



หลักการออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำสำหรับโครงการ

DESIGN PRINCIPLES FOR LOW DISTORTION MAP PROJECTION OVER A PROJECT

ไพศาล สันติธรรมนนท์^{1*}, ธีรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์² และบดินทร์ จุลนาถ³

¹รองศาสตราจารย์, ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านการจัดการโครงสร้างพื้นฐาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²นิสิตมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

³นิสิตบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author, E-Mail: phisan.chula@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้เสนอหลักการออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ (Low Distortion Map Projection : LDP) สำหรับโครงการก่อสร้างพร้อมระบบซอฟต์แวร์ช่วยออกแบบการฉายแผนที่ ผู้ใช้สามารถออกแบบการฉายแผนที่โดยระบุเป็นสตริงส์ PROJ ที่นิยมใช้ในซอฟต์แวร์ GIS โดยทั่วไป ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาซอฟต์แวร์ออนไลน์เรียกใช้งานได้ที่ผ่านเว็บบราวเซอร์ Google Colab ชื่อว่า LDP_Colab เพื่อให้ผู้ใช้ได้ศึกษาหลักการออกแบบการฉายแผนที่ LDP แสดงผลการวิเคราะห์เป็นภาพแผนที่และนำผลลัพธ์ไปใช้จริง ระบบซอฟต์แวร์สามารถอ่านข้อมูลแนวเส้นทางแล้วกำหนดจุดสุ่มตามความละเอียดที่ผู้ใช้ต้องการ ซอฟต์แวร์ LDP_Colab จะช่วยวิเคราะห์ลักษณะของภูมิประเทศโดยการอ่านจากฐานข้อมูลจากแบบจำลองระดับ SRTM15+V2.1 และค่าแก้ไขฮอยดิงตันดูเลชันจากแบบจำลอง Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) จากนั้นนำไปผลิตค่าสเกลแฟกเตอร์เนื่องจากความสูงเหนือทรงรีโลก (HSF) แล้วนำไปคำนวณร่วมกับค่าสเกลแฟกเตอร์เนื่องจากการฉายแผนที่ (Point Scale Factor : PSF) เพื่อให้ได้ค่าสเกลแฟกเตอร์รวม (CSF) ที่ในภาพรวมคาดหวังให้ CSF มีค่าน้อยกว่า ± 20 ppm ภาพรวมของค่า CSF ในพื้นที่ศึกษาเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินผลการออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้กับโครงการเพียงใด ในงานวิจัยยังได้สรุปผลการประยุกต์ใช้การฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ (LDP) ร่วมกับการใช้ระบบพิกัดการฉายแผนที่ตามมาตรฐานเดิม เช่น ระบบพิกัดยูทีเอ็ม โดยมีข้อแนะนำและการชี้ประเด็นสำหรับแต่ละภาระงานว่าควรเลือกใช้ค่าพิกัดการฉายแผนที่แบบใด นอกจากนี้งานวิจัยยังได้ตรวจสอบความถูกต้องเชิงเลขและความเข้ากันได้ของนิยามการฉายแผนที่กับซอฟต์แวร์ GIS อื่น ๆ เช่น GeographicLib ที่ถือได้ว่ามีความละเอียดถูกต้องสูงสุด และ Global Mapper ที่นิยมใช้ในงานสำรวจทำแผนที่อย่างกว้างขวาง เป็นต้น

Phisan Santitamnont^{1*}, Thirawat Bannakulpihat² and Bodin Julnak³

¹Associate Professor, Center of Excellence in Infrastructure Management, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

²Master Student, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

³Graduate Student, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

คำสำคัญ: หลักการออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ(แอลดีพี); สเตลแพกเตอร์ร่วม(ซีเอสเอฟ) การฉายแผนที่ทรานสเวอร์สเมอร์เคเตอร์ (ทีเอ็ม); การฉายแผนที่แลมเบิร์ตคอนฟอร์มอลโคนิก (แอลซีซี); การฉายแผนที่เมอร์เคเตอร์แกนเฉียง (โอเอ็มซี); พีโออาร์โอเจ; พีโออาร์โอเจซิส ดับเบิลยูเคที

ABSTRACT

This research has defined the principles of design for Low Distortion Map Projection (LDP) for construction project and developed computer software aided map projection design. Designer could define map projection parameters by specify popular PROJ string format. A software system "LDP_Colab" under Google Colab has been developed for any users can immediately use without installation. The software reads user-defined corridors, produces sampling points within the area and visualizes map results. The LDP_Colab reads orthometric height from SRTM15+V2.1 dataset together with the Earth Gravitation Model 2008 (EGM2008) and produces height scale factor (HSF). According to map projection definitions, software calculates point scale factor (PSF) and then combined scale factor (CSF) over the study area. These CSF values should be within threshold of negligible ± 20 ppm. The result CSF for each LDPs will reflect the efficiency for further deployment in the surveying, design and construct works. The research has also analyzed how to optimally apply LDP with traditional UTM map projection in the project. The designated LDP definitions and calculated grid coordinates have been validated with other GIS software e.g., GeographicLib and Global Mapper to ensure numerical accuracy and map projection compatibility.

KEYWORD: Low Distortion Map Projection (LDP); Combined Scale Factor (CSF); Transverse Mercator Projection (TM); Lambert Conformal Conic Projection (LCC); Oblique Mercator (OMC); PROJ; PROJCS WKT

1. คำนำ

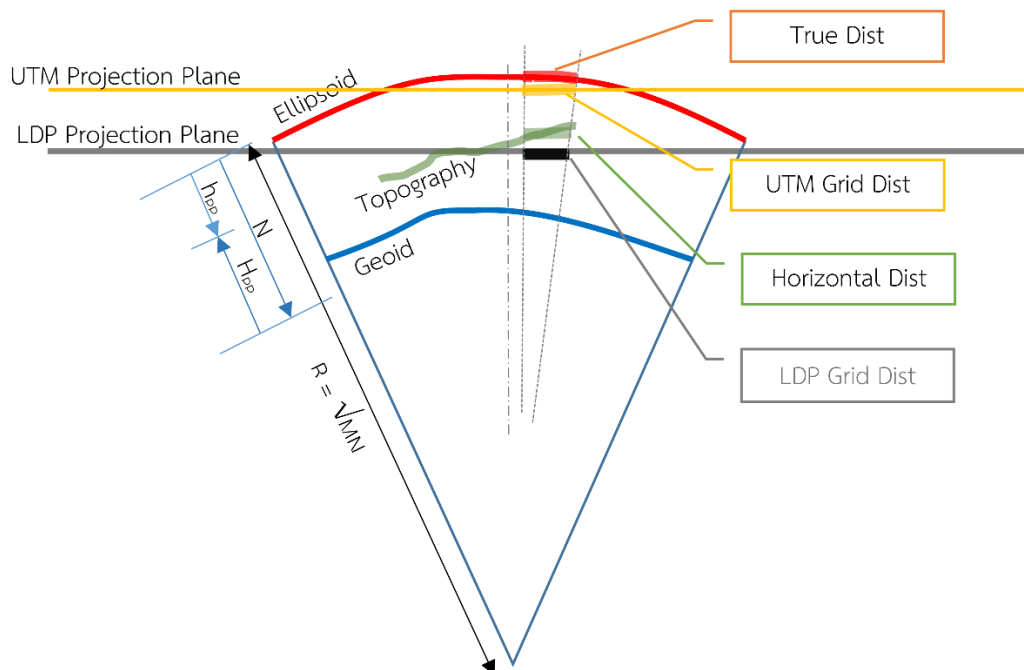
ในงานสำรวจเพื่อการออกแบบและการก่อสร้างโครงการวิศวกรรมประเทศไทยกำหนดให้ใช้การฉายแผนที่ (Map Projection) ชนิดยูนิเวอร์ซัลทรานสเวอร์สเมอร์เคเตอร์ หรือ ยูทีเอ็ม (Universal Transverse Mercator : UTM) การฉายแผนที่ชนิดยูทีเอ็มกำหนดให้ค่าสเตลแพกเตอร์ (k_0) มีค่าเท่ากับ 0.9996 ที่ตำแหน่งในแนวเมริเดียนศูนย์กลาง (Central Meridian : CM) เมื่อตำแหน่งโครงการอยู่ห่างออกมาและยิ่งเข้าใกล้เส้นศูนย์สูตรมากขึ้น เช่น บริเวณพื้นที่ใต้สุดของประเทศและก่อนไปทางตะวันออกสุดของจังหวัดนราธิวาสค่าสเตลแพกเตอร์จะมีค่าสูงถึง 1.001000 หรือคิดเป็นความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นได้ 1:1,000 หรือ 1,000 ppm (คิดเป็นความคลาดเคลื่อน 1 เมตรในระยะทาง 1 กิโลเมตร) การออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ (Low Distortion Map Projection : LDP) สำหรับโครงการ มีความมุ่งหมายให้รูปแบบการฉายแผนที่ที่เลือกใช้ในโครงการนั้น ๆ มีระนาบการฉายแผนที่เข้าใกล้ระนาบเฉลี่ยของภูมิประเทศที่ต้องการออกแบบและก่อสร้าง โดยจุดศูนย์กลางการฉายแผนที่อาจจะมีตำแหน่งโดยประมาณจากค่าเฉลี่ยกึ่งกลางของโครงการ และแกนกลางของการฉายแผนที่ลากผ่านตามแกนที่ยาวที่สุดของพื้นที่โครงการ ทำให้ผลรวมของค่าสเตลแพกเตอร์ที่เกิดเนื่องมาจากการฉายแผนที่ที่มักเรียกว่า Point Scale Factor (PSF) เมื่อนำไปคูณรวมกับค่าสเตลแพกเตอร์ที่เกิดจากพื้นที่ปฏิบัติงานที่อยู่สูงหรือต่ำกว่าระดับภูมิประเทศเฉลี่ย (Height Scale Factor : HSF) ที่ผู้ออกแบบได้เลือกเป็นระนาบการฉายแผนที่เพื่อให้ความผิดเพี้ยนต่ำ (LDP Project Plane) ในครั้งนี้ ผลการคำนวณรวมทำได้โดย “ผลคูณ” ของค่าสเตลแพกเตอร์ทั้ง

