31.374	2.363	2.550	0.187	0.0350	
065	-29.951	-30.977	1.026	0.674	-0.352	0.1236	
070	-29.799	-30.994	1.195	1.335	0.140	0.0197	
078	-30.623	-30.897	0.274	0.383	0.109	0.0118	
080	-28.152	-30.707	2.555	2.623	0.068	0.0046	
095	-29.277	-31.346	2.069	2.069	-0.001	0.0000	
098	-29.918	-30.577	0.659	0.899	0.240	0.0578	
099	-30.456	-31.102	0.646	0.422	-0.224	0.0503	
103	-29.452	-31.396	1.944	1.689	-0.255	0.0649	
104	-29.190	-30.846	1.656	1.767	0.111	0.0123	
109	-30.211	-31.380	1.169	1.161	-0.008	0.0001	
					Avg/RMSE	0.020	0.1542
					S.D./LE 95	0.157	0.3023

ตารางที่ 10 ความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่แปลงความสูงด้วยวิธี IDW และการตรวจสอบ (หน่วยเมตร)

จากตาราง 10 คอลัมน์ PID คือหมายเลขจุดตรวจสอบ คอลัมน์ LidarEllH คือความสูงอ้างอิงทรงรี WGS84 ของจุดตรวจสอบ คอลัมน์ GeoidIDW คือความสูงพื้นผิวย่อยยัดของจุดตรวจสอบที่สร้างด้วยการประมาณค่าแบบ TIN คอลัมน์ OrHIDW คือความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบ คำนวนได้จากนำความสูงทรงรีในคอลัมน์ LidarEllH ลบด้วยความสูงพื้นผิวย่อยยัดที่สร้างได้ในคอลัมน์ GeoidIDW คอลัมน์ MSL คือความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่ได้จากงานระดับ คอลัมน์ diff คือค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่แปลงได้และความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับ คอลัมน์ diff^2 คือค่าต่างความสูงในคอลัมน์ diff นำมายกกำลังสอง ค่าทางสถิติของค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงและงานระดับของจุดตรวจสอบทั้ง 20 จุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.02 เมตร มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.157 มีค่า Root Mean Square Error (RMSE) เท่ากับ 0.1542 เมตร และมีค่าความถูกต้อง LE95 เท่ากับ 0.3023 เมตร

4.3 การแปลงความสูงด้วยวิธีการแปลงค่าด้วยแบบจำลองและการตรวจสอบ

4.3.1 การแปลงความสูงด้วยแบบจำลองโพลีโนเมียล

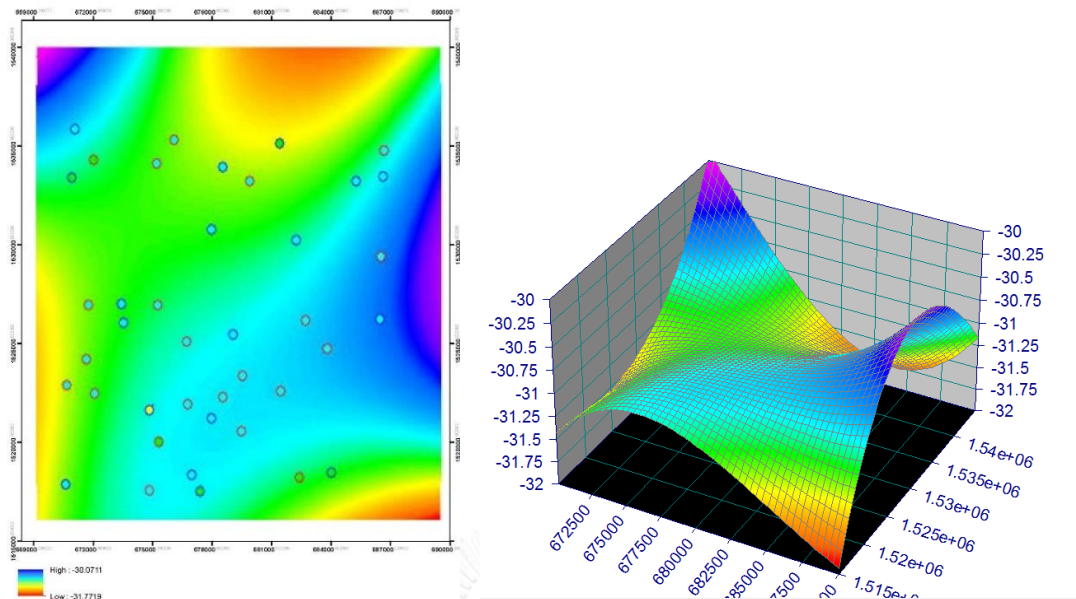
ค่าความสูงย่อยยัดที่คำนวณได้ของจุดควบคุมทั้ง 40 จุด จะนำมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 10 ตัวของแบบจำลองโพลีโนเมียล จุดควบคุมทั้ง 40 จุดสามารถสร้างสมการได้จำนวน 40 สมการ ใช้วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อแก้สมการหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 10 ตัว ด้วยโปรแกรม TableCurve 3D version 4.0.0.1 ผลจากการคำนวณได้ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 10 ตัว ดังนี้

$$z = a + \frac{b}{x} + \frac{c}{y} + \frac{d}{x^2} + \frac{e}{y^2} + \frac{f}{xy} + \frac{g}{x^3} + \frac{h}{y^3} + \frac{i}{xy^2} + \frac{j}{x^2y}$$

$$a = 31729.9327, b = -2.4953e^{11}, c = 4.102e^{11}, d = 3.42103e^{17}, e = 2.55576e^{17}$$

$$f = -7.7681e^{17}, g = -3.709e^{22}, h = -1.0387e^{24}, i = 1.20595e^{24}, j = -2.7232e^{23}$$

โดยผลลัพธ์จากการแก้สมการมีค่า r^2 เท่ากับ 0.3531 ซึ่งมีค่าไม่สูงมาก ดังนั้นพารามิเตอร์มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ใช้คำนวณน้อยและให้ผลลัพธ์ในการตรวจสอบด้วยจุดตรวจสอบที่ได้มีความถูกต้องต่ำ เมื่อนำพารามิเตอร์ที่ได้มาสร้างพื้นผิวย่อยยัดจะได้ผลดังรูปที่ 42



รูปที่ 42 พื้นผิวความสูงย้อยออกจากแบบจำลองโพลีโนเมียล

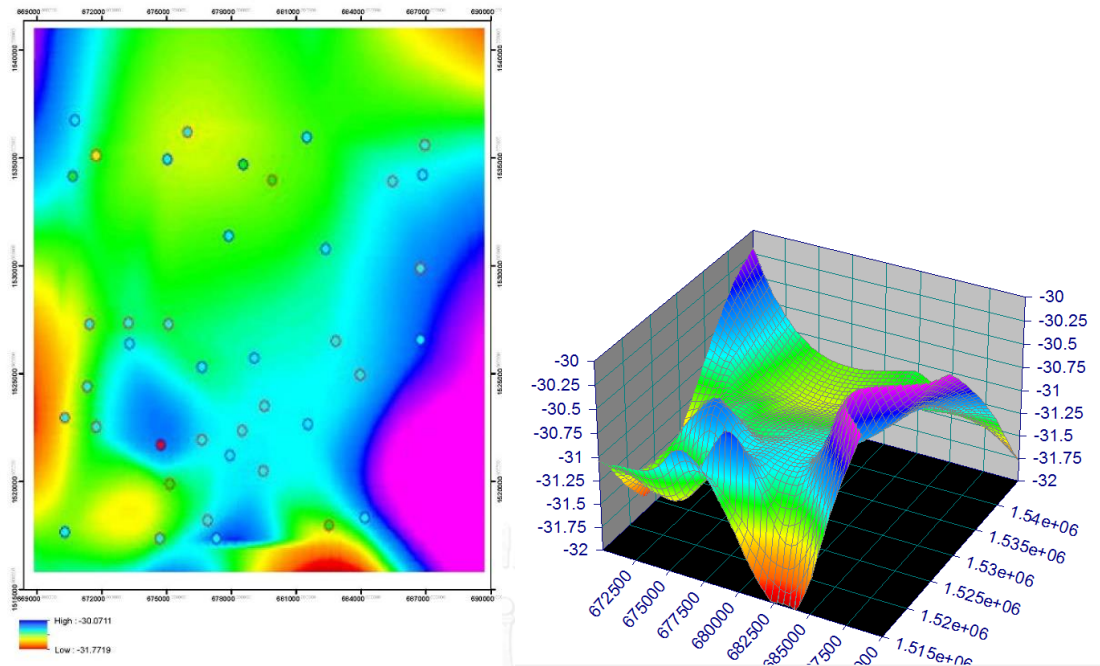
เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 10 ตัวไปคำนวณค่าความสูงย้อยอดที่จุดตรวจสอบเพื่อนำความสูงย้อยอดที่ได้ไปแปลงความสูงทงรี WGS84 ไปเป็นความสูงออร์โทเมตริก ผลค่าความสูงย้อยอด ความสูงออร์โทเมตริกที่ได้แสดงดังตารางที่ 11 คอลัมน์ PID คือหมายเลขจุดตรวจสอบ คอลัมน์ LidarEllH คือค่าความสูงที่อ้างอิงทงรี WGS84 คอลัมน์ GeoidTrans คือค่าความสูงย้อยอดที่คำนวณได้จากค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองโพลีโนเมียล คอลัมน์ OrHTrans คือค่าความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงซึ่งคำนวณได้จากคอลัมน์ LidarEllH ลบด้วยคอลัมน์ GeoidTrans คอลัมน์ MSL คือค่าความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับ คอลัมน์ diff คือค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงและงานระดับ คอลัมน์ diff² คือค่าในคอลัมน์ diff นำมายกกำลังสอง ค่าทางสถิติของค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงและงานระดับของจุดตรวจสอบทั้ง 20 จุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.048 เมตร มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.194 มีค่า Root Mean Square Error (RMSE) เท่ากับ 0.195 เมตร และมีค่าความถูกต้อง LE95 เท่ากับ 0.3822 เมตร

PID	LidarEllH	GeoidTrans	OrHTrans	MSL	diff	diff^2
013	-29.183	-31.383	2.200	2.013	-0.187	0.0350
033	-29.451	-31.165	1.714	1.826	0.112	0.0125
039	-29.179	-31.170	1.991	1.835	-0.156	0.0244
041	-28.851	-31.256	2.405	2.370	-0.036	0.0013
046	-29.630	-31.086	1.456	1.499	0.043	0.0019
048	-28.951	-31.155	2.204	2.139	-0.065	0.0042
052	-30.471	-30.914	0.443	0.455	0.011	0.0001
054	-30.162	-31.141	0.979	0.977	-0.002	0.0000
060	-30.886	-30.887	0.001	0.283	0.281	0.0790
063	-29.011	-31.018	2.007	2.550	0.543	0.2946
065	-29.951	-30.967	1.016	0.674	-0.342	0.1168
070	-29.799	-30.997	1.198	1.335	0.137	0.0189
078	-30.623	-30.866	0.243	0.383	0.139	0.0194
080	-28.152	-30.685	2.533	2.623	0.090	0.0081
095	-29.277	-31.136	1.859	2.069	0.209	0.0439
098	-29.918	-30.656	0.738	0.899	0.161	0.0260
099	-30.456	-30.943	0.487	0.422	-0.066	0.0043
103	-29.452	-31.323	1.871	1.689	-0.182	0.0331
104	-29.190	-30.799	1.609	1.767	0.158	0.0248
109	-30.211	-31.261	1.050	1.161	0.110	0.0122
Avg/RMSE					0.048	0.1950
S.D./LE 95					0.194	0.3822

