วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา
Engineering Journal of Research and Development
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage
ปีที่ 35 ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม 2567
Volume 35 Issue 4 October-December 2024
Received 8 October 2024
Revised 31 October 2024
Accepted 20 December 2024

การหาจุดสมดุลของการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำสำหรับงานก่อสร้างในระดับจังหวัด

OPTIMIZING MAP PROJECTIONS FOR EQUILIBRIUM AND MINIMAL DISTORTION IN PROVINCIAL CONSTRUCTION PROJECTS

ติณณภพ มัชฌิมาภิโร[1*], ดีบุญ เมธากุลชาติ[2] และไพศาล สันติธรรมนนท์[3]
[1*]นิสิตมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
[2]สมาคมการสำรวจและการแผนที่แห่งประเทศไทย
[3]รองศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
*Corresponding author, E-Mail: tinnapop0006@gmail.com

บทคัดย่อ

การฉายแผนที่ยูนิเวอเซิลทรานส์เวอร์สเมอร์เคเตอร์ หรือ ยูทีเอ็ม (Universal Transverse Mercator : UTM) นิยมใช้ในงานออกแบบและงานก่อสร้างในประเทศไทย ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนเชิงเส้น (linear distortion) บางแห่งที่อาจสูงถึง 965 ppm ดังนั้นความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นที่เป็นผลจากการฉายแผนที่ยูทีเอ็ม ถือได้ว่าเป็นความคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำ (Low Distortion Projection : LDP) ระดับจังหวัด ได้แก่ การฉายทรานเวอร์สเมอเคเตอร์ (Transverse Mercator : TM) การฉายแลมเบิร์ตคอนฟอร์มอลโคนิค (Lambert Conformal Conic Projection : LCC) และการฉายเมอร์เคเตอร์แกนเอียง (Oblique Mercator : OMC) โดยมุ่งเน้นความสำคัญของ "พื้นที่เมือง" ที่มีการก่อสร้างบ่อยครั้ง แต่ละพื้นที่และเส้นทางการก่อสร้างอาจจะมีค่าระดับที่สูงหรือต่ำกว่าระนาบภูมิประเทศเฉลี่ย ซึ่งจะต้องออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำของจังหวัดให้มีค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) อยู่ระหว่าง -20 ppm ถึง +20 ppm ครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 80% ของพื้นที่เมือง แล้วหาจุดสมดุลของการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำของโครงการก่อสร้างในจังหวัดนั้น ๆ ให้มีค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วมอยู่ระหว่าง -10 ppm ถึง +10 ppm งานวิจัยได้ยกตัวอย่างจังหวัดพะเยาที่มีการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย - เชียงราย - เชียงของ สัญญาที่ 2 (ช่วงงาว - เชียงราย) พบว่า การฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำรูปแบบการฉายทรานเวอร์สเมอเคเตอร์เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ผลการคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วมของจังหวัดอยู่ที่ -18 ถึง +17 ppm และให้ผลของการหาจุดสมดุลของการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำของโครงการฯ อยู่ที่ -8 ถึง +8 ppm นอกจากนี้ได้ทดสอบความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งจากค่าพิกัดและค่าระดับ โดยใช้พารามิเตอร์การฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำจากหมุดควบคุมภายในโครงการ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งอยู่ในช่วง -6 ถึง +6 มิลลิเมตร โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วมมาใช้ในทางปฏิบัติ การเลือกชนิดการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำที่เหมาะสมจะช่วยให้งานออกแบบและงานก่อสร้างลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากความเพี้ยนของแผนที่ และหวังว่าในอนาคตการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำจะมีบทบาทในวงการก่อสร้างของประเทศไทยมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: การฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำ; การฉายแผนที่ทรานเวอร์สเมอร์เคเตอร์; การฉายแผนที่แลมเบิร์ตคอนฟอร์มอลโคนิค; การฉายแผนที่เมอร์เคเตอร์แกนเอียง; สเกลแฟกเตอร์ร่วม; พีอาร์โอเจ

Tinnapop Mashimapiro[1], Deeboon Methakullachat[2] and Phisan Santitamnont[3]
[1*] Graduate Student, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.
[2] Surveying and Mapping Society of Thailand
[3] Associate Professor, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

ABSTRACT

The Universal Transverse Mercator (UTM) projection is widely used in design and construction projects in Thailand. However, in some areas, it may introduce linear distortions of up to 965 ppm. Therefore, the linear distortion caused by the UTM projection is considered a significant systematic error. This study investigates the design of Low Distortion Projections (LDP) at the provincial level, including Transverse Mercator (TM), Lambert Conformal Conic Projection (LCC), and Oblique Mercator (OMC). The research highlights the importance of "urban areas," where construction frequently occurs. These areas often have terrain elevations higher or lower than the average topographic surface, necessitating the development of a provincial LDP with a Combined Scale Factor (CSF) between -20 ppm and +20 ppm, covering over 80% of urban areas.Furthermore, an optimal balance for construction project LDPs is sought, with CSF values ranging between -10 ppm and +10 ppm.Using Phayao Province as a case study, specifically the Denchai - Chiang Rai - Chiang Khong railway project, Contract 2 (Ngao - Chiang Rai section), it was found that the Transverse Mercator LDP was the most suitable. This projection resulted in a provincial CSF range of -18 to +17 ppm and a project-specific CSF range of -8 to +8 ppm. Horizontal and vertical distortions were also analyzed using LDP parameters from control points within the project. The results revealed horizontal and vertical deviations ranging from -6 to +6 millimeters, demonstrating that a combined scale factor was unnecessary in practice. Selecting an appropriate LDP can significantly reduce errors in design and construction caused by map distortions. It is anticipated that Low Distortion Projections will play a more prominent role in Thailand's construction industry in the future.