สอง เรียกว่า ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (Combined Scale Factor : CSF) [1] ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) นี้ยังสามารถเขียนในรูปแบบ ppm (Part per million) หากเราวิเคราะห์และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าสเกลแฟกเตอร์ผ่านความสัมพันธ์ระบบ ppm จะทำให้การคำนวณสะดวกยิ่งขึ้น โดยใช้ “ผลบวก” ดังสมการที่ (1) [2]

$$CSF_{ppm} = PSF_{ppm} + HSF_{ppm} \quad (1)$$

ในการออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำเราอาจกำหนดเป้าหมายการออกแบบว่า ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) จะมีขนาดไม่เกิน ± 20 ppm หรือไม่เกิน ± 20 มิลลิเมตรจากระยะทาง 1 กิโลเมตร ซึ่งการที่ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วมมีขนาดเล็กทำให้การปฏิบัติงานในพื้นที่ก่อสร้าง การรังวัดทำแผนที่ก่อสร้าง การกำหนดจุดก่อสร้างงาน (Setting out) การเขียนแบบชิ้นงานโยธาเพื่อนำไปก่อสร้างในพื้นที่ก่อสร้างหรือนำไปผลิตชิ้นงานโครงสร้างจากโรงงาน ทำได้อย่างตรงไปตรงมา ไม่มีความแตกต่างของสเกลแผนที่และสเกลงานก่อสร้างจริงในพื้นที่ ทำให้การใช้เครื่องรังวัดสำรวจและการคำนวณทำได้ง่ายสำหรับการสำรวจบนระนาบราบ (Plane surveying) ที่ไม่มีความแตกต่างของสเกลทางราบและทางตั้ง เช่น กรณีของระบบพิกัดยูทีเอ็มอีกต่อไป [2,3]

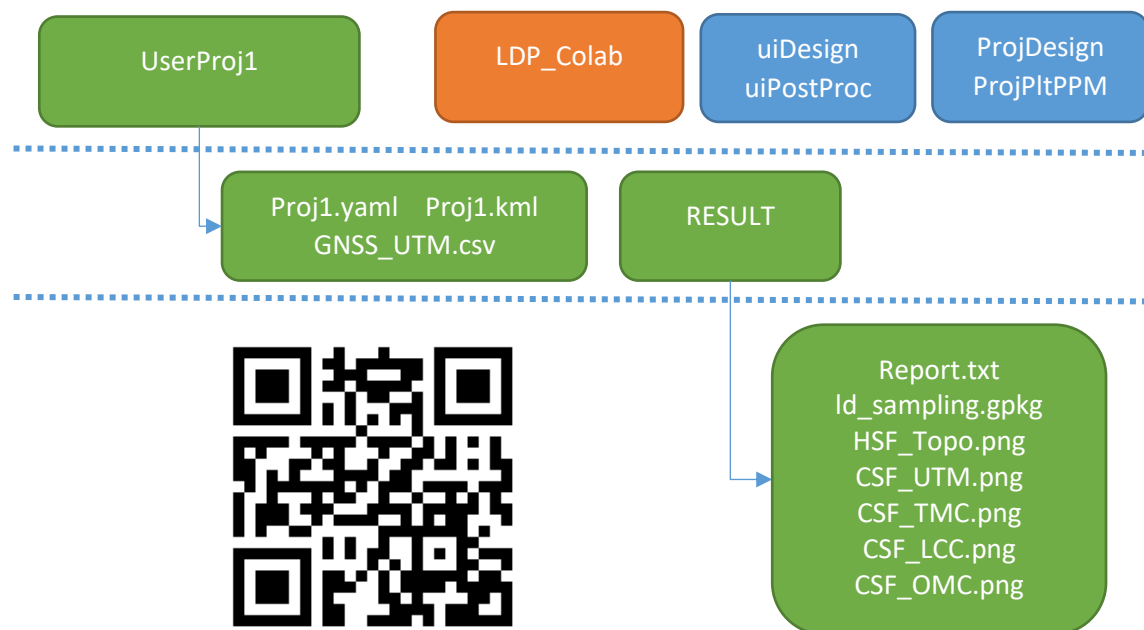
ในรูปที่ 1 แสดงความใกล้ชิดแนบสนิทของพื้นผิวการฉายแผนที่ความผิดเพี้ยนต่ำ (LDP Projection Plane) ที่ทำให้ค่าระยะทางรังวัดราบ (Horizontal distance) สามารถจะอนุโลมให้เป็นระยะทางแผนที่ความผิดเพี้ยนต่ำ (LDP grid distance) ได้ โดยไม่จำเป็นต้องนำค่าระดับของพื้นที่ปฏิบัติงานมาคิดคำนึงด้วย ในขณะที่ระนาบการฉายแผนที่ยูทีเอ็ม (UTM Projection Plane) ในมาตรฐานในปัจจุบันพื้นที่ปฏิบัติงานอาจมีค่าระดับห่างกว่าระนาบการฉายยูทีเอ็มมาก เมื่อมีการรังวัดในสนามหรืออ่านค่าระยะทางจากแบบก่อสร้างจึงจำเป็นต้องมีการนำระยะทางรังวัดราบไปทอนลงบนพื้นผิวทรงรีเป็นระยะจริง (True distance) เสียก่อน จากนั้นจะต้องมีการคำนวณสเกลแฟกเตอร์เนื่องจากค่าระดับ (HSF) และจึงคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) ได้ ซึ่งกระบวนการคำนวณเป็นมาตรฐานที่เราปฏิบัติกันในทุกวันนี้ได้สร้างความยุ่งยาก สุ่มเสี่ยงต่อความผิดพลาดพลั้งเผลอ ในขั้นตอนการคำนวณต่าง ๆ การป้อนค่าเข้าเครื่องมือสำรวจที่ยุ่งยาก การสื่อสารระหว่างกลุ่มงานต่าง ๆ ในขั้นตอนการออกแบบ การก่อสร้าง การควบคุมกำกับงานก่อสร้าง เป็นต้น



รูปที่ 1 การกำหนดระนาบการฉายแผนที่ UTM และ LDP เทียบกับภูมิประเทศ

2. ระบบซอฟต์แวร์ช่วยการออกแบบการฉายแผนที่

งานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบและพัฒนาระบบซอฟต์แวร์สำหรับช่วยในงานออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำสำหรับโครงการ เรียกชื่อว่า LDP_Colab ซอฟต์แวร์พัฒนาด้วยภาษาไพธอน มีการเรียกใช้ซอฟต์แวร์ไลบรารี PyProj ที่พัฒนาบนพื้นฐานซอฟต์แวร์การคำนวณงานข้อเชิงและการฉายแผนที่ที่มีใช้มานานและน่าเชื่อถือสูงชื่อ “PROJ” ซอฟต์แวร์ LDP_Colab ออกแบบให้เป็นซอฟต์แวร์เปิด (Open Source Software) ที่ผู้ใช้สามารถนำไปใช้งานทันทีหรือจะไปพัฒนาต่อยอดได้ ซอฟต์แวร์ LDP_Colab ติดตั้งไว้บนแพลตฟอร์มของระบบ Google Colab ทำให้ผู้ที่ประสงค์จะใช้งานสามารถเรียกใช้งานได้ทันที โครงสร้างซอฟต์แวร์ LDP_Colab แสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างระบบซอฟต์แวร์ช่วยออกแบบการฉายแผนที่ LDP_Colab

LDP_Colab เป็นซอฟต์แวร์ “Colab Notebook” เรียกใช้ Online ด้วย <https://qr.go.page.link/eXRZG> โดยจะเป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้ 2 โมดูล คือ

- uiDesign เป็นโมดูลอ่านไฟล์กำหนดรูปแบบการคำนวณการฉายแผนที่ในรูปแบบ “YAML” (อ่านว่า ยา-เมล) ตัวอย่างในรูปแบบคือไฟล์ Proj1.yaml
- uiPostProc เป็นโมดูลอ่านไฟล์กำหนดรูปแบบการคำนวณการฉายแผนที่ในรูปแบบ “YAML” เช่นเดียวกัน แต่โมดูลจะอ่านข้อมูลรายจุดในส่วนของ UTM_CSV เพื่อทำการแปลงพิกัด WGS84 UTM ให้เป็นระบบพิกัดในการฉาย LDP ได้ตามที่ได้ออกแบบไว้เพื่อนำไปใช้งาน