ตารางที่ 11 แสดงค่าความสูงย็อยด์ ความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงด้วยแบบจำลองโพลีโนเมียล (หน่วยเมตร)

4.3.2 การแปลงความสูงด้วยแบบจำลองนอนพาราเมตริกด้วยวิธี Loess

ความสูงย็อยด์ของจุดควบคุมทั้ง 40 จุด จะนำมาใช้ในการคำนวณพื้นผิวความสูงย็อยด์ด้วยแบบจำลองนอนพาราเมตริกด้วยวิธี Loess โดยใช้โปรแกรม TableCurve 3D vesion 4.0.0.1 ผลจากการสร้างพื้นผิวย็อยด์แสดงดังรูปที่ 43 พื้นผิวความสูงย็อยด์ที่ได้จะนำไปแปลงความสูงของจุดตรวจสอบจากทรีจี WGS84 ไปสู่ความสูงออร์โทเมตริก ทำการเปรียบเทียบกับความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่ได้จากงานระดับ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 12



รูปที่ 43 พื้นผิวความสูงย้อยออกจากแบบนอนพาราเมตริก ด้วยวิธี Loess

ตารางที่ 12 คอลัมน์ PID คือหมายเลขจุดตรวจสอบ คอลัมน์ LidarELLH คือค่าความสูงที่อ้างอิงทรงรี WGS84 คอลัมน์ GeoidLoess คือค่าความสูงย้อยดัดที่คำนวณได้จากพื้นผิวความสูงย้อยดัดที่สร้างจากแบบจำลองนอนพาราเมตริกด้วยวิธี Loess คอลัมน์ OrHLoess คือค่าความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงซึ่งคำนวณได้จากคอลัมน์ LidarELLH ลบด้วยคอลัมน์ GeoidTrans คอลัมน์ MSL คือค่าความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับ คอลัมน์ diff คือค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงและงานระดับ คอลัมน์ diff^2 คือค่าในคอลัมน์ diff นำมายกกำลังสอง ค่าทางสถิติของค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงและงานระดับของจุดตรวจสอบทั้ง 20 จุดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.070 เมตร มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.140 มีค่า Root Mean Square Error (RMSE) เท่ากับ 0.1535 เมตร และมีค่าความถูกต้อง LE95 เท่ากับ 0.3009 เมตร

PID	LidarELLH	GeoidLoess	OrHLoess	MSL	diff	diff^2
013	-29.183	-31.285	2.102	2.013	-0.089	0.0079
033	-29.451	-31.063	1.612	1.826	0.214	0.0458
039	-29.179	-31.144	1.965	1.835	-0.131	0.0171
041	-28.851	-31.326	2.475	2.370	-0.106	0.0112
046	-29.630	-30.975	1.345	1.499	0.154	0.0237
048	-28.951	-31.165	2.214	2.139	-0.075	0.0056
052	-30.471	-30.967	0.496	0.455	-0.042	0.0018
054	-30.162	-30.930	0.768	0.977	0.209	0.0438
060	-30.886	-31.014	0.128	0.283	0.155	0.0240
063	-29.011	-31.208	2.197	2.550	0.353	0.1244
065	-29.951	-30.365	0.414	0.674	0.260	0.0677
070	-29.799	-31.030	1.231	1.335	0.104	0.0108
078	-30.623	-30.911	0.288	0.383	0.094	0.0089
080	-28.152	-30.694	2.542	2.623	0.081	0.0065
095	-29.277	-31.290	2.013	2.069	0.056	0.0031
098	-29.918	-30.667	0.749	0.899	0.150	0.0226
099	-30.456	-30.951	0.495	0.422	-0.074	0.0054
103	-29.452	-31.273	1.821	1.689	-0.132	0.0174
104	-29.190	-30.878	1.688	1.767	0.079	0.0062
109	-30.211	-31.239	1.028	1.161	0.133	0.0176
Avg/RMSE					0.070	0.1535
S.D./LE 95					0.140	0.3009

ตารางที่ 12 แสดงค่าความสูงย้อยยด์ ความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงด้วยวิธีนอนพาราเมตริกแบบ Loess (หน่วยเมตร)

4.4 การแปลงความสูงด้วยย้อยยด์สากล EGM96 และ EMG2008 และการตรวจสอบ

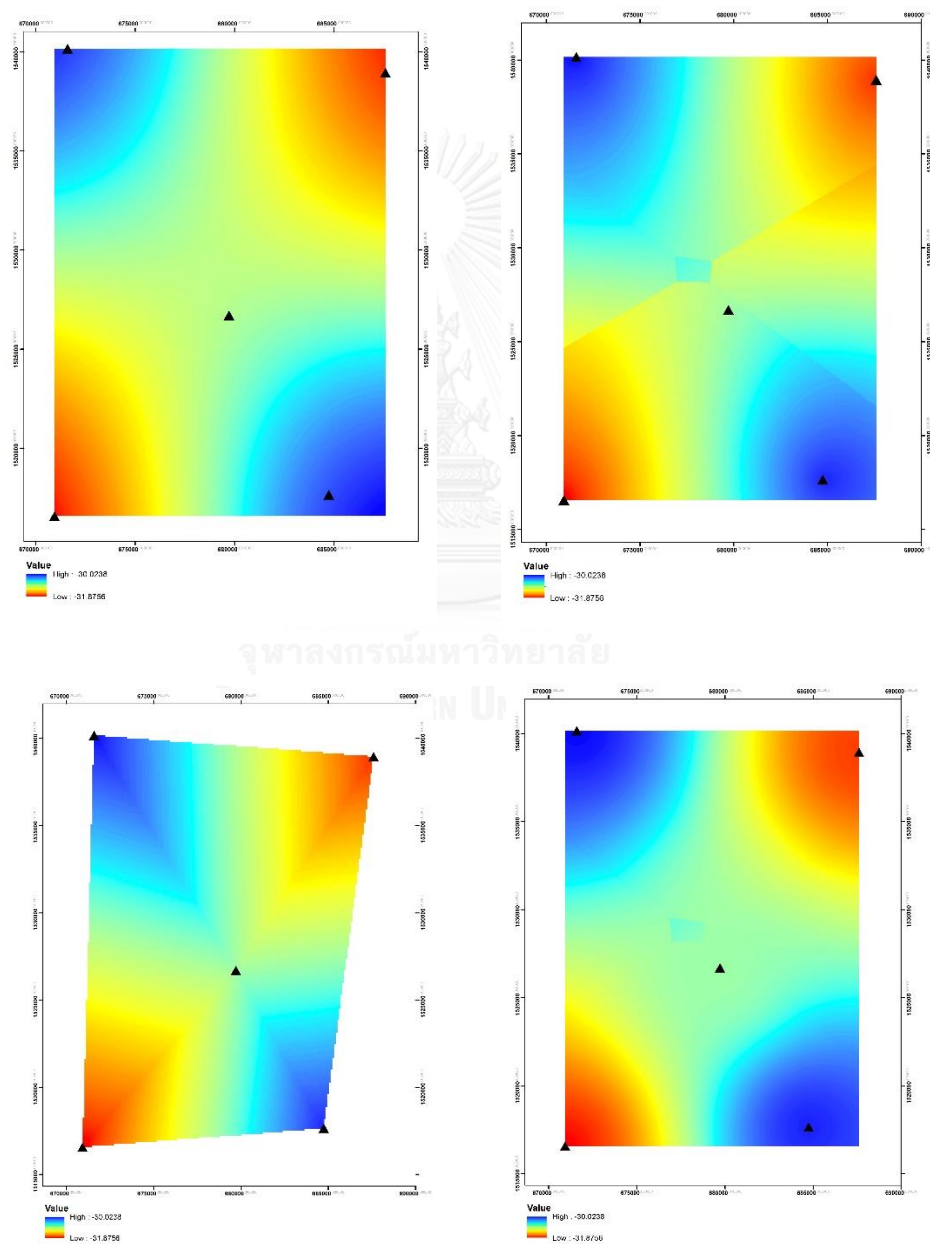
แบบจำลองความสูงย้อยยด์ EGM96 และ EGM2008 เป็นแบบจำลองย้อยยด์สากลครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลก เป็นแบบจำลองความสูงต่างระหว่างย้อยยด์และทรวงรีอ้างอิง WGS84 การคำนวณค่าความสูงย้อยยด์ของจุดตรวจสอบด้วยแบบจำลอง EGM96 และ EGM2008 จะใช้ค่าพารามิเตอร์และโปรแกรมจากเว็บไซต์ <http://earth-info.nga.mil> ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์และโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณความสูงย้อยยด์ทั้งสองแบบจำลอง ในขั้นตอนการคำนวณจะใช้ค่าพิกัดของจุดควบคุมที่ต้องการทราบความสูงย้อยยด์เพื่อความสูงย้อยยด์ ความสูงที่ได้จะนำไปใช้ในการแปลงความสูงจุดควบคุมจากทรวงรี WGS84 ไปสู่ความสูงออร์โทเมตริก ความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับเพื่อทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลค่าความสูงย้อยยด์ ผลการแปลงและการตรวจสอบแสดงในตารางที่ 13 คอลัมน์ PID คือหมายเลขจุดตรวจสอบ คอลัมน์ LidarELLH คือค่าความสูงที่อ้างอิงทรวงรี WGS84 คอลัมน์ EGM96 และ EGM2008 เป็นผลการแปลงและการตรวจสอบโดยมีคอลัมน์ย่อยคือ คอลัมน์ GeoidH คือค่าความสูงย้อยยด์ที่

คำนวณได้จากแบบจำลองย็อยด์สากล EGM96 และ EMG2008 คอลัมน์ OrH คือค่าความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงซึ่งคำนวณได้จากคอลัมน์ LidarELLH ลบด้วยคอลัมน์ GeoidH คอลัมน์ MSL คือค่าความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับ คอลัมน์ diff คือค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงและงานระดับ คอลัมน์ diff^2 คือค่าในคอลัมน์ diff นำมายกกำลังสอง ค่าทางสถิติของค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงและงานระดับของจุดตรวจสอบทั้ง 20 จุดด้วยแบบจำลองย็อยด์สากล EGM96 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -0.057 เมตร มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.180 มีค่า Root Mean Square Error (RMSE) เท่ากับ 0.1846 เมตร และมีค่าความถูกต้อง LE95 เท่ากับ 0.3618 เมตร และ ค่าทางสถิติของค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลงและงานระดับของจุดตรวจสอบทั้ง 20 จุดด้วยแบบจำลองย็อยด์สากล EGM2008 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.059 เมตร มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.192 มีค่า Root Mean Square Error (RMSE) เท่ากับ 0.1961 เมตร และมีค่าความถูกต้อง LE95 เท่ากับ 0.3844 เมตร