KEYWORDS: Low Distortion Map Projection; Transverse Mercator Projection; Lambert Conformal Conic Projection; Oblique Mercator Projection; Combined Scale Factor; PROJ

1. บทนำ

ปัจจุบันงานออกแบบและงานก่อสร้างโครงการต่าง ๆ ในประเทศไทยถูกกำหนดให้ใช้ระบบการฉายแผนที่ยูนิเวอร์ซัลทรานสเวอร์สเมอร์เคเตอร์ หรือ ยูทีเอ็ม (Universal Transverse Mercator : UTM) การฉายแผนที่ยูทีเอ็มที่เป็นมาตรฐานสากล พื้นที่ประเทศไทยอยู่ในพื้นที่การฉายแผนที่ยูทีเอ็ม 2 โซนคือโซน 47 และโซน 48 การฉายแผนที่ยูทีเอ็มในแต่ละโซนกำหนดให้ค่าสเกลแฟกเตอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9996 ถึง 1.0001 หรือคิดเป็นความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นในโซนใด ๆ สูงสุดได้ถึง 1 : 10,000 หรือ 1,000 ppm ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นเป็นสัดส่วนของระยะทางราบที่รังวัดได้บนพื้นผิวโลกที่ลดทอนเป็นระยะทางบนระนาบพื้นผิวทรงรีของโลกเรียกว่า “True Distance” เทียบกับระยะทางบนระนาบแผนที่เรียกว่า “Grid Distance” ในขณะที่ความคลาดเคลื่อนของการรังวัดสมัยใหม่ การรังวัดเส้นฐาน GNSS อาจคลาดเคลื่อนเพียง 1 ถึง 10 ppm หรือการรังวัดพิกัดด้วยกล้องประมวลผลรวม (Total Station) ในระยะทางไม่เกิน 250 เมตร คลาดเคลื่อนได้ 5 มิลลิเมตร คิดเป็นความคลาดเคลื่อนเชิงเส้น 20 ppm เป็นต้น ดังนั้นความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นที่เป็นผลจากการฉายแผนที่ยูทีเอ็ม ถือได้ว่าเป็นความคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ ทำให้งานออกแบบ การรังวัด และการคำนวณในงานก่อสร้างจะต้องมีการคำนวณความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นจากการฉายแผนที่ยูทีเอ็มอย่างระมัดระวังและไม่สามารถหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่นี้ได้ในทุกขั้นตอนการก่อสร้าง สำหรับตัวอย่างการประยุกต์ใช้การฉายแผนที่ชนิดความเพี้ยนต่ำในประเทศไทย คือ การดำเนินการในโครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน (กรุงเทพฯ - นครราชสีมา) โดยใช้การฉายแผนที่ทรานเวอร์สเมอเคเตอร์บนพื้นหลักฐาน WGS84 (WGS-TM) พร้อมแบ่งโซนการฉายแผนที่ออกเป็น 4 โซน เรียกว่า The First/Second/Third/Fourth Construction Coordinate Systems ตลอดระยะทางการออกแบบและ

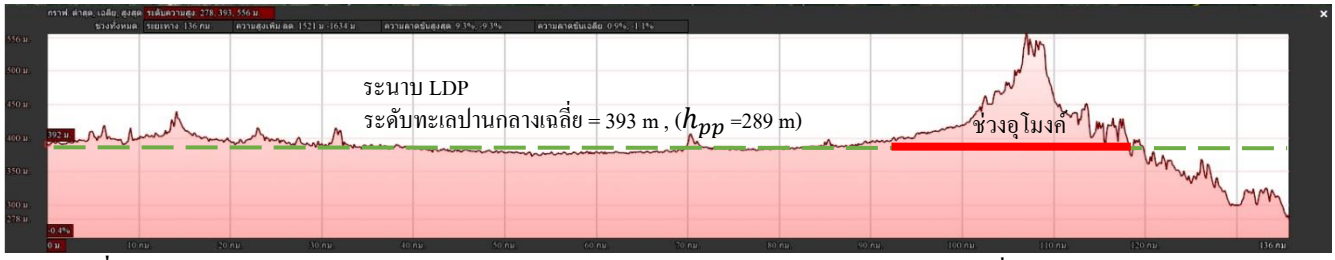
ก่อสร้างรถไฟความเร็วสูง 250 กิโลเมตร ในการออกแบบและประยุกต์การฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำและดำเนินการก่อสร้างพบว่า ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (Combined Scale Factor : CSF) ที่เกิดขึ้นในโครงการฯ มีความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นต่ำสุดไม่เกิน -3 ppm สูงสุดไม่เกิน +17 ppm ถือว่าเป็นผลการออกแบบที่ดีมากและส่งผลให้กระบวนการก่อสร้างได้รับความสะดวกและเกิดประสิทธิภาพในการก่อสร้าง [1] แต่ยังไม่ถือว่ามีความสมดุลของการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำเนื่องจากค่า CSF สาเหตุเกิดจากระยะห่างจากเมอริเดียนศูนย์กลาง (Central Meridian : CM) ที่แปรเปลี่ยนมากเกินไป หรือโครงสร้างในงานก่อสร้างลึกลงใต้ดินหรือสูงจากพื้นดินมากเกินไป ซึ่งในกรณีที่มีความสมดุลของการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำควรจะมีค่า CSF อยู่ระหว่าง -10 ppm ถึง +10 ppm

การออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำของแต่ละจังหวัดมีความมุ่งหมายให้รูปแบบการฉายแผนที่เลือกใช้ในจังหวัดนั้น ๆ มีระนาบการฉายแผนที่เข้าใกล้ระนาบเฉลี่ยของภูมิประเทศที่ต้องการออกแบบและก่อสร้าง โดยจะพิจารณาความเป็น “เมือง” [2] เพื่อหาเมอริเดียนศูนย์กลางที่เหมาะสม เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวจะมีโอกาสเกิดงานก่อสร้างบ่อยครั้ง การที่ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วมมีขนาดเล็กทำให้การปฏิบัติงานในพื้นที่ก่อสร้าง การรังวัดทำแผนที่ก่อสร้าง การกำหนดจุดก่อสร้างงาน (Setting Out) รวมไปถึงการเขียนแบบชิ้นงานโยธาเพื่อนำไปก่อสร้างในพื้นที่ก่อสร้างหรือนำไปผลิตชิ้นงานโครงสร้างจากโรงงาน ไม่มีการลดทอนระยะ และไม่มีความแตกต่างของขนาดแผนที่และขนาดงานก่อสร้างจริงในพื้นที่ ทำให้การใช้เครื่องมือรังวัดสำรวจและการคำนวณทำได้ง่ายสำหรับการสำรวจบนระนาบราบ (Plane Surveying) ที่ไม่มีความแตกต่างของสเกลทางราบและทางดิ่งอย่างกรณีของระบบพิกัดยูทีเอ็มอีกต่อไป [3]

2. การหาจุดสมดุลของการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำ

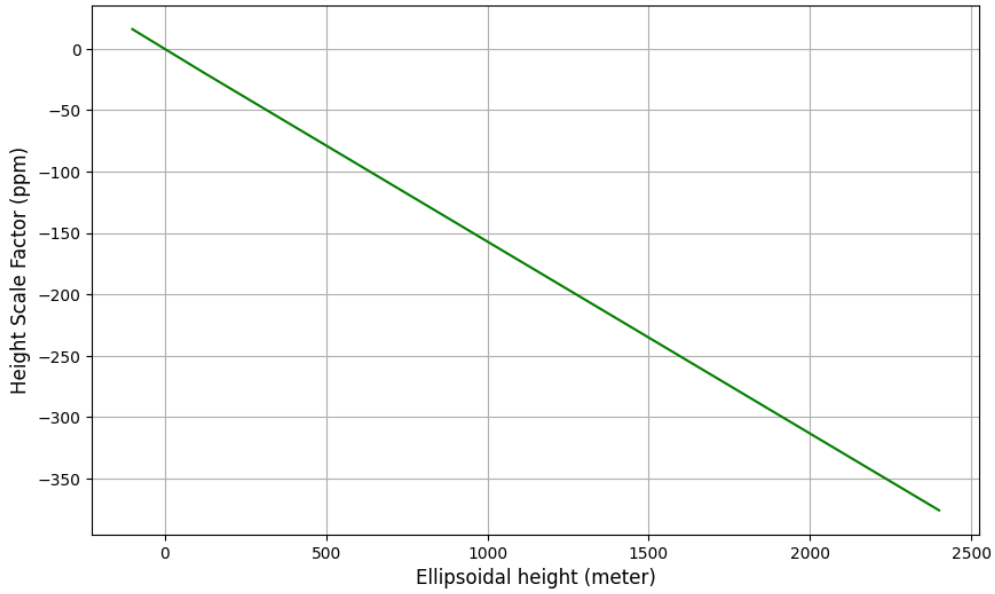
ในงานวิจัยได้ศึกษาการออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำสำหรับประเทศไทยรายจังหวัด ประยุกต์ใช้การฉายแผนที่ชนิดคงรูป (Conformal Map Projection) ที่มีให้เลือกหลายรูปแบบ ซึ่งครอบคลุมการฉายแผนที่ชนิดคงรูป 3 ชนิด ได้แก่ การฉายทรานเวอร์สเมอเคเตอร์ (Transverse Mercator : TM) การฉายแลมเบิร์ตคอนฟอร์มอลโคนิค (Lambert Conformal Conic Projection : LCC) และการฉายเมอร์เคเตอร์แกนเอียง (Oblique Mercator : OMC) [4] การหาจุดสมดุลของการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำเป็นการหาค่าสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ (k_0) ของการออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำของจังหวัด โดยที่ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) มีค่าน้อยกว่า ±20 ppm ครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 80% ของพื้นที่ที่มีประชากรหนาแน่นหรือพื้นที่ราบที่มีโอกาสเกิดโครงการก่อสร้างในจังหวัดนั้น ๆ ซึ่งจะต้องคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ (k_0) วนซ้ำไปเรื่อย ๆ เพื่อทราบความสูงต่างของความสูงเหนือทรงรีเฉลี่ยของพื้นที่ (h_{pp}) ในจังหวัด จากนั้นก็ทำการออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำของโครงการก่อสร้างโดยการคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ (k_0) วนซ้ำไปเรื่อย ๆ เพื่อทราบความสูงต่างของความสูงเหนือทรงรีเฉลี่ยของพื้นที่ (h_{pp}) ให้มีค่าสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ (k_0) เทียบเคียงและตรงกับการออกแบบการฉายแผนที่ของจังหวัด แล้วนำมาคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) ซึ่งจะต้องมีค่าน้อยกว่า ±10 ppm ครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 80% ของพื้นที่โครงการก่อสร้างทั้งหมด ผลลัพธ์ก็คือ จะได้ค่าสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ (k_0) และความสูงเหนือทรงรีเฉลี่ยของพื้นที่ (h_{pp}) ของจังหวัดและโครงการก่อสร้างในจังหวัดนั้น ๆ ที่ตรงกัน ผลลัพธ์จากการออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำ ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) ของจังหวัดมีค่าน้อยกว่า ±20 ppm ครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 80% ของพื้นที่ และมีค่าน้อยกว่า ±10 ppm ครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 80% ของพื้นที่โครงการก่อสร้างทั้งหมดในงานวิจัยจะเริ่มจากการใช้ค่าระดับทะเลปานกลางเฉลี่ย (h_{topo}) ดังรูปที่ 1 ที่มีค่าเท่ากับ 393 เมตร และรัศมีโลกเฉลี่ยของพื้นที่จังหวัด (R) มาคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์เนื่องจากความสูงเหนือทรงรีโลก (HSF) จากนั้นนำค่าระดับเหนือทรงรีเฉลี่ยของพื้นที่ (h_{pp}) ดังรูปที่ 1 ที่มีค่าเท่ากับ 289 เมตร มาคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ (k_0) และสุดท้ายนำค่า HSF และ k_0

มาคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) [2] ของจังหวัดแล้วนำพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้ออกแบบการฉายแผนที่มาหาจุดสมดุลของการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำของโครงการก่อสร้าง



รูปที่ 1 รูปตัดภูมิประเทศโครงการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย - เชียงราย - เชียงของ สัญญาที่ 2 (ช่วงงาว - เชียงราย)

ประเทศไทยมีค่าระดับทะเลปานกลางต่ำที่สุดและสูงที่สุดอยู่ที่จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ และยอดดอยอินทนนท์ อยู่ที่ประมาณ 0 เมตร และ 2,500 เมตรตามลำดับ แต่ในงานก่อสร้างส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีค่าระดับไม่เกิน 1,000 เมตร จากการคำนวณค่า HSF พบว่าจะเปลี่ยนไปทุก ๆ 1 ppm เมื่อมีความสูงต่าง 6 เมตร ดังรูปที่ 2 ดังนั้นหากเลือกรูปแบบการฉายแผนที่ที่เหมาะสม ค่า HSF ที่มีค่าเป็นลบก็จะไปชดเชยค่าสเกลแฟกเตอร์จากการฉายแผนที่ที่เป็นบวกได้