ในตัวอย่างปรากฏโฟลเดอร์ UserProj1 ที่มีไฟล์ กำหนดรูปแบบการคำนวณการฉายแผนที่ “YAML” ตัวอย่างไฟล์ Proj1.yaml ไฟล์ “YAML” จะประกอบไปด้วย Section, คู่ของคีย์-ค่า (Key-Value pair) อักษร “ชาร์ป #” ใช้สำหรับการคอมเมนต์ ตัวอย่างดังนี้

```

1 #
2 # Example for Low Distortion Projection design
3 #
4 KML      : DOH_107_CDOW.kml      # a linestring or a polygon in GE
5 GRID     : 2                     # 1 : 10, 2: 100, 3: 1000
6 BUFF     : 150                   # buffer for linestring
7
8 LDP :
9   TMC : +proj=tmerc +lat_0=19.55 +lon_0=99.06666666666666 +k_0=1.0000847
10        +x_0=+20000 +y_0=+70000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs
11
12   LCC : proj=lcc +lon_0=99.06666666666666 +lat_0=19.55
13        +lat_1=19.55 +k_0=1.0000847 +x_0=20000 +y_0=+60000
14        +ellps=GRS80 +units=m +no_defs
15
16   OMC : proj=omerc +lat_0=19.55 +lonc=99.06666666666666
17        +x_0=+20000 +y_0=+60000 +alpha=+40 +k_0=1.0000847
18        +ellps=GRS80 +units=m +no_defs
19
20 CSV_UTM : DOH107_GNSS.csv      # control point / setting out files

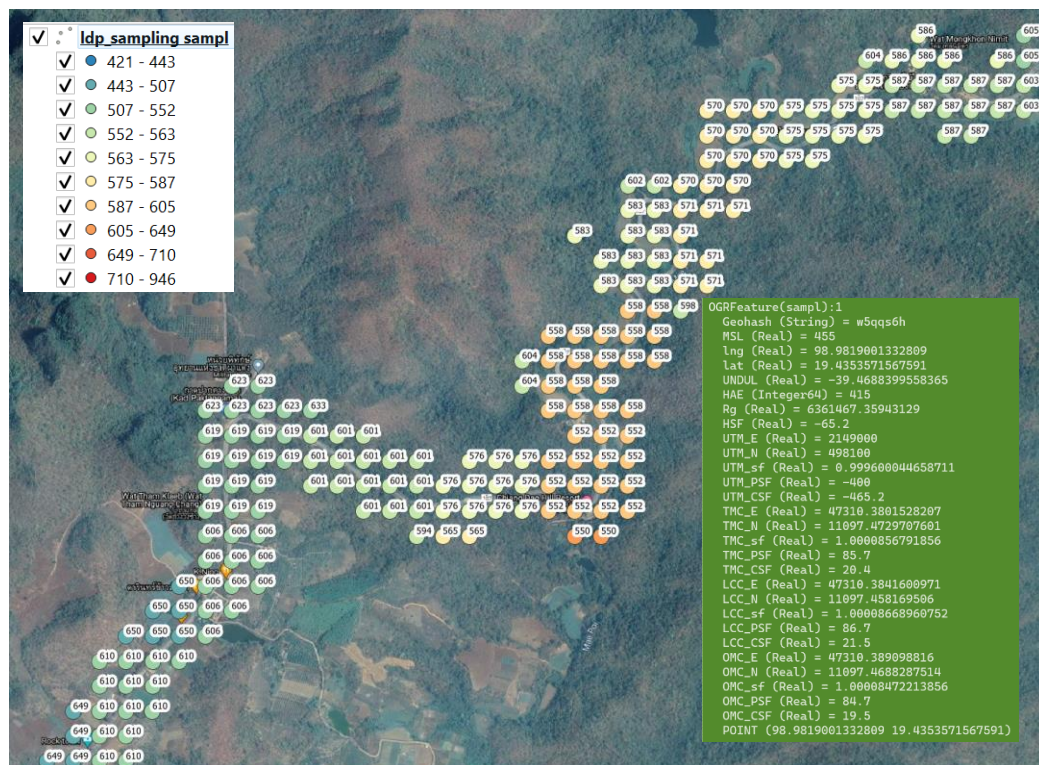
```

รูปที่ 3 ไฟล์กำหนดรูปแบบการคำนวณการฉายแผนที่ในรูปแบบ “YAML”

ในไฟล์ “YAML” ประกอบไปด้วย

- คีย์ “KML” ค่าที่กำหนดจะเป็นไฟล์ Google Earth KML file ผู้ใช้สร้างไฟล์ KML โดยลากเส้นตามแนวสายทางในโครงการเป็น LineString (Path) 1 เส้น หรือติกรอบพื้นที่รูปปิด Polygon รอบพื้นที่ที่สนใจ และกำหนดชื่อตามต้องการ
- คีย์ “GRID” ค่าที่กำหนดเป็น ความละเอียดของจุดสุ่ม โดยมีค่าความละเอียดเป็น 10ⁿ เมตร หาก n เป็น 1, 2 หรือ 3 ความละเอียดคือ 10, 100 หรือ 1,000 เมตร ตามลำดับ จุดสุ่มจะสร้างไว้ภายในขอบเขตตามแนวเส้นที่กำหนดไว้ในคีย์ KML
- คีย์ “BUFF” เป็นการบัฟเฟอร์ หน่วยเป็น เมตร ออกไปจากแนวเส้นทางที่สร้างจาก KML path ข้างต้น ออกไปแต่ละข้าง
- คีย์ “LDP” ประกอบไปด้วย “รหัส” ของนิยามการฉายแผนที่ PROJ (<https://proj.org/usage/projections.html>) โดยผู้ใช้กำหนดชื่อเพื่อกำกับรูปแบบการฉายแผนที่ที่กำหนดขึ้น แนะนำอักษร 3-4 ตัว เช่น TMC, LCC, OMC ค่าของ “รหัส” นี้ภายหลังซอฟต์แวร์จะไปใช้ประกอบการใช้งานกับชื่อย่อแกนพิกัดกริดและค่าสเกลแฟกเตอร์ เช่น TMC_E, TMC_N, TMC_SF เป็นต้น

เมื่อผู้ใช้เรียกใช้ซอฟต์แวร์จะปรากฏไฟล์รายงานชื่อ Report.txt จุดสุ่มที่สร้างขึ้นพร้อมค่า CSF ที่คำนวณได้ในแต่ละจุดตามรูปแบบการฉายแผนที่ที่กำหนดไว้ในส่วน LDP ไฟล์นี้เป็น GIS Geopackage ไฟล์ชื่อ Id_sampling.gpkg และสามารถเปิดดูผ่านซอฟต์แวร์ GIS เช่น Quantum GIS นอกจากนี้จุดสุ่มที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปพล็อตเป็นไฟล์เจดสีของค่า HSF ที่เกิดจากความสูงต่ำของภูมิประเทศในไฟล์ภาพ HSF_TOPO.png รวมถึงไฟล์เจดสีของค่า CSF สำหรับแต่ละกรณีการฉายแผนที่จะปรากฏในไฟล์ภาพ CSF_UTM.png, CSF_TMC.png, CSF_LCC.png และ CSF_OMC.png ตามกรณีการฉายแผนที่ LDP ที่ผู้ใช้เลือกออกแบบ



รูปที่ 4 จุดกลุ่มบนภูมิประเทศที่แสดงค่าระดับ MSL และค่า HSF, PSF และ CSF จากไฟล์ Id_sampling.gpkg

ไฟล์ผลผลิตการวิเคราะห์การฉายแผนที่ความผิดเพี้ยนต่ำทั้งหมดจะปรากฏภายใต้โฟลเดอร์ “RESULTS” ที่ระบบสร้างขึ้นเองในระดับเดียวกับไฟล์กำหนดรูปแบบการคำนวณการฉายแผนที่ “YAML”

ในการศึกษาออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ (LDP) สำหรับโครงการ จะใช้พื้นฐานมาตรฐานสากล เช่น Geodetic Reference System 1980 (GRS80) และเลือกใช้การฉายแผนที่ชนิดคงรูป (Conformal Map Projections) [4] ซึ่งมีให้เลือกหลายรูปแบบ การฉายแผนที่ชนิดคงรูปที่แนะนำ 3 ชนิดมีชื่อรูปแบบการฉายพร้อมอักษรย่อคือ ทรานส์เวอร์สเมอเรเตอร์ (Transverse Mercator : TMC), แลมเบิร์ตคอนฟอร์มอลโคนิก (Lambert Conformal Conic Projection : LCC) เมอร์เคเตอร์แกนเฉียง (Oblique Mercator : OMC) สำหรับการฉายแลมเบิร์ตคอนฟอร์มอลโคนิก (LCC) ในพื้นที่ประเทศไทยเลือกใช้ชนิดเส้นขนานมาตรฐานเส้นเดียว (One Standard Parallel : 1SP) LCC ชนิด 1 SP จะใช้งานได้ง่ายและมีนิยามที่ชัดเจนสำหรับซอฟต์แวร์ GIS/CAD ทุกชนิด รายละเอียดการฉายแผนที่ทั้ง 3 ชนิดสามารถหาอ่านได้ใน [5]

การฉายแผนที่ LDP จะเริ่มจากการกำหนดค่าสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ k_0 ณ ศูนย์กำเนิด โดยคำนวณจากระนาบการฉายที่แนบสนิทกับพื้นผิวภูมิประเทศ มีค่าระดับ Projection Plane เป็น h_{pp} ระยะห่างของระนาบการฉายอ้างอิงไปยังทรงรีโลก และรัศมีโลกโดยเฉลี่ย (Gaussian Earth Radius : R) เป็นรัศมีโลกที่คำนวณจากรากที่สองของรัศมีโลกในแนวเมริเดียน (Radius of Curvature in the Meridian : M) และรัศมีโลกในแนวตะวันออก-ตะวันตก (Radius of Curvature in the Prima Vertical : N) โดยคิดที่ตำบลละติจูดนั้น ๆ ดังสมการที่ (2)

$$k_0 = 1 + \frac{h_{pp}}{R} \quad (2)$$



รูปที่ 5 แสดงรูปตัดตามแนวนพื้นที่ออกแบบ LDP จากฟังก์ชัน GoogleEarth/Profile ...