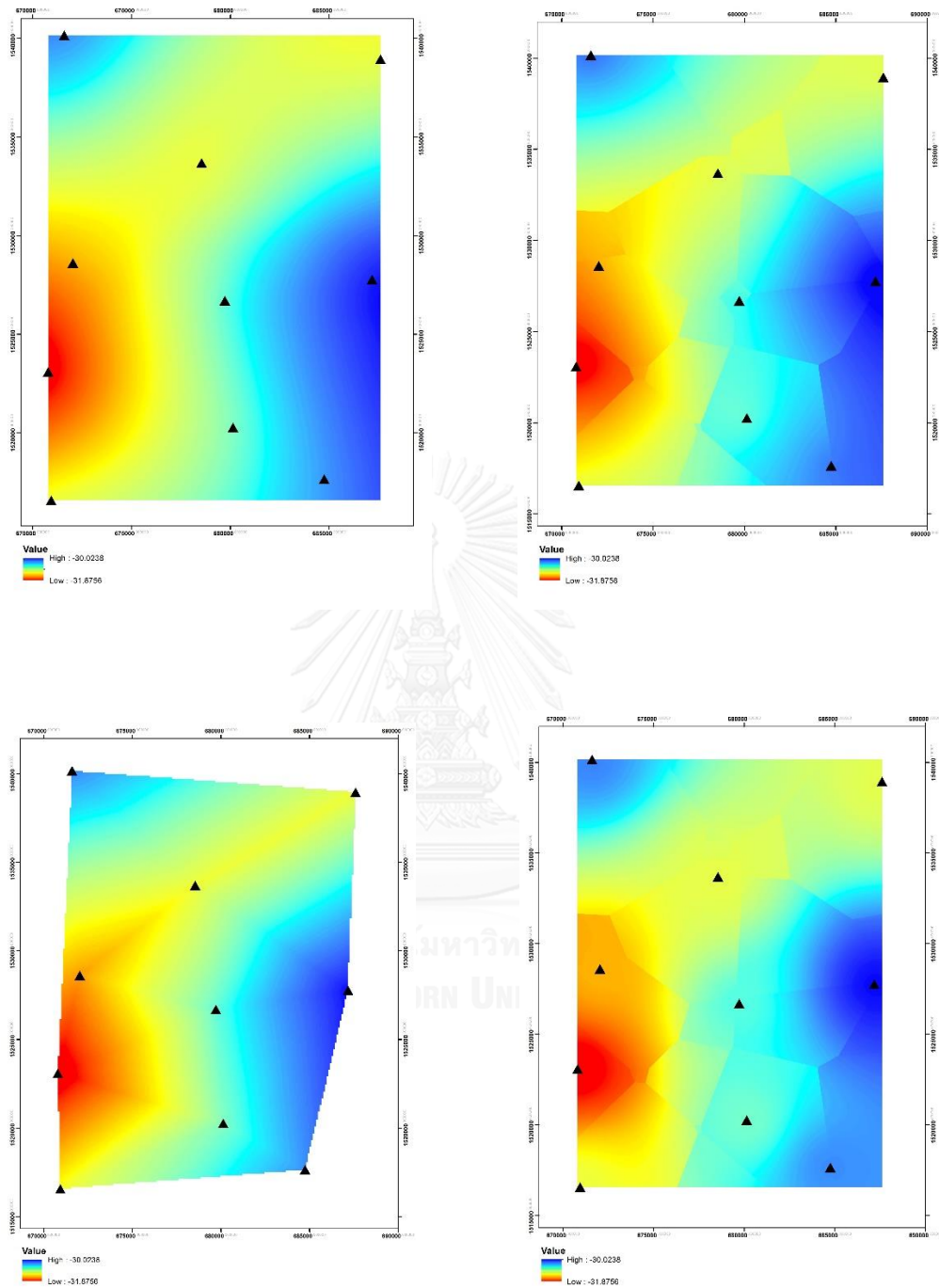
PID	MSL	LidarELLH	EGM96				EGM2008			
			GeoidH	OrH	diff	diff^2	GeoidH	OrH	diff	diff^2
013	2.013	-29.183	-31.223	2.040	-0.027	0.0007	-31.155	1.972	0.041	0.0017
033	1.826	-29.451	-31.321	1.870	-0.044	0.0019	-31.243	1.792	0.034	0.0012
039	1.835	-29.179	-31.349	2.170	-0.335	0.1126	-31.285	2.106	-0.272	0.0737
041	2.370	-28.851	-31.271	2.420	-0.051	0.0026	-31.204	2.353	0.016	0.0003
046	1.499	-29.630	-31.040	1.410	0.089	0.0079	-30.940	1.310	0.189	0.0357
048	2.139	-28.951	-31.121	2.170	-0.031	0.0010	-31.030	2.079	0.060	0.0036
052	0.455	-30.471	-31.161	0.690	-0.236	0.0555	-31.043	0.572	-0.117	0.0138
054	0.977	-30.162	-31.312	1.150	-0.173	0.0299	-31.208	1.046	-0.069	0.0048
060	0.283	-30.886	-31.146	0.260	0.022	0.0005	-30.986	0.100	0.182	0.0333
063	2.550	-29.011	-31.011	2.000	0.550	0.3020	-30.829	1.818	0.731	0.5351
065	0.674	-29.951	-30.931	0.980	-0.306	0.0936	-30.748	0.797	-0.123	0.0151
070	1.335	-29.799	-31.169	1.370	-0.035	0.0012	-31.068	1.269	0.066	0.0044
078	0.383	-30.623	-31.063	0.440	-0.058	0.0033	-30.909	0.286	0.097	0.0093
080	2.623	-28.152	-30.952	2.800	-0.177	0.0313	-30.821	2.669	-0.046	0.0021
095	2.069	-29.277	-31.347	2.070	-0.002	0.0000	-31.296	2.019	0.050	0.0025
098	0.899	-29.918	-30.948	1.030	-0.131	0.0172	-30.801	0.883	0.016	0.0003
099	0.422	-30.456	-30.996	0.540	-0.118	0.0140	-30.816	0.360	0.062	0.0038
103	1.689	-29.452	-31.192	1.740	-0.051	0.0026	-31.115	1.663	0.026	0.0007
104	1.767	-29.190	-31.010	1.820	-0.054	0.0029	-30.862	1.672	0.095	0.0089
109	1.161	-30.211	-31.341	1.130	0.031	0.0009	-31.233	1.022	0.138	0.0192
Avg/RMSE					-0.057	0.1846				
S.D./LE 95					0.180	0.3618				
									0.059	0.1961
									0.192	0.3844

4.5 ผลการตรวจสอบผลของจำนวนและตำแหน่งต่อความถูกต้องของการแปลงความสูง

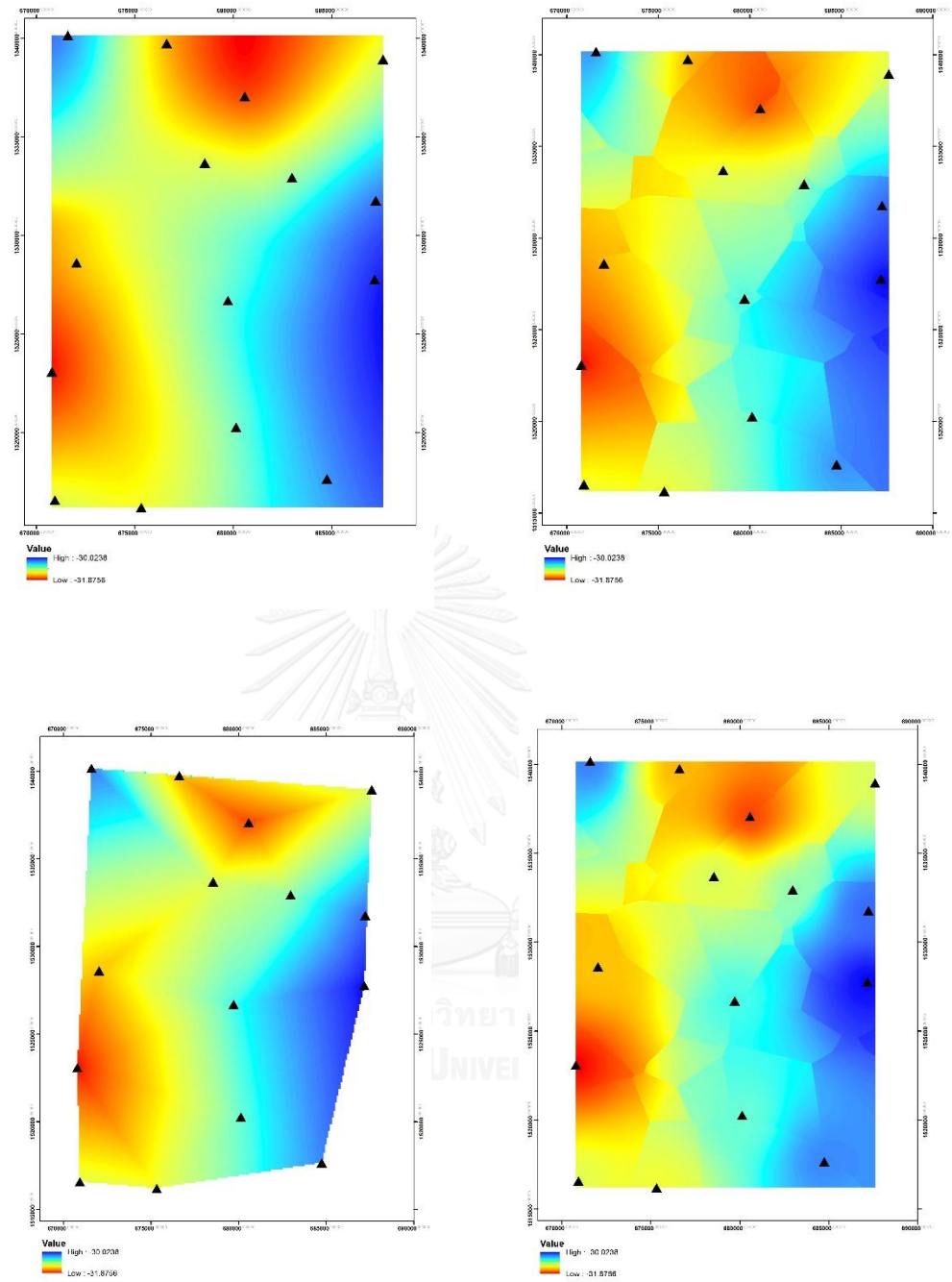
ข้อมูลจุดควบคุมทั้ง 40 จุดจะนำมาทดสอบผลของจำนวนและตำแหน่งต่อความถูกต้องของการแปลงความสูงโดยจะใช้จุดควบคุมตั้งแต่ 5, 10, 15,... 40 จุด สร้างพื้นผิวย่อยด้วยวิธีการประมาณค่าภายในแบบ Spline, Kriging, TIN และ IDW พื้นผิวย่อยที่ได้จะนำไปแปลงค่าความสูงของจุดตรวจสอบและทำการตรวจสอบกับความสูงที่ได้จากงานระดับพื้นผิวย่อยที่สร้างได้แสดงได้ดังรูปที่ 44-51