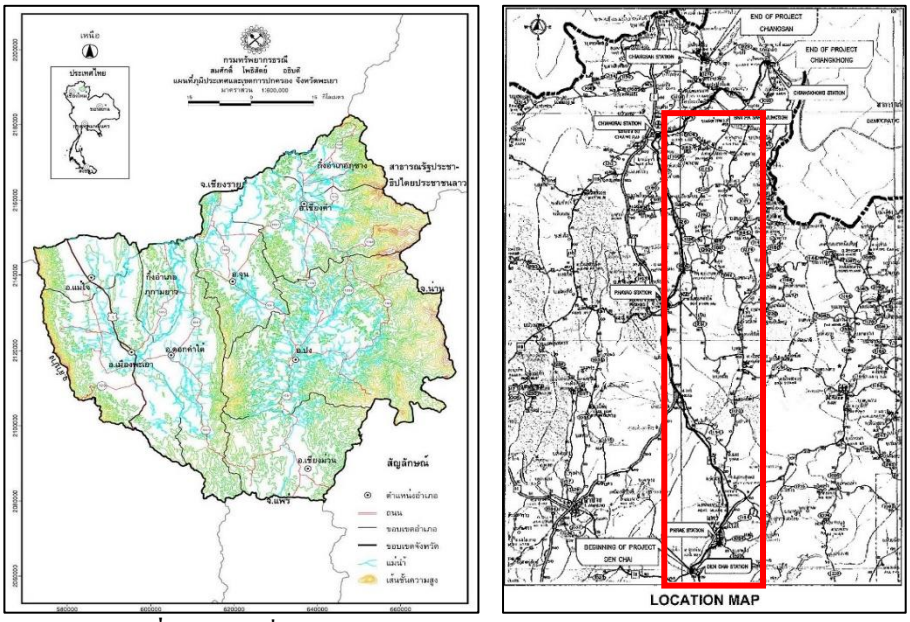
รูปที่ 2 สเกลแฟกเตอร์ที่เกิดจากความสูงต่างภูมิประเทศสำหรับประเทศไทย

3. ขั้นตอนการวิเคราะห์การออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำและกำหนดพารามิเตอร์

งานวิจัยได้ใช้ซอฟต์แวร์ช่วยการออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำด้วยภาษาไพธอน มีการเรียกใช้ซอฟต์แวร์ไลบารี่ PyProj [5] ที่พัฒนาบนพื้นฐานซอฟต์แวร์การคำนวณงานยีออเดซีและการฉายแผนที่ที่ใช้มานานและน่าเชื่อถือสูงชื่อ “PROJ” ในการออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำ จะใช้พื้นหลักฐานสากล คือ Geodetic Reference System 1980 (GRS80) [6] เลือกใช้การฉาย

แผนที่ชนิดคงรูป (Conformal Map Projections) ใช้แบบจำลองระดับ SRTM15 + V2.1 [7] ช่วยวิเคราะห์ลักษณะของภูมิประเทศและค่าแก้ยีออยด์อันดูเลชั่นจากแบบจำลอง Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) [8]

จังหวัดพะเยาได้ถูกรับเลือกให้เป็นตัวอย่างในการออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำเนื่องจากมีงานก่อสร้างที่กำลังดำเนินการอยู่ภายในจังหวัดได้แก่ โครงการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย - เชียงราย - เชียงของ สัญญาที่ 2 (ช่วงงาว - เชียงราย) ดังรูปที่ 3 มีความยาวตามทางก่อสร้างประมาณ 135 กิโลเมตร พาดผ่านจังหวัดพะเยาไปจนถึงเชียงราย การวางตัวในแนวก่อสร้างจะมีลักษณะทิศใต้ไปยังทิศเหนือค่าระดับตลอดแนวก่อสร้างส่วนใหญ่จะมีค่าระดับที่ใกล้เคียงกัน อยู่ในระดับที่ประชากรอาศัยอยู่ได้ เมื่อได้ออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำของจังหวัดแล้ว ก็จะนำมาประยุกต์ใช้กับโครงการดังกล่าว จังหวัดพะเยามีพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 6,335 ตารางกิโลเมตร มีความกว้างเฉลี่ยประมาณ 64 กิโลเมตรและความยาวเฉลี่ยประมาณ 145 กิโลเมตร ค่าระดับเฉลี่ยของจังหวัดอยู่ที่ 394.68 เมตร

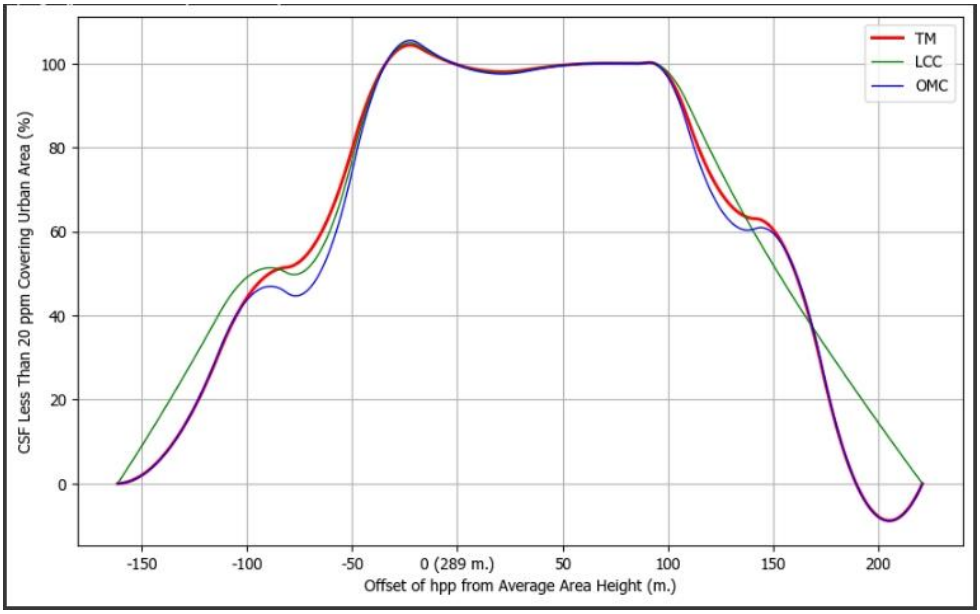


รูปที่ 3 แผนที่ภูมิประเทศและเขตการปกครอง จังหวัดพะเยา (ซ้าย)
ขอบเขตโครงการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย - เชียงราย - เชียงของ สัญญาที่ 2 (ช่วงงาว - เชียงราย) (ขวา)