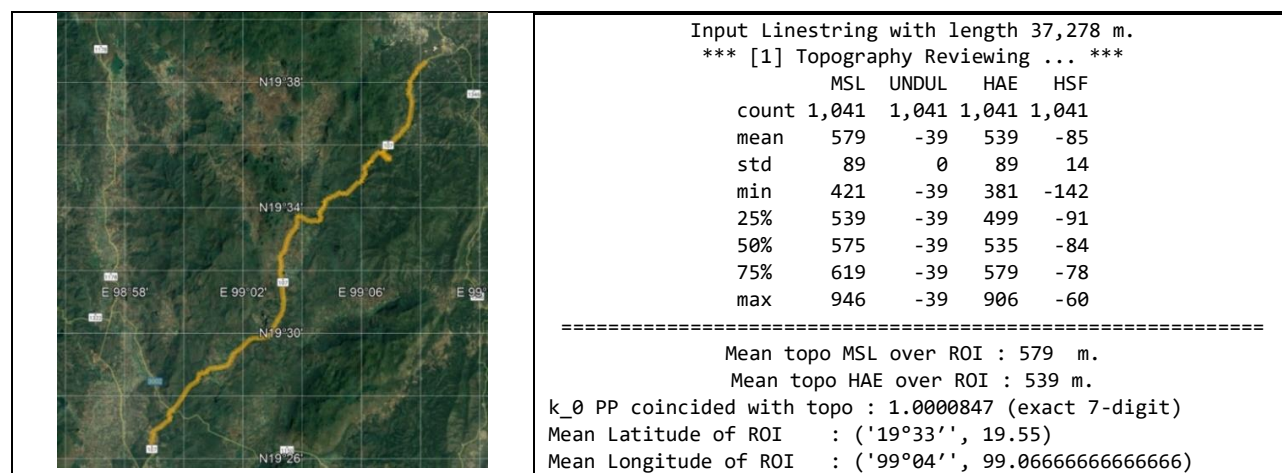
การฉายแผนที่ LDP จะต้องระบุพารามิเตอร์สำคัญและความเหมาะสมกับพื้นที่ที่จะประยุกต์ใช้ สรุปได้ในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1 การฉายแผนที่ความผิดเพี้ยนต่ำ LDP ที่พิจารณาเลือกใช้

การฉายแผนที่	ระนาบแผนที่และการวางตัว	พารามิเตอร์สำคัญในการฉายแผนที่	พารามิเตอร์ PROJ	ความเหมาะสมกับพื้นที่
ทรานส์เวอร์สเมอเคเตอร์ (Transverse Mercator: TMC)	ทรงกระบอกหมุนขวางขนานกับระนาบอีควาเตอร์ เส้นรอบรูปทรงกระบอกสัมผัสสโกล์แกนโครงการ	สเกลแฟกเตอร์การฉาย (k_0) ศูนย์กัมมันต์ (φ_0, λ_0) เมอร์เดียนกลาง (λ_0)	k_0 lat_0 lon_0	ขอบเขตโครงการที่วางตัวทอดยาวในแนวเหนือ-ใต้
แลมเบิร์ตคอนฟอร์มัลคอนิก (Lambert Conformal Conic Projection with one standard parallels: LCC)	ทรงกรวยครอบตามแกนหมุนของโลก ผิวกรวยสัมผัสพื้นที่โครงการ	สเกลแฟกเตอร์การฉาย (k_0) ศูนย์กัมมันต์ (φ_0, λ_0) เส้นขนานมาตรฐาน SP1 (φ_1)	k_0 lat_0 lon_0 lat_1	ขอบเขตโครงการที่วางตัวทอดยาวในแนวตะวันออก-ตะวันตก
เมอร์เคเตอร์แกนเฉียง (Oblique Mercator : OMC)	แกนทรงกระบอกหมุนไปในทิศทางต่าง ๆ เส้นรอบรูปทรงกระบอกสัมผัสสโกล์แกนโครงการ	สเกลแฟกเตอร์การฉาย (k_0) ศูนย์กัมมันต์ (φ_0, λ_0) แกนเฉียง (Skew) มุมเอซิมูท (α_0)	k_0 lat_0 lon_0 lon_c	ขอบเขตโครงการที่ทอดยาววางตัวในทิศทางอื่น ๆ

3. การวิเคราะห์ภูมิประเทศของโครงการ

เพื่อให้การอธิบายหลักการออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำสำหรับโครงการก่อสร้างเข้าใจได้ง่าย งานวิจัยนี้จึงได้สมมติตัวอย่างงานสำรวจและออกแบบการก่อสร้างและบูรณะถนนขึ้นมาเป็นตัวอย่าง ถนนในตัวอย่างมีความยาวประมาณ 37.278 กิโลเมตร ถนนวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงใต้พาดยาวไปแนวตะวันออกเฉียงเหนือ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 เส้นทางโครงการตัวอย่างและผลการวิเคราะห์ภูมิประเทศ

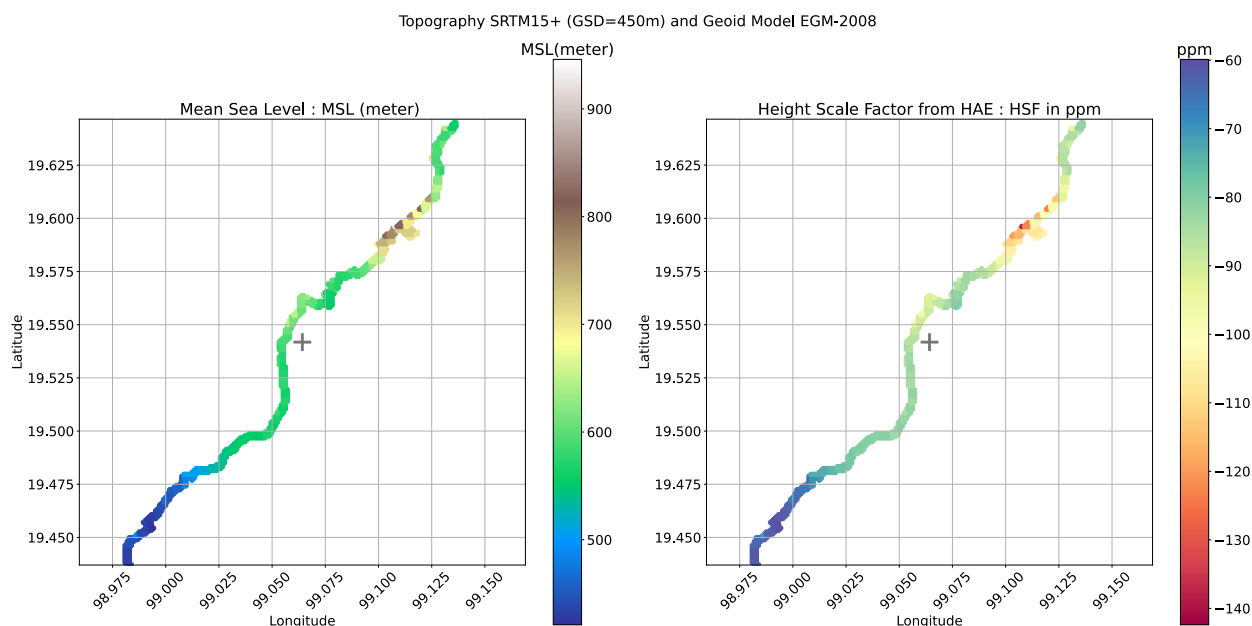
เมื่อเรียกใช้ uiDesign เป็นครั้งแรกซอฟต์แวร์จะเปิดอ่าน LineString หรือ Path พร้อมกับสร้างบัฟเฟอร์ แล้วทำการสุ่มจุดในพื้นที่โครงการ จุดสุ่มที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปหาค่าความสูงภูมิประเทศ (H) จากแบบจำลอง SRTM15+ V2.1 [6] และค่าแก้ไขออกไซด์จากแบบจำลอง Earth Gravitational Model 2008 (N) [7] แล้วทำการคำนวณความสูงเหนือรูปทรงรี (h) จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3)

$$h = H + N \quad (3)$$

ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นเลือกใช้แบบจำลองระดับ SRTM15+ V2.1 ซึ่งความแม่นยำของค่าระดับของภูมิประเทศอาจมีเพียง “หลายสิบเมตร” สาเหตุมาจากการสุ่มความละเอียดของจุดบนพื้นดิน (GSD) ลดลงเหลือเพียง 450 เมตร อีกทั้งในส่วนแบบจำลอง EGM2008 ที่เลือกใช้ก็อาจจะมีแม่นยำเพียง 1 ถึง 2 เมตร แต่เมื่อพิจารณาค่า HSF ที่คำนวณได้จะพบว่ามีความไวเพียง 1.5 ppm ต่อการเปลี่ยนค่าระดับ 10 เมตร [2] ดังนั้นการนำแบบจำลองขนาดเล็กทั้งสองมาใช้งานจึงไม่น่าจะส่งผลสำหรับการวิเคราะห์การออกแบบ LDP นี้