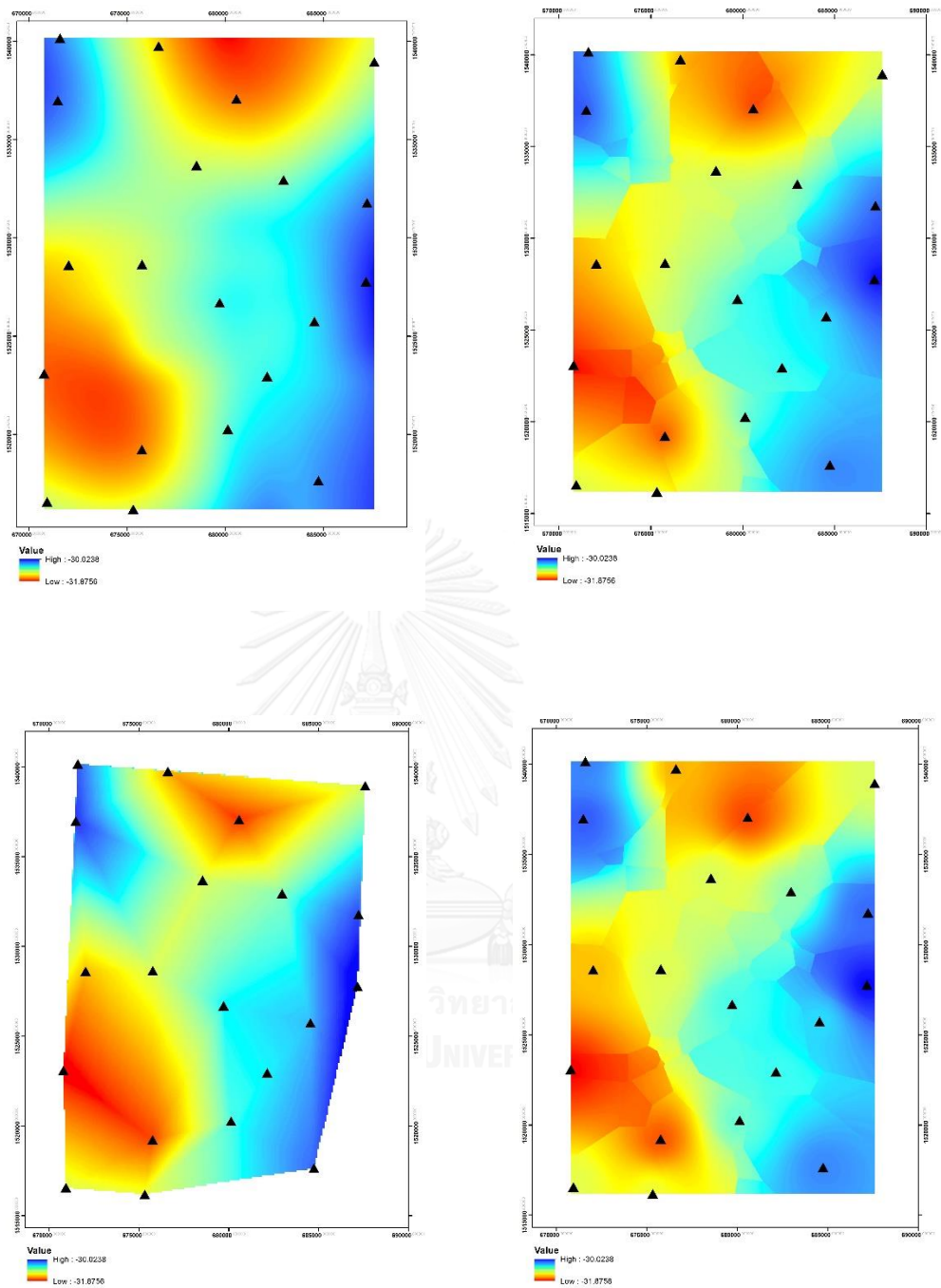
รูปที่ 44 พื้นผิวย่อยที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 5 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ



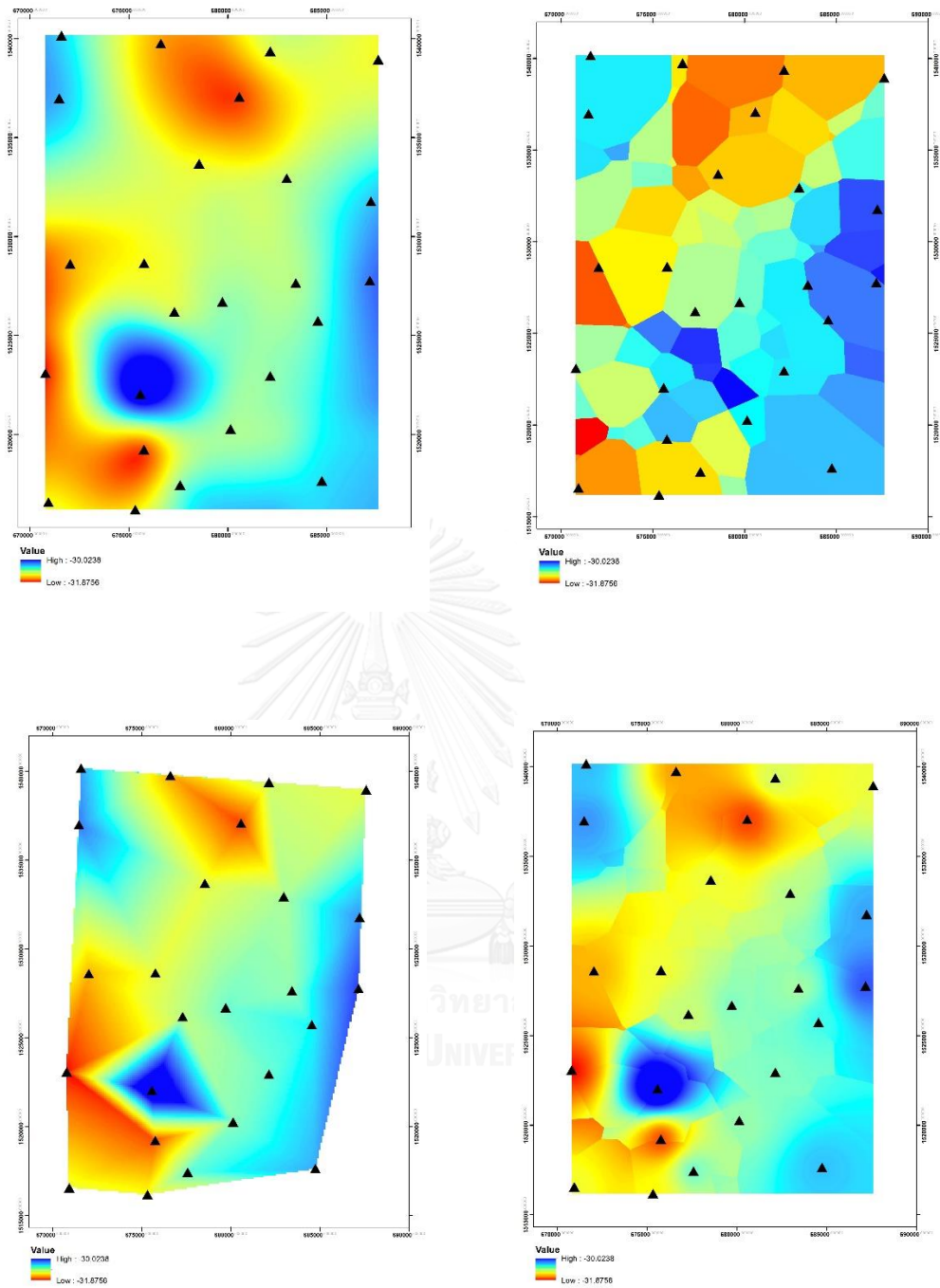
รูปที่ 45 พื้นผิวย่อยที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 10 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ



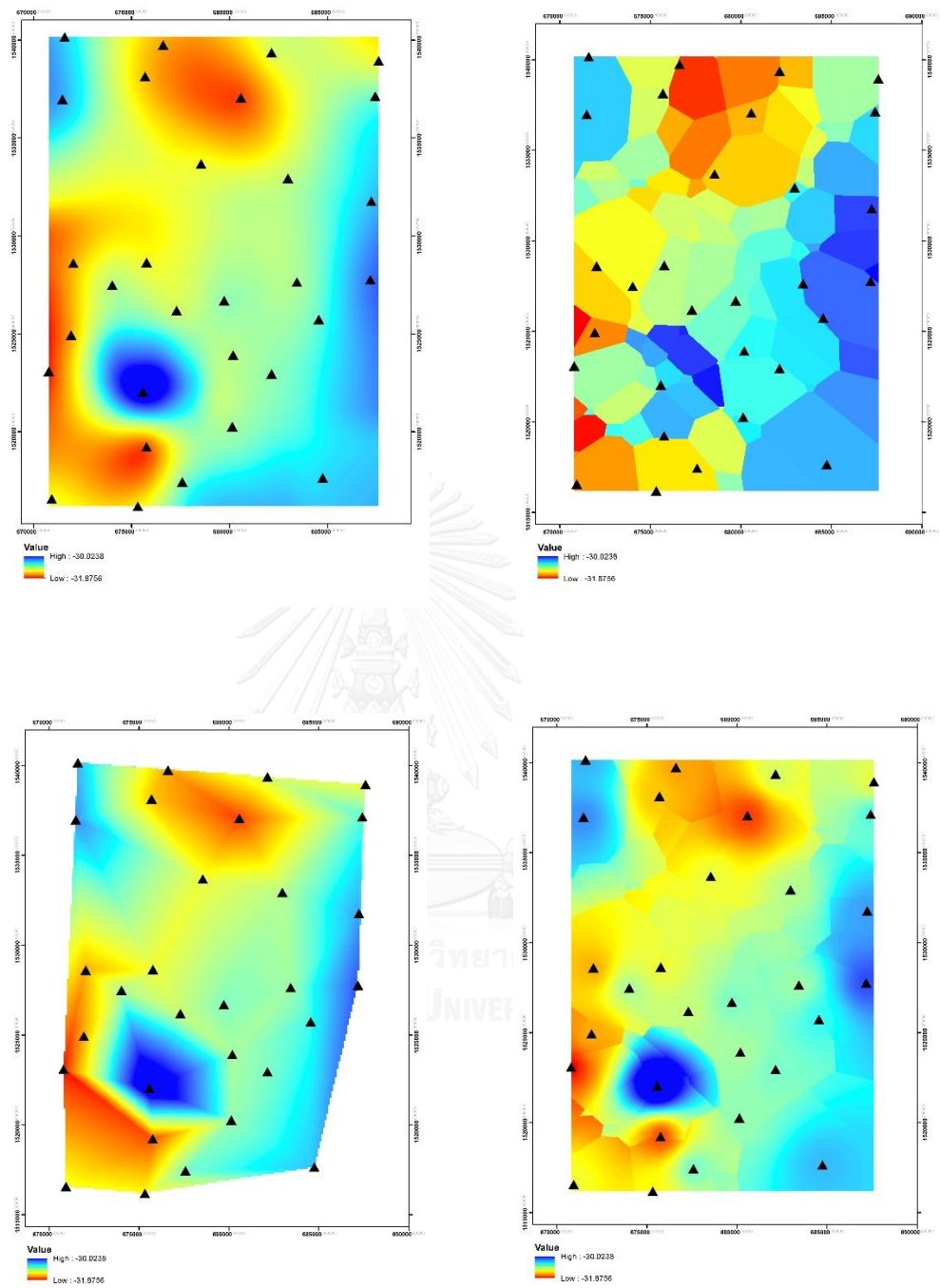
รูปที่ 46 พื้นผิวย่อยดัดที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 15 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ