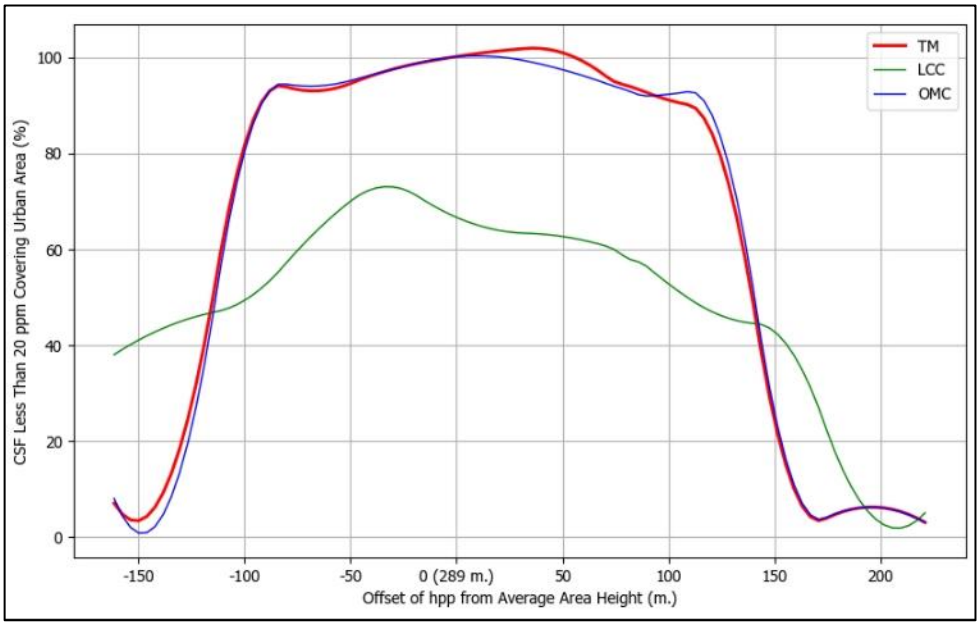
ในงานวิจัยจะใช้ข้อมูลความหนาแน่นประชากร WorldPop [9] จากคณะภูมิศาสตร์และวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเซาแทมป์ตัน ข้อมูลที่ใช้จะเป็นปี ค.ศ.2020 จำนวนประชากรต่อพิกเซล มีความละเอียดอยู่ที่ 100 ตารางเมตร ข้อมูลที่ใช้ระบุตำแหน่งและความหนาแน่นประชากรจะเป็นค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ พื้นหลักฐาน WGS84 การวิเคราะห์ความเป็นเมืองจังหวัดพะเยามีจุดสุ่มวิเคราะห์รวมกัน 54,166 จุด ซึ่งจุดสุ่มมีระยะห่างจุดละ 10 เมตร ในจำนวนนี้จุดที่มีประชากรน้อยกว่าควอนไทล์ 20% คือมีจำนวนประชากรในกริด 5 ถึง 35 คนที่เรียกว่า “พื้นที่เมือง” จุดแสดงพื้นที่เมืองนับรวมได้ 524 จุด คิดเป็น 8% ของพื้นที่ทั้งหมด ตัวเลขบอกนัยยะว่า การตั้งถิ่นฐานของประชากรจังหวัดพะเยาค่อนข้างมีความกระจุกตัวและลักษณะกระจายอยู่อาศัยเบาบาง เมื่อออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำของจังหวัดพะเยาแล้วพบว่าค่า CSF มีค่าน้อยกว่า ±10 ppm อยู่ในบริเวณพื้นที่ที่มีประชากรหนาแน่นหรือพื้นที่เมืองครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 80% ซึ่งมีค่า h_{pp} อยู่ระหว่าง 252 ถึง 390 เมตร หมายความว่าค่าสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ (k_0) จะอยู่ระหว่าง 1.000040 ถึง 1.000060 ดังรูปที่ 4

เมื่อหาจุดสมดุลการฉายแผนที่ของโครงการฯ โดยใช้พารามิเตอร์การฉายแผนที่ของจังหวัดพะเยา โดยใช้จุดสุ่ม 270 จุด ซึ่งอยู่บนแนวก่อสร้างตลอดโครงการฯ มีระยะห่างกันทุก ๆ 500 เมตร พบว่า ค่า CSF มีค่าน้อยกว่า ±10 ppm ที่อยู่ในบริเวณพื้นที่ก่อสร้างครอบคลุมมากกว่า 80% มีค่า h_{pp} อยู่ระหว่าง 189 ถึง 410 เมตร ซึ่งยังอยู่ในช่วงค่าระดับเฉลี่ยจังหวัดพะเยาและระดับเฉลี่ยของโครงการคือ 394.68 เมตรและ 393 เมตรตามลำดับ ดังรูปที่ 5

เนื่องจากภายในโครงการฯ มีค่าความสูงของภูมิประเทศเฉลี่ยอยู่ที่ 393 เมตร แต่พื้นที่ส่วนใหญ่ตลอดแนวของโครงการฯ เป็นที่ราบลุ่ม ค่าความสูงของภูมิประเทศดังกล่าวจึงสูงกว่าพื้นที่ส่วนใหญ่เนื่องจากมีความสูงจากภูเขาช่วงต้นโครงการฯ อีกทั้งยังมีการก่อสร้างทางรถไฟที่ต้องเจาะอุโมงค์ภูเขาบริเวณกลางของโครงการประมาณ 10 กิโลเมตร ดังนั้นในการกำหนดค่าสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ (k_0) จะต้องคำนึงถึงค่าระดับของพื้นที่ส่วนใหญ่และพื้นที่ภายในอุโมงค์ ซึ่งจะต้องมาคำนวณและวิเคราะห์กับค่าความสูงของภูมิประเทศของโครงการฯ โดยข้อมูลดังกล่าวจะได้จากการคำนวณค่าระดับเฉลี่ย Profile Grade ของแนวก่อสร้าง คือ 391.630 เมตร และผลการคำนวณค่า h_{pp} คือ 289 เมตร ดังรูปที่ 6 และสรุปพารามิเตอร์การฉายแผนที่ทั้ง 3 รูปแบบดังตารางที่ 1