เมื่อได้ค่าระดับเหนือรูปทรงรี (h) แล้ว ระบบจะทำการคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์ของค่าระดับภูมิประเทศ (HSF) ตัวอย่างผลการคำนวณการวิเคราะห์ภูมิประเทศของตัวอย่างถนนจำนวน 1,041 จุด แสดงให้เห็นเป็นรูปตัดตามยาวที่ผลิตได้จาก ฟังก์ชัน GoogleEarth / Profile ดังรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า ภูมิประเทศตามแนวถนนมีค่าระดับ รทก. (MSL/H) จาก +421 เมตรไปจนถึง +946 เมตร หรือคิดเป็นค่าระดับเหนือรูปทรงรี (h) ได้จาก +381 ไปจนถึง +906 เมตร เมื่อนำไปคำนวณเป็นค่าสเกลแฟกเตอร์ของค่าระดับจะมีค่าเป็น -142 ppm จนถึง -60 ppm

ซอฟต์แวร์ uiDesign ยังแสดงแผนที่ภูมิประเทศในรูปแบบแผนที่ความสูงเหนือทะเลปานกลาง (MSL/H) พร้อมแผนที่ภาพเฉลี่ยของค่าสเกลแฟกเตอร์ (HSF) เนื่องจากความสูงของภูมิประเทศเหนือรูปทรงรีดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ซ้าย: แผนที่ภูมิประเทศในรูปแบบเจดิสระดับ MSL/H ขวา: แผนที่เจดิสของค่า HSF คำนวณจากระดับ h

ในขั้นตอนนี้ uiDesign ยังคำนวณความสูงเฉลี่ยของภูมิประเทศ (MSL/H) เป็น 579 เมตร หรือความสูงเหนือทรงรี (h) 539 เมตร ทำให้ได้ค่าสเกลแฟกเตอร์เริ่มต้น (k_0) สำหรับการฉายแผนที่ความผิดเพี้ยนต่ำ เมื่อกำหนดระดับระนาบการฉายแผนที่ให้ใกล้เคียงกับความสูงเฉลี่ยภูมิประเทศจะได้ค่า k_0 เป็น 1.0000847 (ปัดเศษให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานให้ละเอียด 1 ppm)

พร้อมกันนี้ผู้ใช้จะคำนวณค่าเฉลี่ยจุดกึ่งกลางการฉายโดยปัดเศษให้ลงตัว 1 ลิปดา จากข้อมูลตัวอย่างได้ค่าพิกัดกึ่งกลางการฉายเป็น ϕ, λ เท่ากับ $(19^\circ 33', 99^\circ 04')$ ค่าเหล่านี้ผู้ใช้จะนำไปปรับค่าพารามิเตอร์การฉายส่วน LDP ในไฟล์ “YAML” ข้างต้น

4. การวิเคราะห์ผลการฉายแผนที่ความผิดเพี้ยนต่ำ

โมดูล uiDesign จะอ่านส่วน “LDP” ของไฟล์ที่กำหนดรูปแบบการคำนวณการฉายแผนที่ “YAML” แล้วนำจุดศูนย์กลางที่ใช้กำหนดรูปแบบและความละเอียดทั้งหมดไปคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) ดังที่กล่าวมาแล้ว โดยที่ผู้ใช้งานหรือผู้ออกแบบแผนที่จะประเมินว่าการฉายแผนที่พร้อมพารามิเตอร์ที่กำหนดขึ้นได้ ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) ในพื้นที่โครงการได้ตามเป้าหมายคือ ± 20 ppm หรือไม่ จากตัวอย่างผลการคำนวณ ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) สำหรับแต่ละการฉายแผนที่มีดังต่อไปนี้

4.1 การฉายแผนที่แบบทรานสเวอร์สเมอเรเตอร์ (Transverse Mercator: TMC)

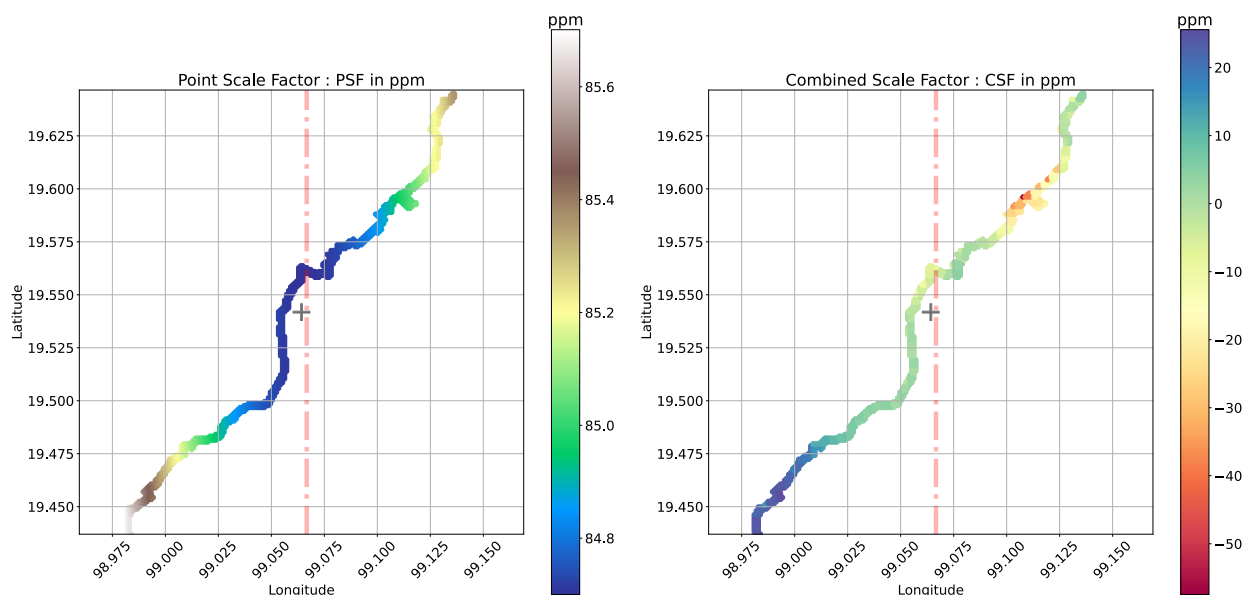
เมื่อกำหนดพารามิเตอร์สำคัญตามนิยามการฉายแผนที่ PROJ จะได้ค่าสเกลแฟกเตอร์เนื่องจากการฉายแผนที่เอง (PSF) อยู่ในช่วง +85 ถึง +86 ppm เมื่อนำไปคิดคำนวณรวมกับค่าสเกลแฟกเตอร์เนื่องความสูงภูมิประเทศ (HSF) ทำให้เกิดการชดเชยกัน ส่งผลทำให้ได้ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) อยู่ในช่วง -57 ถึง +26 ppm

ผลสรุปการวิเคราะห์การกระจายตัวช่วงของค่าพิกัดที่คำนวณได้ TMC_E และ TMC_N พร้อม TMC_PSF และ TMC_CSF แสดงดังรูปที่ 8

TMC : +proj=tmerc +lat_0=19.55 +lon_0=99.0666666666667 +k=1.0000847
+x_0=20000 +y_0=60000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs +type=crs

	TMC_E	TMC_N	TMC_PSF	TMC_CSF
count	1,041	1,041	1,041	1,041
mean	69,096	19,741	85	0
std	6,454	4,834	0	14
min	57,310	10,998	85	-57
25%	63,311	16,002	85	-6
50%	70,413	19,307	85	1
75%	74,514	24,110	85	6
max	80,515	27,314	86	26

TMC : +proj=tmerc +lat_0=19.55 +lon_0=99.0666666666667 +k=1.0000847 +x_0=20000 +y_0=60000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs +type=crs



รูปที่ 8 สำหรับกรณีการฉายแบบ TMC ซ้าย: แผนที่แสดงสีของ PSF ขวา: แผนที่แสดงสีของ CSF

4.2 การฉายแผนที่แบบแลมเบิร์ตคอนฟอร์มอลโคนิกพร้อมเส้นขนานมาตรฐาน 1 เส้น (Lambert Conformal Conic Projection with 1 standard parallels: LCC)