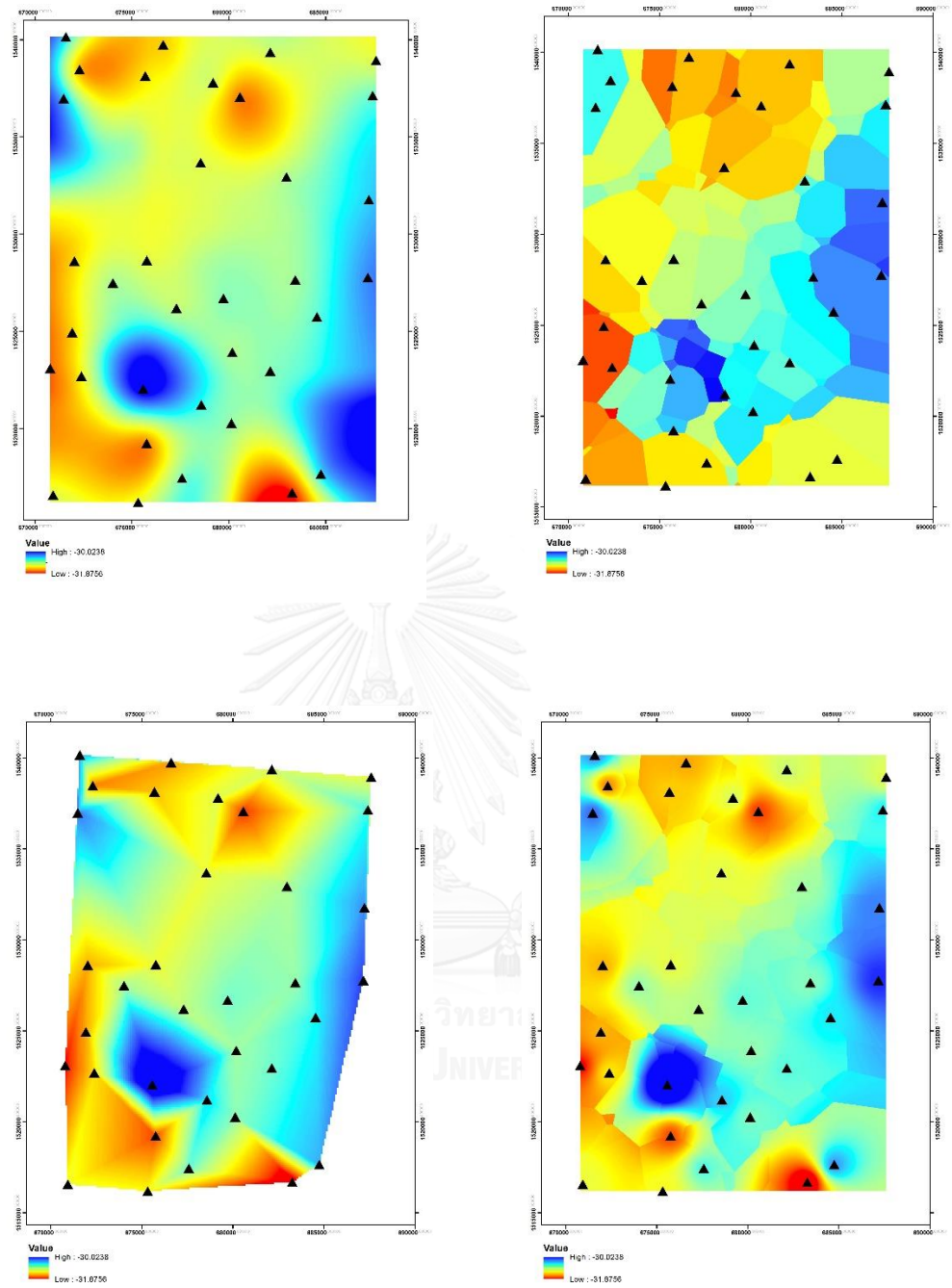
รูปที่ 47 พื้นผิวย่อยยอดที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 20 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ



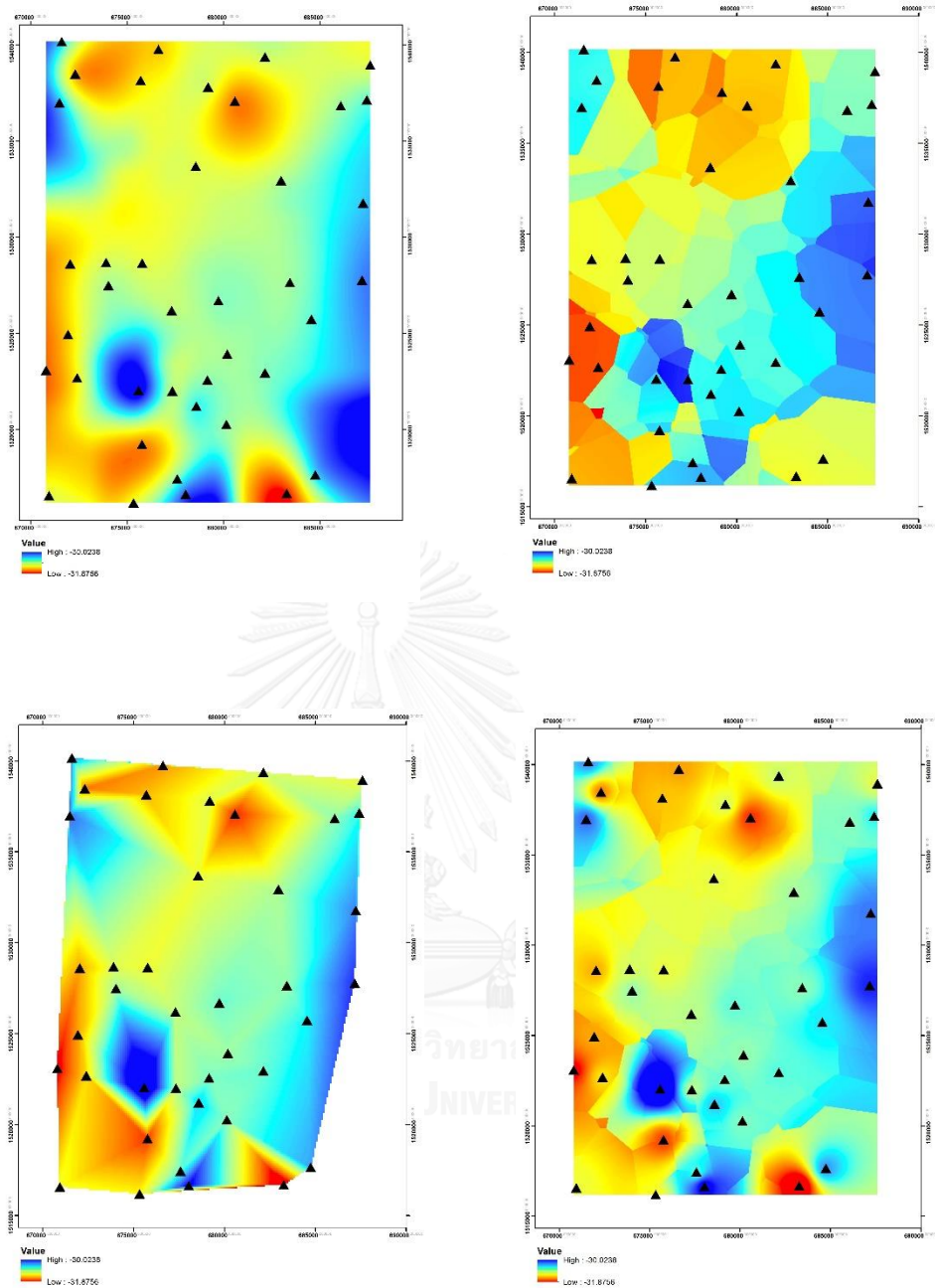
รูปที่ 48 พื้นผิวย่อยดัดที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 25 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ



รูปที่ 49 พื้นผิวย่อยดัดที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 30 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ



รูปที่ 50 พื้นผิวย่อยดัดที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 35 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ



รูปที่ 51 พื้นผิวฮัยออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าภายในด้วยจุดควบคุม 40 จุด ด้วยวิธี Spline, Kriging, TIN และ IDW ตามลำดับ พื้นผิวฮัยออยด์ที่ได้ในแต่ละรูปแบบจะนำไปแปลงความสูงจุดตรวจสอบจำนวน 20 จุด ความสูงออร์โทเมตริกที่แปลงได้จะนำไปตรวจสอบกับความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่รังวัดได้จากงานระดับ ผลจากการตรวจสอบแสดงไว้ในตารางที่ 14-17 ซึ่งคอลัมน์ PID คือหมายเลขจุดตรวจสอบ คอลัมน์ MSL คือค่าความสูงออร์โทเมตริกของจุดตรวจสอบที่ได้จากงานระดับ คอลัมน์ OrH คือค่าความสูงออร์โทเมตริกในแต่ละจำนวนจุดควบคุม คอลัมน์ diff คือค่าต่างระหว่างความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากงานระดับกับความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการแปลง

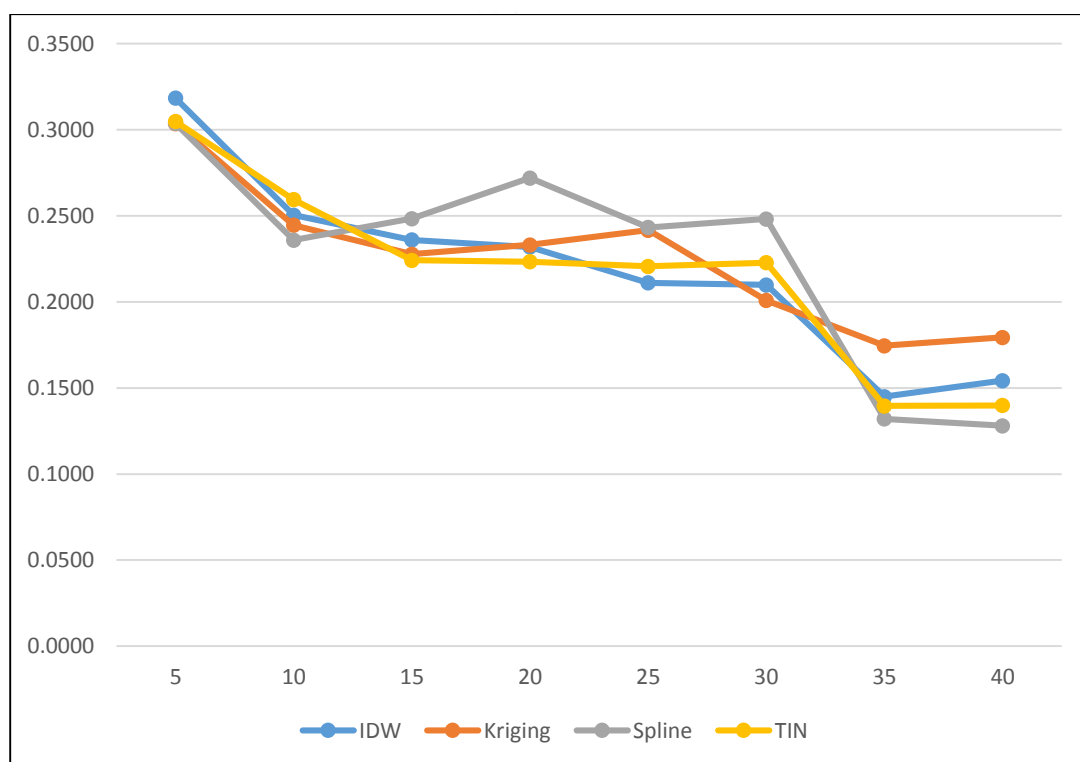
PID	MSL	05G		10G		15G		20G		25G		30G		35G		40G	
		OrH	diff	OrH	diff	OrH	diff	OrH	diff	OrH	diff	OrH	diff	OrH	diff	OrH	diff
013	2.0130	1.7213	0.2917	1.8724	0.1406	2.4284	-0.4154	2.5072	-0.4942	2.2168	-0.2038	2.1993	-0.1863	1.9263	0.0867	1.9253	0.0877
033	1.8260	1.4377	0.3883	1.7858	0.0402	1.7544	0.0716	1.7464	0.0796	1.7539	0.0721	1.7779	0.0481	1.7272	0.0988	1.7546	0.0714
039	1.8345	1.6425	0.1920	1.9229	-0.0884	1.9089	-0.0744	1.7733	0.0612	1.7921	0.0424	1.9141	-0.0796	1.7196	0.1149	1.8005	0.0340
041	2.3695	2.0003	0.3692	2.2014	0.1681	2.5487	-0.1792	2.5183	-0.1488	2.5957	-0.2262	2.6249	-0.2554	2.3012	0.0683	2.3013	0.0682
046	1.4990	1.4094	0.0896	1.4152	0.0638	1.5368	-0.0378	1.5845	-0.0855	1.4599	0.0391	1.3358	0.1632	1.4001	0.0989	1.4265	0.0725
048	2.1390	2.0136	0.1254	2.1140	0.0250	2.2974	-0.1584	2.3022	-0.1632	2.3115	-0.1725	2.2941	-0.1551	2.3722	-0.2332	2.3695	-0.2305
052	0.4545	0.4377	0.0168	0.5556	-0.1011	0.5343	-0.0798	0.5787	-0.1242	0.2805	0.1740	0.4075	0.0470	0.3600	0.0945	0.5297	-0.0752
054	0.9770	0.7935	0.1835	1.1889	-0.2119	1.1725	-0.1955	1.2182	-0.2412	0.8209	0.1561	0.7986	0.1784	0.8127	0.1643	0.8043	0.1727
060	0.2825	0.0412	0.2413	0.1657	0.1168	0.2490	0.0335	0.4061	-0.1236	0.1900	0.0925	0.1798	0.1027	0.1625	0.1200	0.3072	-0.0247
063	2.5495	1.7628	0.7867	1.8269	0.7226	1.8485	0.7010	1.7269	0.8226	1.7124	0.8371	1.6766	0.8729	2.5688	-0.0193	2.4284	0.1211
065	0.6740	0.7632	-0.0892	0.7170	-0.0430	0.6959	-0.0219	0.7700	-0.0960	0.7772	-0.1032	0.7760	-0.1020	0.5090	0.1650	0.5069	0.1671
070	1.3350	1.1067	0.2283	1.1752	0.1598	1.1624	0.1726	1.1636	0.1714	1.1954	0.1396	1.2084	0.1266	1.1898	0.1452	1.1861	0.1489
078	0.3825	0.2080	0.1745	0.2701	0.1124	0.2611	0.1214	0.2863	0.0962	0.2934	0.0891	0.3144	0.0681	0.2951	0.0874	0.3138	0.0687
080	2.6230	2.8844	-0.2614	2.6854	-0.0624	2.6034	0.0196	2.8015	0.0215	2.6108	0.0122	2.5396	0.0834	2.5156	0.1074	2.5173	0.1057
095	2.0685	1.4900	0.5785	1.5977	0.4708	1.9092	0.1593	1.8813	0.1872	1.9311	0.1374	1.9641	0.1044	2.1562	-0.0877	2.1562	-0.0877
098	0.8990	0.9781	-0.0791	0.6194	0.2796	0.6322	0.2668	0.6962	0.2028	0.7056	0.1934	0.7083	0.1907	0.7079	0.1911	0.7079	0.1911
099	0.4215	0.3004	0.1211	0.3266	0.0949	0.3178	0.1037	0.3302	0.0913	0.4176	0.0039	0.3286	0.0929	0.5676	-0.1461	0.5821	-0.1606
103	1.6890	1.4787	0.2103	1.6513	0.0377	2.1355	-0.4465	2.1495	-0.4605	2.0882	-0.3992	2.0842	-0.3952	1.9310	-0.2420	1.9306	-0.2416
104	1.7665	1.6474	0.1191	1.4859	0.2806	1.4907	0.2758	1.6858	0.0807	1.6859	0.0806	1.6871	0.0794	1.6942	0.0723	1.6993	0.0672
109	1.1605	0.8032	0.3573	1.3164	-0.1559	1.3215	-0.1610	1.3880	-0.2275	0.9929	0.1676	1.0652	0.0953	1.1192	0.0413	1.1229	0.0376
		RMSE	0.3037		0.2359		0.2483		0.2719		0.2432		0.2481		0.1320		0.1281

ตารางที่ 14 ผลการตรวจสอบความสูงของรัทเมตริกที่แปลงได้จากพื้นผิวโดยวิธีที่ได้จากการประมาณค่าแบบ spline ด้วยจุดควบคุมจำนวนต่าง ๆ (หน่วยเมตร)

จากผลการตรวจสอบในตารางที่ 14-17 สรุปค่า RMSE ในแต่ละวิธีไว้ในตารางที่ 18 และแสดงผลในรูปแบบกราฟในรูปที่ 52

วิธี \ จุดควบคุม	5	10	15	20	25	30	35	40
IDW	0.3184	0.2504	0.2360	0.2319	0.2111	0.2099	0.1450	0.1542
Kriging	0.3036	0.2445	0.2277	0.2331	0.2417	0.2008	0.1745	0.1794
Spline	0.3037	0.2359	0.2483	0.2719	0.2432	0.2481	0.1320	0.1281
TIN	0.3047	0.2594	0.2242	0.2233	0.2207	0.2228	0.1396	0.1398

ตารางที่ 14 แสดงค่า RMSE ของผลการตรวจสอบการแปลงความสูงด้วยจุดควบคุมจำนวนและตำแหน่งในแต่ละรูปแบบ



รูปที่ 52 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความถูกต้อง โดย แกน X เป็นจำนวนจุดควบคุม และแกน Y เป็นค่า RMSE หน่วยเมตร

จากตารางที่ 18 ค่าในคอลัมน์ 5, 10, 15,...40 คือค่า RMSE ที่ตรวจสอบได้จากวิธีการประมาณค่าภายใน ในแต่ละแถว โดยใช้จุดควบคุมตามคอลัมน์นั้น กราฟในรูปที่ 52 แกน x แสดงจำนวนจุดควบคุมที่ใช้ในการสร้างพื้นผิวย่อยยอดและ แกน Y คือค่า RMSE ที่ตรวจสอบได้จากจุดตรวจสอบ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาวิจัยการแปลงค่าความสูงข้อมูลไลดาร์จากพื้นหลักฐานทรงรี WGS84 ไปสู่ระดับน้ำทะเลปานกลางด้วยวิธีประมาณค่าภายในและการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑล โดยใช้ข้อมูลจุดควบคุมที่มีค่าความสูงรวมจำนวน 40 จุด ทำการตรวจสอบความถูกต้องของความสูงที่แปลงได้ทั้ง 6 วิธี รวมทั้งการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองฮัยอยด์สากล EGM96 และ EGM2008 โดยใช้จุดตรวจสอบที่มีค่าความสูงรวมจำนวน 20 หมู่ และทำการทดสอบผลของตำแหน่งและจำนวนจุดควบคุมที่ใช้ในการแปลงความสูงต่อความถูกต้องที่ได้รับ สามารถสรุปผลการศึกษาวิจัยได้ดังนี้

5.1 ผลการศึกษาวิจัย

ผลการตรวจสอบความสูงที่แปลงได้ด้วยจุดตรวจสอบทั้ง 6 วิธี และการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองฮัยอยด์สากล EGM96 และ EGM2008 ตรวจสอบด้วยค่าทางสถิติคือ ค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่า RMSE และ ค่า LE95 (Linear Error at 95% confidence level) ของทั้ง 6 วิธีสรุปได้ดังตารางที่ 19

StatisticTEST	EGM96	EGM2008	Spline	Kriging	IDW	TIN	Poly	Loess
Average	-0.0568	0.0588	0.0297	0.0070	0.0202	0.0762	0.0480	0.0697
S.D.	0.1802	0.1920	0.1278	0.1849	0.1569	0.1203	0.1939	0.1404
RMSE	0.1846	0.1961	0.1281	0.1794	0.1542	0.1398	0.1950	0.1535
LE95	0.3618	0.3844	0.2510	0.3516	0.3023	0.2740	0.3822	0.3009
Min	-0.3350	-0.2722	-0.2416	-0.4776	-0.3515	-0.1669	-0.3417	-0.1317
Max	0.5500	0.7314	0.1911	0.4235	0.2404	0.2574	0.5428	0.3526

ตารางที่ 15 สรุปค่าทางสถิติของการตรวจสอบความสูงด้วยวิธีแปลงค่าต่าง ๆ (หน่วยเมตร)

จากตารางที่ 19 วิธีการแปลงความสูงที่ใช้ในกระบวนการเชิงพาณิชย์คือการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองฮัยอยด์สากล EGM96 ผลการตรวจสอบในคอลัมน์ EGM96 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0568 เมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.1802 เมตร ค่า RMSE เท่ากับ 0.1846 เมตรและค่า LE95 เท่ากับ 0.3618 เมตร และการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองฮัยอยด์สากล EGM2008 ผลการตรวจสอบในคอลัมน์ EGM2008 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0588 เมตร ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่า 0.1920 เมตร ค่า RMSE เท่ากับ 0.1961 เมตร และค่า LEG95 เท่ากับ 0.3844 เมตร ค่า RMSE จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวิธีการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองฮัยอยด์สากลทั้งสองแบบนี้ให้ค่าความผิดพลาดสูงกว่าวิธีอื่น ๆ ทั้งหมดยกเว้นวิธีการแปลงแบบค่าความสูงด้วยแบบจำลองโพลีโนเมียลซึ่ง

เป็นวิธีการที่ให้ค่าความผิดพลาดสูงที่สุด ดังนั้นข้อมูลโลดาร์ที่ได้จากกระบวนการเชิงพานิชย์ที่ใช้แบบจำลองยี่ออยด์สากล EGM96 จะมีค่า LE95 ประมาณ 0.36 เมตร ทั้งนี้ความผิดพลาดที่สูงของการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองยี่ออยด์สากลน่าจะมีผลจากความละเอียดของแบบจำลอง เมื่อพิจารณาจากพื้นผิวยี่ออยด์แบบสามมิติจะพบว่าพื้นผิวที่ได้จะพบว่าเป็นพื้นผิวที่มีรายละเอียดพื้นผิวยี่ออยด์ไม่มากนักลาดเอียงไปทางด้านซ้ายเนื่องจากเป็นพื้นผิวที่สร้างได้จากข้อมูลที่มีความละเอียดน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pérez et al. (2011) ที่ได้สรุปว่าความผิดพลาดของการแปลงค่าความสูงข้อมูลโลดาร์จะขึ้นกับระยะห่างจากจุดที่ทราบความสูงยี่ออยด์

เปรียบเทียบความถูกต้องของความสูงที่ได้จากวิธีการแปลงความสูงด้วยพื้นผิวสูงผิวยี่ออยด์ที่สร้างจากการประมาณค่าภายในแบบ Spline, Kriging, IDW, TIN, การแปลงความสูงด้วยพื้นผิวยี่ออยด์ที่สร้างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบโพลีโนเมียล และแบบนอนพาราเมตริกอัลกอริทึมแบบ Loess ซึ่งในแต่ละวิธีนี้มีค่าทางสถิติดังนี้