รูปที่ 4 ผลการเปรียบเทียบร้อยละของค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วมและความสูงภูมิประเทศแต่ละระดับของจังหวัดพะเยา



รูปที่ 5 ผลการเปรียบเทียบร้อยละของค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วมและความสูงภูมิประเทศแต่ละระดับของจังหวัดพะเยาเมื่อนำมาหาจุดสมดุลของการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำของโครงการฯ

```
*** [1] Topography Reviewing ... ***
       MSL  UNDUL  HAE  HSF
count  504    504  504  504
mean   393    -38  289  -56
std     37      0   37    6
min    281    -38  203  -79
25%    381    -38  303  -57
50%    389    -38  301  -55
75%    402    -38  313  -54
max    539    -38  451  -38
============================================================
Mean topo MSL over ROI : 393  m.
Mean topo HAE over ROI : 289 m.
k_0 PP coincided with topo : 1.0000500 (exact 7-digit)
```

รูปที่ 6 ผลการคำนวณค่าความสูงเหนือทรงรีเฉลี่ย (HAE) ของพื้นที่และค่าสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ (k_0)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ตามนิยามการฉายแผนที่ PROJ ของจังหวัดพะเยาที่เกิดจากการหาจุดสมดุลของโครงการฯ

CODE	PROJ PARAMETER
TMC	proj=tmerc +lat_0=0° +lon_0=100°11′ +k_0=1.000050 +x_0=+35000 +y_0=-2000000 +a=6378137 +b=6356752.3142 +units=m
LCC	proj=lcc +lat_0=19°14′ +lon_0=100°11′ +k_0=1.000050 +x_0=35000 +y_0=-2000000 +a=6378137 +b=6356752.3142 +units=m
OMC	proj=omerc +lat_0=0° +lon=100°11′ +k_0=1.000050 +x_0=+35000 +y_0=-2000000 +alpha= -2 +a=6378137.0 +b=6356752.3142 +units=m +no_defs

การใช้งานค่าพารามิเตอร์การฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำ จะใช้แค่ 5 ค่าเท่านั้น ได้แก่ เส้นขนานละติจูด (lat_0), เส้นเมอริเดียนกลางหรือ Central Meridian (lon_0),ค่าสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ (k_0), False Easting (x_0) และ False Northing (y_0) สำหรับค่า lat_0 และ lon_0 จะแสดงค่าเป็นองศาและลิปดา ค่า k_0 จะแสดงทศนิยม 6 หลัก ค่า x_0 และ y_0 จะเป็นค่าการเลื่อนค่าพิกัดของศูนย์กำเนิดแผนที่ ซึ่งจะช่วยให้ตัวเลขแยกออกจากระบบพิกัดยูทีเอ็มอย่างเห็นได้ชัด ไม่สับสนระหว่างแกนตะวันออกและแกนเหนือ

4. ผลการวิเคราะห์การประยุกต์ใช้การฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำ

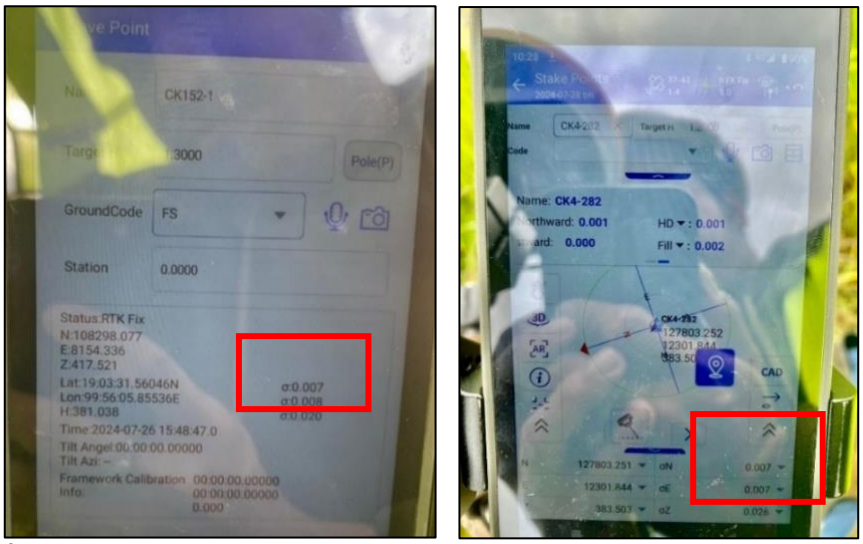
เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ในซอฟแวร์ คำนวณค่าพิกัดของหมุดควบคุมภายในโครงการฯพร้อมค่า ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) ที่คำนวณได้ในแต่ละจุดตามรูปแบบการฉายแผนที่ ผลลัพธ์จะแสดงค่าสเกลแฟกเตอร์เนื่องจากการฉายแผนที่ (PSF) และค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) การฉายทรานเวอร์สเมอเคเตอร์มีค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยอยู่ที่ 58 และ 3 ppm ตามลำดับ การฉายแลมเบิร์ตคอนฟอร์มอลโคนิคมีค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยอยู่ที่ 67 และ 11 ppm ตามลำดับ และการฉายเมอร์เคเตอร์แกนเอียงมีค่าสเกลแฟกเตอร์เฉลี่ยอยู่ที่ 64 และ8 ppm ตามลำดับ

การฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำ ของจังหวัดพะเยา ประยุกต์ใช้กับโครงการก่อสร้างทางรถไฟสายเด่นชัย - เชียงราย - เชียงของ สัญญาที่ 2 (ช่วงงาว - เชียงราย) จะกำหนดพารามิเตอร์นิยามการฉายแผนที่เหมือนจังหวัดพะเยา เมื่อออกแบบการฉายแผนที่แล้วพบว่า การฉายแผนที่ชนิดทรานเวอร์สเมอเคเตอร์ (TM) และเมอร์เคเตอร์แกนเอียง (OMC) เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้กับ