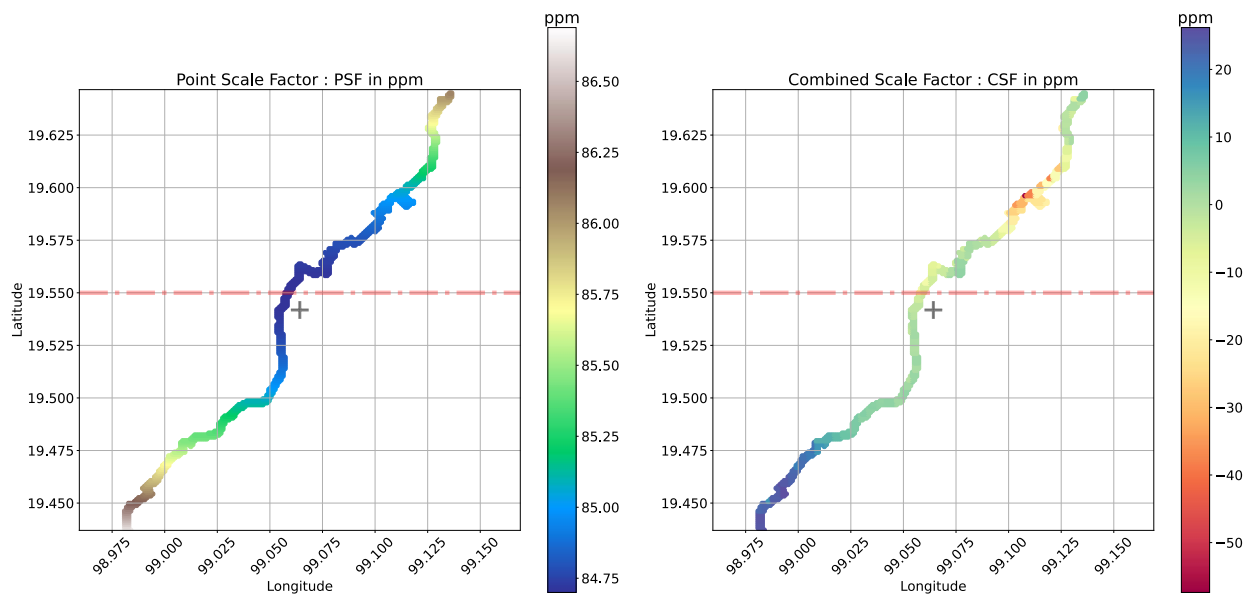
เมื่อกำหนดพารามิเตอร์สำคัญตามนิยามการฉายแผนที่ PROJ สำหรับการฉายแผนที่แบบแลมเบิร์ตคอนฟอร์มอลโคนิกพร้อมเส้นขนานมาตรฐาน 1 เส้น (LCC) การฉายแบบ LCC กำหนดระนาบการฉายเป็นรูปกรวยครอบบนทรงรีโลกในแกนร่วมการหมุนของโลก การออกแบบเลือกเส้นขนานมาตรฐานเส้นที่ 1 เป็นค่าละติจูดเฉลี่ยของพื้นที่โครงการ ค่าละติจูดเฉลี่ยจะปัดเศษลงตัว “ลิปดา” เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน จากนั้นทำการคำนวณค่าพิกัดและค่าสเกลแฟกเตอร์เนื่องจากการฉายแผนที่เอง (PSF) อยู่ในช่วง +85 ถึง +87 ppm เมื่อนำไปคิดคำนวณรวมกับค่าสเกลแฟกเตอร์เนื่องความสูงภูมิประเทศ (HSF) ทำให้เกิดการชดเชยกัน ส่งผลทำให้ได้ค่าสเกลแฟกเตอร์รวม (CSF) อยู่ในช่วง -57 ถึง +26 ppm

ผลสรุปการวิเคราะห์การกระจายตัวช่วงของค่าพิกัดที่คำนวณได้ LCC_E และ LCC_N พร้อม LCC_PSF และ LCC_CSF แสดงดังรูปที่ 9

LCC : +proj=lcc +lat_1=19.55 +lat_0=19.55 +lon_0=99.066666666667 +k_0=1.0000847
+x_0=20000 +y_0=60000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs +type=crs

	LCC_E	LCC_N	LCC_PSF	LCC_CSF
count	1,041	1,041	1,041	1,041
mean	59,096	19,741	85	0
std	6,454	4,834	0	14
min	47,310	10,998	85	-57
25%	53,311	16,002	85	-6
50%	60,413	19,307	85	1
75%	64,514	24,110	86	7
max	70,515	27,314	87	26

LCC : +proj=lcc +lat_1=19.55 +lat_0=19.55 +lon_0=99.066666666667 +k_0=1.0000847 +x_0=20000 +y_0=60000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs +type=crs



รูปที่ 9 สำหรับกรณีการฉายแบบ LCC ซ้าย: แผนที่เจดสีของ PSF ขวา: แผนที่เจดสีของ CSF

4.3 การฉายแผนที่แบบเมอร์เคเตอร์แกนเฉียง (Oblique Mercator: OMC)

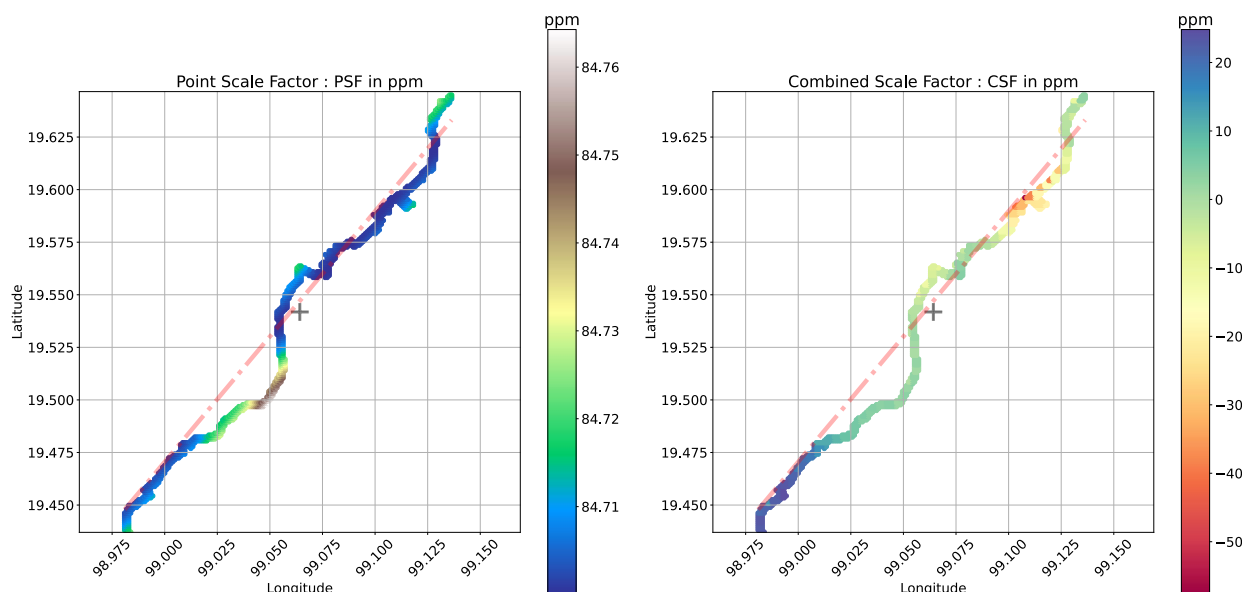
เมื่อกำหนดพารามิเตอร์สำคัญตามนิยามการฉายแผนที่ PROJ โดยการประมาณค่าแกนหลักของ OMC ที่เอียงทำมุมเอซิมุทประมาณ 40 องศา แล้วทำการคำนวณค่าพิกัดจุดศูนย์กลางได้ค่าสเกลแฟกเตอร์เนื่องจากการฉายแผนที่เอง (PSF) 85 ppm เมื่อนำไปคิดคำนวณรวมกับค่าสเกลแฟกเตอร์เนื่องความสูงภูมิประเทศ (HSF) ทำให้เกิดการชดเชยกันและกัน ส่งผลทำให้ได้ค่าสเกลแฟกเตอร์รวม (CSF) อยู่ในช่วง -58 ถึง +25 ppm

ผลสรุปการวิเคราะห์การกระจายตัวช่วงของค่าพิกัดที่คำนวณได้ OMC_E และ OMC_N พร้อม OMC_PSF และ OMC_CSF แสดงดังรูปที่ 10

OMC : +proj=omerc +lat_0=19.55 +lonc=99.066666666667 +alpha=40 +gamma=40
+k=1.0000847 +x_0=20000 +y_0=60000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs +type=crs

	OMC_E	OMC_N	OMC_PSF	OMC_CSF
count	1,041	1,041	1,041	1,041
mean	59,096	19,741	85	-0
std	6,454	4,834	0	14
min	47,310	10,998	85	-58
25%	53,311	16,002	85	-6
50%	60,413	19,307	85	1
75%	64,514	24,110	85	6
max	70,515	27,314	85	25

C : +proj=omerc +lat_0=19.55 +lonc=99.066666666667 +alpha=40 +gamma=40 +k=1.0000847 +x_0=20000 +y_0=60000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs +type=