การประมาณค่าภายในแบบ Spline แบบ Tension เป็นวิธีการที่ให้ค่า RMSE น้อยที่สุดจากวิธีที่เลือกทดสอบทั้งหมด โดยมีค่าความต่างเฉลี่ยเท่ากับ 0.0297 เมตร ค่าความต่างมากที่สุดเท่ากับ 0.1911 เมตร ค่าความต่างน้อยที่สุดเท่ากับ -0.2416 เมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.1278 เมตร ค่า RMSE เท่ากับ 0.1281 เมตร และค่าความถูกต้องที่ 95% ความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.2510 เมตร

การประมาณค่าภายในแบบ TIN เป็นวิธีการที่ให้ค่า RMSE น้อย รองจากวิธีแบบ Spline โดยมีค่าความต่างเฉลี่ยเท่ากับ 0.0762 เมตร ค่าความต่างมากที่สุดเท่ากับ 0.2574 เมตร ค่าความต่างน้อยที่สุดเท่ากับ -0.1669 เมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.1203 เมตร ค่า RMSE เท่ากับ 0.1398 เมตร และค่าความถูกต้องที่ 95% ความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.2740 เมตร

การแปลงความสูงด้วยวิธีนอนพาราเมตริกแบบ Loess เป็นวิธีที่ให้ค่า RMSE น้อยเป็นลำดับที่ 3 รองจาก Spline และ TIN โดยมีค่าความต่างเฉลี่ยเท่ากับ 0.0697 เมตร ค่าความต่างมากที่สุดเท่ากับ 0.3526 เมตร ค่าความต่างน้อยที่สุดเท่ากับ -0.1317 เมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.1404 เมตร ค่า RMSE เท่ากับ 0.1535 เมตร และค่าความถูกต้องที่ 95% ความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.3009 เมตร

การประมาณค่าภายในแบบ IDW เป็นวิธีที่ให้ค่า RMSE น้อยเป็นลำดับที่ 4 รองจาก Spline, TIN และ Loess โดยมีค่าความต่างเฉลี่ยเท่ากับ 0.0202 เมตร ค่าความต่างมากที่สุดเท่ากับ 0.2404 เมตร ค่าความต่างน้อยที่สุดเท่ากับ -0.3515 เมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.1569 เมตร ค่า RMSE เท่ากับ 0.1542 เมตร และค่าความถูกต้องที่ 95% ความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.3023 เมตร

การประมาณค่าภายในแบบ Kriging เป็นวิธีที่ให้ค่า RMSE น้อยเป็นลำดับที่ 5 รองจาก Spline, TIN, Loess และ IDW โดยมีค่าความต่างเฉลี่ยเท่ากับ 0.0070 เมตร ค่าความต่างมากที่สุดเท่ากับ 0.4235 เมตร ค่าความต่างน้อยที่สุดเท่ากับ -0.4776 เมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.1749 เมตร ค่า RMSE เท่ากับ 0.1849 เมตร และค่าความถูกต้องที่ 95% ความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.3516 เมตร

การแปลงความสูงด้วยแบบจำลองโพลีโนเมียล เป็นวิธีการที่ให้ค่า RMASE สูงที่สุด โดยมีค่าความต่างเฉลี่ยเท่ากับ 0.0480 เมตร ค่าความต่างมากที่สุดเท่ากับ 0.5428 เมตร ค่าความต่างน้อยที่สุดเท่ากับ -0.3417 เมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.1950 เมตร ค่า RMSE เท่ากับ 0.1939 เมตร และค่าความถูกต้องที่ 95% ความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.3822 เมตร

จากวิธีการแปลงความสูงด้วยวิธีต่าง ๆ ยกเว้นการแปลงด้วยแบบจำลองโพลีโนเมียล พบว่าให้ความถูกต้องดีกว่าการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองยี่ออยด์สากลทั้งสองแบบ และค่าความถูกต้องมีค่าดีที่สุดเมื่อใช้พื้นผิวความสูงยี่ออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าภายในแบบ Spline โดยมีค่า RMSE เท่ากับ 0.128 เมตร และค่า LE95 เท่ากับ 0.251 เมตร เมื่อพิจารณาจากพื้นผิวความสูงยี่ออยด์แบบสามมิติในรูปที่ 38- 41 จะพบว่าวิธีการต่างๆ มีรายละเอียดและความต่อเนื่องของพื้นผิวความสูงยี่ออยด์มากกว่าพื้นผิวความสูงยี่ออยด์ที่ได้จากวิธีอื่น ๆ สอดคล้องกับค่าทางสถิติที่ได้ แสดงให้เห็นว่าวิธีการแปลงความสูงแบบด้วยยี่ออยด์ที่ได้จากการประมาณค่าภายในแบบ Spline, Kriging, TIN, IDW และการแปลงความสูงด้วยพื้นผิวยี่ออยด์ที่ได้จากแบบจำลองนอนพาราเมตริกด้วยวิธี Loess สามารถนำมาประยุกต์ใช้สร้างพื้นผิวความสูงยี่ออยด์เพื่อใช้ในการแปลงความสูงข้อมูลไลดาร์จากพื้นหลักฐานทรงรี WGS84 ไปสู่ความสูงออร์โทเมตริกหรือความสูงที่ระดับทะเลปานกลางได้ และเชื่อว่าในบริเวณพื้นที่ที่มีความผิดพลาดของพื้นผิวยี่ออยด์สากล EGM96 และ EGM2008 สูงก็จะสามารถนำวิธีการแปลงความสูงแบบต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ได้

การแปลงความสูงด้วยวิธีการประมาณค่าภายในจะถูกนำมาใช้ทดสอบจำนวนและตำแหน่งจุดควบคุมว่ามีผลต่อความถูกต้องหรือไม่โดยทำการสร้างพื้นผิวยี่ออยด์ด้วยจุดควบคุมตั้งแต่ 5, 10, 15,...40 ผลการตรวจสอบในตารางที่ 18 และแสดงผลในลักษณะกราฟเส้นในรูปที่ 52 แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนจุดควบคุมเพิ่มขึ้นค่า RMSE มีค่าน้อยลง และมีค่าน้อยที่สุดเมื่อใช้จุดควบคุม 40 จุด โดยมีลักษณะการลดลงคล้ายกับลักษณะของกราฟฟังก์ชันลอการิทึม กล่าวคือมีการเปลี่ยนแปลงหรือความชันของกราฟในช่วงแรกสูงพิจารณาได้จากกราฟในรูปที่ 18 ในช่วงการเปลี่ยนจำนวนจุดควบคุมจาก 5 จุดไปเป็น 10 จุด แต่ในช่วงจากจุดควบคุมจำนวน 10 จุดไปถึง 30 จุด กราฟมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวจะพบว่าการกระจายตัวของจุดควบคุมจำนวน 5 จุดนั้นมีระยะห่างระหว่างจุดควบคุมสูง ทำให้การกระจายตัวของจุดควบคุมน้อย เมื่อจุดควบคุมเพิ่มขึ้นเป็น 10 จุด จุดควบคุมสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้มากขึ้นทำให้เป็นปัจจัยทำให้ค่า RMSE ลดลง แต่เมื่อจุดควบคุมเพิ่มขึ้นจาก 10 จุด เป็น 15, 20, 25, และ 30 ในทุกๆ วิธีการประมาณค่า ให้ผลการเปลี่ยนแปลงค่า RMSE เพียงเล็กน้อย เป็นผลมาจากการกระจายตัวของจุดไม่แตกต่างกันมากนักทำจำนวนจุดควบคุมที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่า RMSE เพียงเล็กน้อย และภายหลังจากเพิ่มจุดควบคุมเป็น 35 และ 40 ค่า RMSE ที่ได้จากทุกวิธีการประมาณค่า มีค่าลดลงอีกครั้งเนื่องจากการกระจายตัวของจุดควบคุมมีมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความถูกต้องของระบบไลดาร์จากกราฟการวัดสอบระบบไลดาร์ที่ได้จากโรงงานจะพบว่าค่าความถูกต้องที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธี Spline ที่ใช้จุดควบคุมจำนวน 35 และ 40 จุดในการสร้างพื้นผิวยี่ออยด์เพื่อใช้แปลงความสูงนั้นมีค่าประมาณ 0.12

เมตร ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับความถูกต้องที่ระบบสามารถสร้างได้ ดังนั้นการเพิ่มจุดควบคุมมากขึ้น จะส่งผลให้ค่า RMSE เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จากผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าการกระจายตัวของจุดควบคุมมีผลต่อความถูกต้องในการแปลงความสูงข้อมูลไลดาร์ด้วยพื้นผิวย้อยยดที่ได้จากวิธีการประมาณค่าภายในแบบต่าง ๆ และจะให้ผลความถูกต้องที่ใกล้เคียงกับความถูกต้องของระบบเมื่อใช้พื้นผิวย้อยยดที่ได้จากวิธีการประมาณค่าภายในแบบ Spline ด้วยจุดควบคุม 40 จุด และจากกราฟในรูปที่ 52 เมื่อพิจารณากราฟในแต่ละวิธีจะพบว่า เส้นกราฟที่ได้จากการประมาณค่าภายในแบบ TIN และ IDW มีลักษณะการลดลงอย่างต่อเนื่องและเป็นระบบเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากการประมาณค่าภายในแบบ Kriging และ Spline ที่มีการลดลงไม่คงที่มีบางจุดที่ค่า RMSE เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนจุดควบคุมเพิ่มขึ้นเช่นช่วงจุดควบคุมจำนวน 10 ถึง 30 จุด ดังนั้นหากใช้จุดควบคุมจำนวน 10 ถึง 30 จุดในการสร้างพื้นผิวย้อยยด วิธีการประมาณค่าภายในแบบ TIN และ IDW จะเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการใช้สร้างพื้นผิวย้อยยดเพื่อใช้แปลงความสูง แต่ถ้าสามารถใช้จุดควบคุมตั้งแต่ 30 จุดขึ้นไปวิธีการประมาณค่าภายในแบบ Spline และ Kriging จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า ดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้งานจึงต้องพิจารณาถึงจำนวนจุดควบคุมและการกระจายตัวของจุดควบคุมเพื่อเลือกใช้วิธีการที่จะใช้สร้างพื้นผิวย้อยยดที่นำมาใช้แปลงความสูงได้อย่างเหมาะสม

5.2 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

จากวิธีการแปลงความสูงข้อมูลไลดาร์ด้วยแบบจำลองพื้นผิวย้อยยดในพื้นที่กรุงเทพมหานคร และปริมณฑลเป็นพื้นที่ประมาณ 400 ตร.กม. ด้วยวิธีประมาณค่าด้วยจุดควบคุมจำนวน 40 จุด และผลจากการตรวจสอบความสูงที่แปลงได้ด้วยจุดตรวจสอบจำนวน 20 จุด แสดงให้เห็นว่าวิธีการแปลงความสูงข้อมูลไลดาร์ด้วยวิธีการประมาณค่าภายในแบบ Spline สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแปลงความสูงข้อมูลไลดาร์จากความสูงที่พื้นหลักฐานทรวงรี WGS84 มาสู่ระดับทะเลปานกลางแบบจำลองย้อยยดสากลได้ และเชื่อว่าในบริเวณพื้นที่ที่แบบจำลองย้อยยดสากลมีความผิดพลาดสูง การแปลงความสูงด้วยพื้นผิวย้อยยดด้วยวิธีการประมาณค่าแบบ Spline จะให้ความถูกต้องที่ดีกว่า โดยในการประมาณค่านั้นเพื่อให้ได้พื้นผิวย้อยยดที่มีความถูกต้อง จุดควบคุมที่ใช้ในการสร้างพื้นผิวย้อยยดควรมีไม่น้อยกว่า 1 จุดต่อพื้นที่ 10 ตร.กม. อย่างไรก็ตามจำนวนจุดควบคุมที่ต้องการนั้นอาจแตกต่างกันไปในพื้นที่อื่นที่พื้นผิวย้อยยดมีความแปรเปลี่ยนเชิงพื้นที่ (Local variation) มากหรือน้อยกว่าพื้นผิวย้อยยดในพื้นที่ศึกษา ทั้งนี้ความถูกต้องที่ได้นั้นก็ยังไม่สามารถนำมาใช้ทดแทนการรังวัดความสูงที่ได้จากงานระดับได้