โครงการก่อสร้างดังกล่าว การฉายแผนที่ชนิดแลมเบิร์ตคอนฟฟอร์มอลโคนิค (LCC) แม้จะสามารถครอบคลุมพื้นที่เมืองมากกว่า 80% ด้วยค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) ที่น้อยกว่า ±20 ppm ได้เช่นกัน แต่พบว่าความสูงเฉลี่ยของพื้นที่ (h_{pp}) ในช่วง 395-450 เมตร ทำให้ความแม่นยำและการครอบคลุมพื้นที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการฉายแผนที่แบบทรานเวอร์สเมอเคเตอร์ ดังนั้น การฉายแผนที่แบบทรานเวอร์สเมอเคเตอร์จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุดสำหรับจังหวัดพะเยา เนื่องจากสามารถลดความเพี้ยนของแผนที่ได้ดี ครอบคลุมพื้นที่สำคัญ และใช้งานง่ายมากกว่า งานวิจัยได้ทดสอบใช้ค่าพิกัดหมุดควบคุมภายในโครงการฯ จากการออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำรูปแบบทรานเวอร์สเมอเคเตอร์ โดยใช้ค่าพิกัดของหมุดควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ หมุดควบคุมที่นำมาใช้ได้แก่ CK152-1,CK152-2,CK4-281,CK4-282,CK4-283,CK4-284 จะอยู่บริเวณกลางโครงการฯ ส่วนหมุดที่เหลือและพื้นที่ที่เหลือไม่สามารถเข้าได้ เนื่องจากพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ระหว่างก่อสร้าง ไม่สามารถเข้าไปได้และในช่วงเวลาที่ทดสอบอยู่ในช่วงฤดูฝน การทดสอบจะใช้เครื่องมือ 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (GNSS) และ กล้องประมวลผลรวม (Total Station) ดังรูปที่ 7

รูปที่ 7 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (ซ้าย) กล้องประมวลผรวม(ขวา)

การทดสอบความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งของหมุดควบคุมกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (GNSS) โดยใช้พารามิเตอร์นิยามการฉายแผนที่ที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งการใช้งานพารามิเตอร์ดังกล่าว จะต้องป้อนใส่เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ต้องการใช้งานทุกเครื่อง จากการทดสอบความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งของหมุดควบคุมกับ GNSS ดังรูปที่ 8 พบว่าความคลาดเคลื่อนทางราบอยู่ในระดับมิลลิเมตรและความคลาดเคลื่อนทางดิ่งอยู่ในระดับมิลลิเมตรถึงเซนติเมตร ดังตารางที่ 3 ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนของการรังวัดเส้นฐาน GNSS ที่มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 1 ถึง 10 ppm จึงมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบความคลาดเคลื่อนโดยใช้ GNSS



รูปที่ 8 ความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งของหมุดควบคุม CK152-1 (ซ้าย) CK4-282 (ขวา)

ตารางที่ 2 ความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งของหมุดควบคุมทางราบที่ได้ทดสอบ

Name	Design			As-Built			Diff.N (m.)	Diff.E (m.)	Diff.Elev. (m.)
	Northing (m.)	Easting (m.)	Elev. (m.)	Northing (m.)	Easting (m.)	Elev. (m.)			
CK152-1	108298.083	8154.353	417.522	108298.082	8154.357	417.525	0.001	-0.004	-0.003
CK152-2	108386.951	8132.280	417.365	108386.958	8132.281	417.359	-0.007	-0.001	0.006
CK4-281	127655.414	12246.790	383.475	127655.419	12246.790	383.480	-0.005	0.000	-0.005
CK4-282	127803.252	12301.844	383.505	127803.246	12301.837	383.505	0.006	0.007	0.000
CK4-283	128406.371	12459.176	383.423	128406.373	12459.176	383.428	-0.002	0.000	-0.005
CK4-284	128328.037	12587.121	383.586	128328.032	12587.127	383.571	0.005	-0.006	0.016

ในการทดสอบความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งของสิ่งก่อสร้าง จะใช้กล้องประมวลผลรวม (Total Station) ใช้เฉพาะพารามิเตอร์ ค่าสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ (k_0) คือ 1 จะใช้วิธีเก็บข้อมูลแบบ Non-Prism เนื่องจากอุปสรรคการเข้าถึงสิ่งก่อสร้างมีน้ำขังโดยรอบ ในส่วนของข้อมูลตำแหน่งทางราบและทางดิ่งของสิ่งก่อสร้างจะใช้ข้อมูลที่ขอความอนุเคราะห์จากโครงการฯ ซึ่งเป็นข้อมูลเพื่อการออกแบบ แล้วนำมาคำนวณใหม่โดยใช้พารามิเตอร์การฉายแผนที่จากตารางที่ 2 ซึ่งเป็นค่าเดียวกันกับที่ได้คำนวณข้อมูลของหมุดควบคุม จากการทดสอบความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งของคานขวางของสะพานและท่อคอนกรีตเหลี่ยมพบว่าความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งอยู่ในระดับเซนติเมตรดังตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งของคานขวางของสะพาน (Cross Beam)

Name	Design			As-Built			Diff.N (m.)	Diff.E (m.)	Diff.Elev. (m.)
	Northing (m.)	Easting (m.)	Elev. (m.)	Northing (m.)	Easting (m.)	Elev. (m.)			
P71-451	108233.462	8249.724	424.854	108233.450	8249.755	424.850	0.012	-0.031	0.004
P71-452	108236.280	8258.064	424.854	108236.265	8258.033	424.837	0.015	0.031	0.017
P71-453	108234.291	8258.736	424.854	-	-	-	-	-	-
P71-454	108231.472	8250.397	424.854	108231.513	8250.394	424.830	-0.041	0.003	0.024
P72-451	108261.893	8240.116	424.554	108261.883	8240.121	424.511	0.010	-0.005	0.043
P72-452	108264.711	8248.456	424.554	-	-	-	-	-	-
P72-453	108262.721	8249.129	424.554	108262.739	8249.108	424.526	-0.018	0.021	0.028
P72-454	108259.903	8240.788	424.554	108259.931	8240.794	424.531	-0.028	-0.006	0.023

ตารางที่ 4 ความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่งของคานขวางของท่อคอนกรีตเหลี่ยม (Box Culvert)