รูปที่ 10 สำหรับกรณีการฉายแบบ OMC ซ้าย: แผนที่แสดงสีของ PSF ขวา: แผนที่แสดงสีของ CSF

5. การวิเคราะห์การกำหนดพารามิเตอร์การเลื่อนพิกัด

เมื่อกำหนดนิยามการฉายแผนที่ความผิดเพี้ยนค่าในรูปแบบ LDP สำหรับในพื้นที่โครงการ และทดสอบผลผลิตค่าพิกัดของจุดสุ่มในพื้นที่ออกแบบ จะเห็นได้ว่าค่าพิกัดอาจมีค่าติดลบ หรือมีตัวเลขขนาดใหญ่เกินไปเนื่องจากอยู่ห่างจากศูนย์กำเนิดของแผนที่มาก ในขั้นตอนนี้ผู้สำรวจจะกำหนดค่าการเลื่อนค่าพิกัดของศูนย์กำเนิดแผนที่บนพิกัดกริดด้วยค่าพารามิเตอร์การเลื่อนพิกัด False Easting (FE) และ False Northing (FN)

ทั้งนี้การเลือกใช้ค่าพิกัดการเลื่อนอาจสังเกตได้จากพิสัยของค่าพิกัดกริดต่ำสุด (Min) และค่าพิกัดกริดสูงสุด (Max) ของแต่ละการฉาย ผลการบวกค่าการเลื่อนพิกัดนี้จะทำให้ค่าพิกัดกริด LDP ไม่มีค่าติดลบ และทำให้ตัวเลขพิกัดมีขนาดเล็กลง ง่ายต่อการอ่านการนำไปใช้งาน เช่น กรณีถนนความยาวสิบกิโลเมตร เราอาจเลื่อนพิกัดการฉายสำหรับแกนทางตะวันออกให้ได้ผลลัพธ์พิกัดอยู่ในช่วง $LDP_E + 10,000$ เมตร ขึ้นไป และสำหรับแกนทางเหนือให้อยู่ในช่วง $LDP_N + 50,000$ เมตร ขึ้นไป ในการเผยแพร่ค่าพิกัดกริดไปใช้งาน ทั้งนี้จะช่วยให้ตัวเลขแยกออกจากกันไม่สับสนระหว่างแกนตะวันออกและแกนเหนือ อีกทั้งตัวเลขค่าพิกัดกริดเมื่อนำไปใช้งานจะแตกต่างจากค่าพิกัดยูทีเอ็มอย่างเห็นได้ชัด สำหรับประเทศไทยค่าพิกัดยูทีเอ็มสำหรับแกนตะวันออกอาจอยู่ระหว่าง 200,000 ถึง 800,000 เมตร และแกนเหนืออาจอยู่ระหว่าง 600,000 ถึง 2,300,000 เมตร

ดังนั้น ค่าพิกัดการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ พิกัดกริดจะกำหนดค่าการเลื่อนพิกัดกริดด้วยพารามิเตอร์ FE และ FN หรือพารามิเตอร์ x_0 และ y_0 ในนิยาม PROJ ค่าพิกัดกริดของแต่ละการฉาย LDP จะคำนวณได้จากสมการที่ (4) และ (5)

$$LDP_E = LDP_E' + FE \quad (4)$$

$$LDP_N = LDP_N' + FN \quad (5)$$

โดยที่ LDP_E' และ LDP_N' เป็นค่าพิกัดกริด LDP ที่คำนวณได้จากขั้นต้น

6. การประยุกต์ใช้การฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำในการดำเนินการโครงการ

จากตัวอย่างสายทางที่จะออกแบบเพื่อการก่อสร้าง ผลการประเมินจุดสุมตามแนวสายทางจำนวน 1,041 จุดตามแนวสายทางระยะทาง 37.2 กิโลเมตร ภูมิประเทศมีค่าระดับทะเลปานกลางของภูมิประเทศอยู่ในช่วง 421 เมตรถึง 946 เมตร เมื่อกำหนดระยะทางการฉายแผนที่ที่ระดับ รทก.เฉลี่ย 579 เมตร การทดสอบการฉายแผนที่ทั้งสามรูปแบบ TMC, LCC และ OMC พร้อมค่าเฉลี่ย Central Meridian, Central Parallel และ Oblique Aspect กลางภูมิประเทศในแนวเส้นทาง เมื่อทำการคำนวณ Combined Scale Factor (CSF) ของหมุดคูที่ตั้งอยู่ในแนวเส้นทาง 24 หมุด พบว่าค่า CSF จากการฉายแผนที่ทั้งสามแบบอยู่ในช่วง -25 ถึง +27 ppm ถือได้ว่าการฉายแผนที่ความผิดเพี้ยนต่ำมีประสิทธิภาพใกล้เคียงค่าเป้าหมาย 20 ppm และค่าพิสัย CSF จากการฉายแผนที่ทั้งสามไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงเลือกการฉายแผนที่ทรานส์เวอร์สเมอร์เคเตอร์ (TMC) สำหรับโครงการนี้ พร้อมกับการกำหนดพิกัดเลื่อนพิกัดกริดเป็น $FE = +20,000$ เมตร และ $FN = +60,000$ เมตร สำหรับ PROJ สตริงส์ใช้รหัสเป็น x_0 และ y_0 ตามลำดับ ดังนั้น LDP ที่เหมาะสมกับพื้นที่ตัวอย่างมีนิยามการฉายแผนที่ในรูปแบบ PROJ สตริงส์หรือในรูปแบบ PROJCS WKT ดังนี้

```
+proj=tmerc +lat_0=19.55 +lon_0=99.066666666667 +k=1.0000847
+x_0=20000 +y_0=60000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs +type=crs
```

```
PROJCS["Transverse_Mercator",GEOGCS["GCS_GRS_1980",DATUM["D_GRS_1980",
SPHEROID["GRS_1980",6378137,298.257222101]],PRIMEM["Greenwich",0],UNIT["Degree",0.017453292519943295]],
PROJECTION["Transverse_Mercator"],PARAMETER["scale_factor",1.0000847],
PARAMETER["central_meridian",99.06666666669977],PARAMETER["latitude_of_origin",19.55],
PARAMETER["false_easting",20000],PARAMETER["false_northing",60000],UNIT["Meter",1]]
```

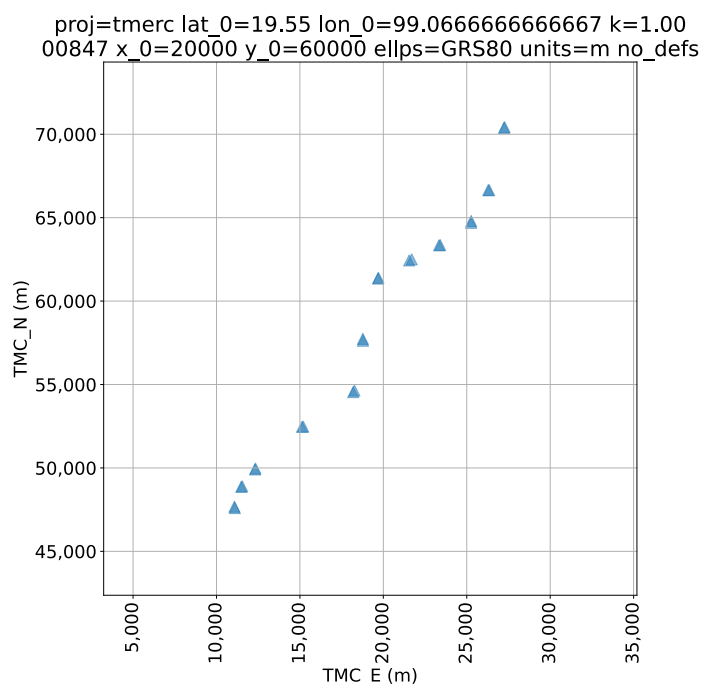
โครงการจะทำการประกาศการฉายแผนที่ความผิดเพี้ยนต่ำในรูปแบบ LDP สำหรับในพื้นที่โครงการ เช่น ในตัวอย่าง หากตัดสินใจเลือกใช้ ทรานส์เวอร์สเมอร์เคเตอร์ (Transverse Mercator : TM) ก็จะประกาศนิยามของการฉายแผนที่ในรูปแบบ PROJ สตริงส์ หรือ PROJCS WKT ซึ่งซอฟต์แวร์ GIS และ CAD ส่วนใหญ่นิยมใช้และเป็นมาตรฐานสากล

โครงการการออกแบบเพื่อเตรียมการก่อสร้างแนวขามักจะมีหมุดควบคุมโครงข่ายทำการรังวัดด้วย GNSS ด้วยความละเอียดถูกต้องสูงในกรณีตัวอย่างได้มีการรังวัดโครงข่าย GNSS ของหมุดคูกระจายทั่วในโครงการ ผู้ใช้สามารถเตรียมไฟล์ค่าพิกัดในรูปแบบ CSV แล้วกำหนดชื่อไว้ในไฟล์กำหนดรูปแบบการคำนวณการฉายแผนที่ “YAML” ในส่วนของ CSV_UTM ดังตัวอย่างข้างต้น เมื่อผู้ใช้เรียกใช้โมดูล uiPostProc ซอฟต์แวร์จะทำการอ่านนิยามการฉายแผนที่ที่ปรากฏในไฟล์ “YAML” แล้วทำการผลิต