5.3 ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย

การถ่ายค่าความสูงจากหมุดควบคุมทางดิ่งของกรุงเทพฯไปสู่จุดควบคุมและจุดตรวจสอบที่เลือกไว้จากข้อมูลไลดาร์ จะพบปัญหาเมื่อลงพื้นที่เพื่อสำรวจไม่พบหมุดควบคุมทางดิ่งตามแบบหมุด เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ ทำให้ต้องยกเลิกจุดนั้นและทำการกลับไปเลือกจุดใหม่ในงานสนามส่งผลให้เสียเวลาในการทำงานในสนามมากขึ้น

การรังวัดเพื่อหาตำแหน่งทางราบข้อมูลจุดไลดาร์เพื่อใช้เป็นจุดควบคุมหรือจุดตรวจสอบ ใช้การรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลนในทันที ซึ่งต้องใช้พื้นที่โล่งในการรับสัญญาณแต่มีบางจุดที่เลือกไว้มีสิ่งบดบังเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ ทำให้การรับสัญญาณดาวเทียมเป็นไปได้ช้าหรือไม่สามารถรังวัดได้เนื่องจากมีความผิดพลาดสูง ส่งผลให้ต้องยกเลิกจุดนั้นในการรังวัดและเลือกจุดใหม่

5.4 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยครั้งนี้จำกัดการใช้พื้นผิวย่อยยัดที่ได้จากการประมาณค่าในแบบ Spline, Kriging, TIN และ IDW การแปลงความสูงด้วยแบบจำลองพอลิโนเมียล และการแปลงความสูงด้วยแบบจำลองแบบนอนพาราเมตริกโมเดลแบบ Loess เท่านั้น ในปัจจุบันยังมีวิธีการประมาณค่าแบบอื่น ๆ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่นๆ ที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างพื้นผิวย่อยยัดเพื่อใช้ในการแปลงความสูง ซึ่งในกรณีนี้อาจจะต้องมีการนำวิธีอื่น ๆ มาศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาวิธีที่เหมาะสมยิ่งขึ้น

การประมาณค่าในแต่ละวิธีนั้นจะมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ กันในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้ค่าพารามิเตอร์จากงานวิจัยที่มีอยู่นำมาใช้ในการกำหนดค่าในการสร้างพื้นผิวย่อยยัด จึงยังไม่ได้มีการทดสอบว่าพื้นผิวย่อยยัดที่ได้จากพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปนั้นส่งผลต่อความถูกต้องในการแปลงความสูงหรือไม่อย่างไร

ด้วยข้อจำกัดในเรื่องการเลือกจุดควบคุมที่ต้องสามารถมองเห็นหมุดควบคุมของกรุงเทพฯ ภายในระยะ 1 ช่วงการถ่ายระดับ และเป็นพื้นที่ราบเปิดโล่งเหมาะแก่การรังวัดค่าพิกัดด้วยสัญญาณดาวเทียมเพื่อให้ค่าความถูกต้องของค่าพิกัดที่ได้มีความถูกต้องสูงสุด ส่งผลให้มีจุดที่ตรงตามข้อกำหนดเพียง 60 จุด ซึ่งใช้เป็นจุดควบคุม 40 จุด และจุดตรวจสอบ 20 จุดเท่านั้น หากยอมรับค่าความผิดพลาดที่เพิ่มขึ้นจากการถ่ายระดับที่ไกลขึ้นจะทำให้สามารถรังวัดจุดที่ใช้เป็นจุดควบคุมได้จำนวนมากกว่าในงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งจะเป็นการลดข้อจำกัดเรื่องจำนวนจุดควบคุมลงและสามารถศึกษาผลกระทบของจำนวนจุดควบคุมและตำแหน่งที่มีต่อความถูกต้องได้ละเอียดมากขึ้น

รายการอ้างอิง



ภาษาไทย

เฉลิมชนม์ สติระพจน์. (2546). การสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดำรงห์ ประสงค์กิจ .(2555). การคำนวณหาชื่อยอดโดยวิธีการประมาณค่าภายใน บริเวณพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ

ธนัช สุขวิมลเสรี, เฉลิมชนม์ สติระพจน์. 2548. "การประเมินความถูกต้องของค่าความสูง ออร์โทเมตริกจากการรังวัดดาวเทียมระบบ GPS." วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา ปีที่ 16, ฉบับที่ 4: หน้า 18-21.

วิชัย เยี่ยงวีรชน. (2557). การสำรวจทางวิศวกรรม 1 (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ:โรงพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สรรเพชร ชื่อนิติไพศาล. (2556). TIN. เอกสารประกอบการสอนเรื่อง Data Structure. กรุงเทพฯ:จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

Dias, R., (2005). Advanced Geographic Data Analysis Scatter-diagram smoothing. Lecture Topic Data Analysis and Visualization, Oregon: University of Oregon

How IDW works. (2012). Retrieved December 20 2009, from:<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z00000075000000>

How Kriging works. (2012). Retrieved December 20 2009, from:<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z00000076000000>

How Spline works. (2012). Retrieved December 20 2009, from:<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z00000078000000>

Isioye, O.A., & Youngu, T.T., (2009). Global Geoid Modeling and Height Determination for Engineering Applications. ABU Zaria Research Publications, 1-14.

Leica ALS70 Documentation. (2011). Switzerland: Leica

Martina, Gucek, & Tomislav, Basic. (2009). Height Transformation Models From Ellipsoidal Into The Normal Orthometric Height System for The Territory Of The City Of Zagreb. Stud. Geophys. Geod, 53, 17-38.

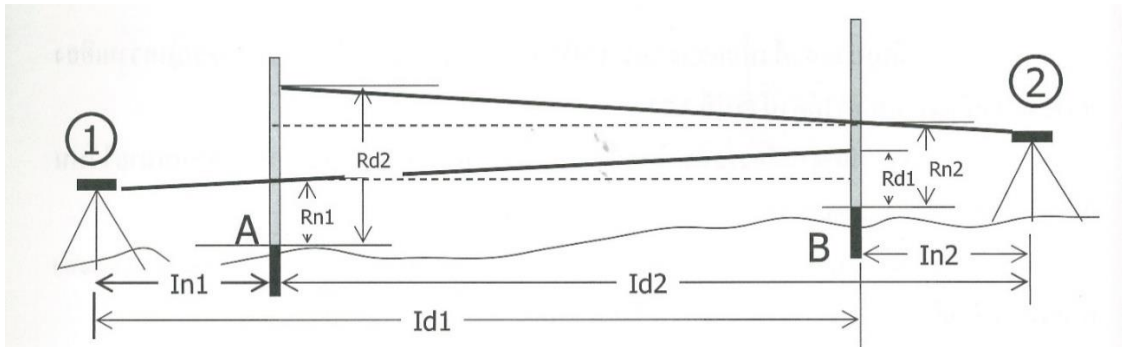
Pérez, J.L., Mozas, A.T., López, A., Aguilar, F., Delgado, J., Fernández, I., et al. (2011). Determination of orthometric heights form LiDAR data. Proceeding of the IMProVe, 932-937.

Tziavos, I.N., Vergos, G.S., Grigoriadis, V.N., & Andritsanos, V.D., (2012). Adjustment of Collocated GPS Geoid and Orthometric Height Observations in Greece Geoid or Orthometric Height Improvement. Geodesy for Planet Earth International Association of Geodesy Symposia, 136, 481-488.

ภาคผนวก

การตรวจสอบกล้องระดับ

การตรวจสอบกล้องระดับก่อนงานรังวัดจะทดสอบด้วยวิธีการทดสอบแบบ Two peg test เพื่อตรวจสอบว่าแนวเล็งของกล้องตั้งฉากกับแกนตั้งหรือไม่ จากการทดสอบใช้จุดตั้งไม้ระดับห่างกันประมาณ 70 เมตร ตั้งกล้องไว้ที่ด้านปลายสองด้านของไม้ระดับดังรูป 53 แล้วอ่านค่าในแต่ละด้านจากกล้องถึงไม้ระดับทั้งสองได้ผลดังตารางที่ 20



รูปที่ 53 การทดสอบกล้องระดับ Two peg test
(ที่มา: วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2555)

STA	Rn	In	Rd	ID
A	1.492		1.765	
	1.430	0.062	1.394	0.371
	1.369	0.061	1.023	0.371
	1.430	12.300	1.394	74.200
B	1.511		1.848	
	1.459	0.052	1.485	0.363
	1.406	0.053	1.123	0.362
	1.459	10.500	1.486	72.500
SUM	2.889	22.800	2.880	146.700

ตารางที่ 20 ผลการวัดสอบกล้องระดับ

ผลการวัดสอบกล้องจะมีแนวเล็งเอียง $e_a = \frac{(2.889 - 2.880)}{(146.7 - 22.8)} = 0.00007$ เมตร/เมตร เอียงขึ้น จากค่าที่คำนวณได้ หมายความว่ากล้องจะเอียงขึ้นเป็นระยะ 0.00007 เมตร เมื่อใช้ทำระดับที่มีระยะห่างจากกล้อง 1 เมตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวรพจน์ มาศิริ เกิดวันที่ 23 สิงหาคม 2522 ที่จังหวัดชัยนาท สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2544 ปัจจุบันทำงานประจำบริษัท อีเอสอาร์ไอ ประเทศไทย จำกัด ตำแหน่งผู้จัดการฝ่ายสนับสนุนทางเทคนิค

ผลงานที่ได้รับตีพิมพ์

1. วรพจน์ มาศิริ และ ธงทิศ ฉายากุล. การศึกษาการปรับแก้ข้อมูลความสูงไลดาร์บน WGS84 ลงสู่ระดับน้ำทะเลปานกลาง, การประชุมวิชาการ เทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศแห่งชาติ ศูนย์ราชการฯ แจ้งวัฒนะ กรุงเทพฯ. 12-14 พฤศจิกายน 2557.

2. Worapod Masiri and Thongthit chayakul. LiDAR height transformation with Geoid surface modeling using interpolation method in Bangkok metropolitan area. The 10th International Conference on ASIA GIS at Lotus Hotel Pang Suan Kaew, Chiang Mai, Thailand. 16–17 June 2014.

การบรรยาย

1. วรพจน์ มาศิริ และ ธงทิศ ฉายากุล. การศึกษาการปรับแก้ข้อมูลความสูงไลดาร์บน WGS84 ลงสู่ระดับน้ำทะเลปานกลาง, การประชุมวิชาการ เทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศแห่งชาติ ศูนย์ราชการฯ แจ้งวัฒนะ กรุงเทพฯ. 12-14 พฤศจิกายน 2557.