Name	Design			As-Built			Diff.N (m.)	Diff.E (m.)	Diff.Elev. (m.)
	Northing (m.)	Easting (m.)	Elev. (m.)	Northing (m.)	Easting (m.)	Elev. (m.)			
RCB-8-1	127847.393	12253.015	386.450	127847.387	12253.014	386.390	0.006	0.001	0.060
RCB-8-2	127842.137	12270.759	386.350	-	-	-	-	-	-
RCB-8-3	127837.341	12269.338	386.350	127837.349	12269.328	386.355	-0.008	0.010	-0.005
RCB-8-4	127842.597	12251.595	386.450	127842.567	12251.591	386.421	0.030	0.004	0.029
RCB-9-1	128422.872	12423.483	386.250	128422.7953	12423.5014	386.2409	0.077	-0.018	0.009
RCB-9-2	128417.616	12441.226	386.150	-	-	-	-	-	-
RCB-9-3	128412.820	12439.806	386.150	128412.8348	12439.7956	386.1144	-0.015	0.010	0.036
RCB-9-4	128418.076	12422.061	386.250	128418.0868	12422.1064	386.2405	-0.011	-0.045	0.010

ค่าความต่าง (Difference) ทางพิกัดทางราบและค่าระดับทางดิ่งของการทดสอบของหมุดควบคุมและสิ่งก่อสร้าง เกิดจากวิธีการทดสอบโดยวิธีการเก็บข้อมูลพิกัดและค่าระดับแบบ RTK จากเครื่องรับสัญญาณ GNSS และแบบ Non-Prism จากกล้องประมวลผลรวม จากผลการทดสอบสามารถยอมรับได้ เนื่องจากวิธีดังกล่าว มีความละเอียดในระดับเซนติเมตรซึ่งยอมรับได้ ดังนั้นสามารถใช้พารามิเตอร์การฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำไปประยุกต์ใช้ในงานให้ตำแหน่งสิ่งก่อสร้าง (Design) หรืองานเก็บตำแหน่งสิ่งก่อสร้าง (As-Built) ภายในโครงการก่อสร้าง

5. บทสรุปและประโยชน์ที่ได้จากการเลือกจุดสมดุลของการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำ

ในการหาจุดสมดุลของการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำจะต้องคำนึงถึง “พื้นที่เมือง” ของจังหวัดเป็นหลักเพราะเป็นพื้นที่ที่มีประชากรหนาแน่นและมีโอกาสที่จะเกิดงานก่อสร้างในอนาคต ซึ่งการหาจุดสมดุลของโครงการก่อสร้างในจังหวัดนั้น ๆ จะต้องมีค่า CSF น้อยกว่า ±10 ppm ครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 80% ของพื้นที่โครงการก่อสร้างทั้งหมด ทั้งนี้ค่า CSF จะขึ้นอยู่กับระดับความสูงต่างในพื้นที่โครงการก่อสร้างที่ต้องระมัดระวัง เช่น มีการก่อสร้างอุโมงค์หรือสิ่งก่อสร้างขนาดสูง มิเช่นนั้นจะต้องแบ่งพื้นที่เพื่อออกแบบการฉายแผนที่ชุดใหม่โดยไม่จำเป็น เมื่อหาจุดสมดุลได้ ก็จะได้พารามิเตอร์การฉายแผนที่ของโครงการก่อสร้าง ที่มาจากพารามิเตอร์การฉายแผนที่ของจังหวัด และในอนาคตหากมีโครงการก่อสร้างในจังหวัดเดียวกัน เพียงแค่ใช้ค่า h_{pp} ของโครงการก่อสร้างที่เหมาะสม ก็สามารถออกแบบการฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำที่ผลของค่า CSF อยู่ระหว่าง -10 ppm ถึง +10 ppm

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับแนวทางการทำงานวิจัย ถ่ายทอดความรู้ แนะนำองค์ความรู้การฉายแผนที่ และท่านยังให้คำแนะนำ

การใช้โปรแกรมซอฟแวร์การฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำ จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วง ทำให้บทความนี้มีความสมบูรณ์และสร้างแรงบันดาลใจให้ผู้เขียนพัฒนาและต่อยอดซอฟแวร์การฉายแผนที่ความเพี้ยนต่ำจนบรรลุผล

เอกสารอ้างอิง

[1] ไพศาล สันติธรรมนนท์, ประจวบ เรียบร้อย, ชาญชัย พัชรอาภา. ผลการศึกษาการฉายแผนที่ WGS-TM ในโครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน . วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 32 ฉบับที่ 2 พ.ศ.2563. หน้า 11-23.

[2] ไพศาล สันติธรรมนนท์, ประจวบ เรียบร้อย, ชาญชัย พัชรอาภา. การศึกษาศักยภาพการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำสำหรับประเทศไทย . วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 32 ฉบับที่ 2 พ.ศ.2564. หน้า 39-57.

[3] ไพศาล สันติธรรมนนท์, ถิรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์, บดินทร์ จุลนาค. หลักการออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำสำหรับโครงการ. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 33 ฉบับที่ 4 พ.ศ.2565. หน้า 47-65.

[4] Snyder, J.P. Map Projection: A Working Manual. Professional Paper, 1395, US Government Printing Office: Washington, 1987.

[5] PROJ contributors. PROJ coordinate transformation software library. Open-Source Geospatial Foundation.2024 URL https://proj.org/. DOI: 10.5281/zenodo.5884394

[6] Juliana P. Blackwell: State Plane Coordinate System of 2022 Policy Document, National Geodetic Survey, National Ocean Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019

[7] Tozer, B, Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., Olson, C., Beale, J. R., & Wessel, P. Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+. Earth and Space Science, 6, 1847, 2019. DOI: 10.1029/2019EA000658

[8] PAVLIS, N. K. et al. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). Journal of Geophysical Research, 2012, 117. DOI: 10.1029/2011JB008916

[9] WorldPop (www.worldpop.org - School of Geography and Environmental Science, University of Southampton). 2014. Thailand 100m Population. Alpha version 2010, 2015 and 2020 estimates of numbers of people per pixel (ppp) and people per hectare (pph), with national totals adjusted to match UN population division estimates (http://esa.un.org/wpp/) and remaining unadjusted. DOI: 10.5258/SOTON/WP00267