รายชื่อจุดพิกัดในระบบการฉายแผนที่ความผิดเพี้ยนต่ำในรูปแบบ LDP สำหรับกรณีการฉายแบบ LDP ตามความต้องการดังตัวอย่างเป็นรูปแบบ “TMC” จะได้ค่าพิกัดการฉาย LDP พร้อมค่า HSF, PSF, CSF ขึ้นชั้น ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการคำนวณพิกัดกริดของหมุดควบคุมโครงการด้วยการฉายแผนที่ TMC และ CSF ที่ได้

	Stn	ZONE	UTM_E	UTM_N	MSL	TMC_E	TMC_N	HSF	PSF	CSF
1	GPS.0107-057	47	498,101.901	2,149,283.435	422.179	11,099.485	57,593.952	-60	86	26
2	GPS.0107-058	47	498,077.864	2,149,365.625	418.005	11,075.468	57,676.191	-59	86	26
3	GPS.0107-059	47	498,486.145	2,150,557.924	431.246	11,484.409	58,868.911	-61	86	24
4	GPS.0107-060	47	498,546.127	2,150,585.697	434.689	11,544.431	58,896.674	-62	86	23
5	GPS.0107-061	47	499,314.096	2,151,595.946	414.447	12,313.165	59,907.116	-59	85	27
6	GPS.0107-062	47	499,338.907	2,151,655.473	417.101	12,338.011	59,966.663	-59	85	26
7	GPS.0107-063	47	502,123.513	2,154,157.036	524.017	15,124.939	62,468.359	-76	85	9
8	GPS.0107-064	47	502,201.918	2,154,163.344	524.647	15,203.384	62,474.640	-76	85	9
9	GPS.0107-065	47	505,187.335	2,156,233.451	541.078	18,191.053	64,544.591	-79	85	6
10	GPS.0107-066	47	505,267.849	2,156,326.834	542.073	18,271.642	64,637.988	-79	85	6
11	GPS.0107-067	47	505,774.851	2,159,311.762	560.885	18,780.050	67,624.165	-82	85	3
12	GPS.0107-068	47	505,769.279	2,159,424.140	561.159	18,774.519	67,736.599	-82	85	3
13	GPS.0107-069	47	506,676.289	2,163,035.663	602.643	19,683.375	71,349.518	-88	85	-4
14	GPS.0107-070	47	506,698.627	2,163,083.360	602.219	19,705.743	71,397.230	-88	85	-4
15	GPS.0107-071	47	508,540.975	2,164,122.726	552.469	21,549.388	72,436.380	-81	85	4
16	GPS.0107-072	47	508,694.545	2,164,190.731	552.783	21,703.059	72,504.358	-81	85	4
17	GPS.0107-073	47	510,327.174	2,165,034.751	623.911	23,336.807	73,348.150	-92	85	-7
18	GPS.0107-074	47	510,403.448	2,165,041.053	627.597	23,413.120	73,354.425	-92	85	-8
19	GPS.0107-075	47	512,246.564	2,166,379.397	736.217	25,257.649	74,692.697	-109	85	-24
20	GPS.0107-076	47	512,257.443	2,166,483.345	729.660	25,268.574	74,796.691	-108	85	-23
21	GPS.0107-077	47	513,274.776	2,168,337.608	636.391	26,287.123	76,651.453	-94	85	-9
22	GPS.0107-078	47	513,333.206	2,168,334.143	634.625	26,345.580	76,647.963	-94	85	-8
23	GPS.0107-079	47	514,214.276	2,172,066.958	547.482	27,228.535	80,382.237	-80	85	5
24	GPS.0107-080	47	514,257.753	2,172,108.122	545.599	27,272.049	80,423.404	-80	85	6



รูปที่ 11 ผลการแปลงค่าพิกัดการฉายแผนที่ “TMC” ของหมุดควบคุม GNSS ในโครงการพร้อมแผนที่แสดงที่ตั้ง

ในการประยุกต์ใช้การฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำที่ได้ออกแบบไว้ในโครงการ ควรคำนึงถึงความเหมาะสมในแต่ละภารกิจในการสำรวจออกแบบและระหว่างการก่อสร้างด้วย การดำเนินงานบางลักษณะงานอาจจะต้องใช้ระบบพิกัดการฉายแผนที่ตามมาตรฐานเดิม เช่น ระบบพิกัดยูทีเอ็ม จะมีความสะดวก หากเป็นภารกิจที่มนุษย์ไม่ต้องไปยุ่งเกี่ยวกับการนำเข้าข้อมูลและระหว่างการประมวลผล ในตารางที่ 3 เป็นข้อเสนอแนะและชี้ประเด็นสำหรับแต่ละภาระงานว่าเราควรจะใช้พิกัดการฉายแผนที่แบบ LDP หรือ UTM และแนวทางการประยุกต์พร้อมประโยชน์ที่จะได้รับ

ตารางที่ 3 ภารกิจในงานออกแบบและก่อสร้างแนวกกับแนวทางประยุกต์ใช้

ภารกิจในงานออกแบบและก่อสร้าง	ระบบพิกัดที่ควรใช้	แนวทางการประยุกต์ และ ประโยชน์ที่จะได้
1 การเขียนแบบ CAD	LDP	- สามารถคำนวณปริมาณขนาดของ งานดิน งานโยธา งานการผลิตชิ้นงานในที่ก่อสร้าง หรือ การผลิตชิ้นงานในโรงงาน ได้โดยตรง ไม่มีข้อกังวลของค่าสเกลแฟกเตอร์ต่าง ๆ
2 การพัฒนาระบบภูมิสารสนเทศ	LDP	- ระบบสารสนเทศจะรองรับการฉายแผนที่ต่าง ๆ และกำหนดพารามิเตอร์ได้ ข้อมูลแผนที่และแบบก่อสร้างจะสามารถแสดงซ้อนทับกับแผนที่ที่ดิน แผนที่ภูมิประเทศอื่น ๆ ได้สะดวก โดยการแสดงผลซ้อนทับกับชนิด On-the-fly
3 การเดินวงรอบเชื่อมระหว่างหมุดคู่ การขยายหมุดควบคุม การกำหนดจุดก่อสร้าง (Setting out) โดยใช้กล้อง Total Station	LDP	- การวัดระยะทางลาดเอียงสามารถคำนวณเป็นระยะทางราบบนกริดแผนที่ LDP โดยตรงไม่มีค่าสเกลแฟกเตอร์ - ความสูงเฉลี่ยของเส้นที่วัดระยะไม่ต้องคำนวณถึงค่าแก้ HSF เนื่องจากชดเชยกับค่า PSF ในรูปแบบ CSF < 20 ppm - ไม่มีค่าแก้ Arc-to-chord Correction เนื่องจากระนาบการฉายอยู่แนวกกับระนาบเฉลี่ยภูมิประเทศ - ลดค่าสเกลแฟกเตอร์ในการคำนวณและการตั้งกล้องสำรวจ
5. การเดินขยายหมุดควบคุมโดยการรังวัดเส้นฐานระหว่างหมุดคู่ การขยายหมุดควบคุมด้วยการรังวัดเส้นฐาน การกำหนดจุดก่อสร้าง (Setting out) โดยใช้ GNSS Survey	UTM	- ระบบ GNSS Survey อาจไม่มีฟีเจอร์ให้กำหนดการฉายแผนที่รูปแบบอื่น ๆ แต่สำหรับการนำเข้าระบบพิกัด UTM จะทำได้โดยง่าย
6. การบินบันทึกภาพด้วยยูเอวีเพื่อผลิตแผนที่ภาพออร์โท และ DTM การออกพิกัดเป้าควบคุมภาพ (GCP Target)	UTM	- กำหนดค่าพิกัดของ GCP หรือ Check Point ด้วยระบบพิกัด UTM เสียก่อน เนื่องจากระบบประมวลผลภาพยูเอวีจะรองรับ UTM ได้ดี - กรณีใช้ระบบ UAV RTK/PPP อาจจะต้องเข้าถึงแบบจำลองขี้อายุด้วย การใช้ระบบพิกัด WGS84 UTM จะทำให้การปรับแก้ทำได้ง่าย - เมื่อได้แผนที่ภาพออร์โท หรือ DTM สามารถแปลงการฉายจาก UTM ไปสู่ระบบ LDP ได้โดยนิยามการฉายแผนที่ PROJ

7. การประยุกต์ใช้การฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำกับซอฟต์แวร์ GIS อื่นๆ

จากนิยามการฉายแผนที่ที่บรรยายด้วย PROJ สตริงส์ที่ผลิตจาก PyProj/PROJ ไบรารีรุ่น 8.0.1 (Sep 28 2021) ในงานวิจัยได้ทดลองนำนิยามการฉายดังกล่าวไปใช้กับซอฟต์แวร์ GIS อื่น ๆ ที่นิยมใช้ในงานสำรวจจริงวัด การทำแผนที่และงานออกแบบเพื่อการก่อสร้าง แต่อย่างไรก็ตามซอฟต์แวร์เหล่านี้มีนิยามไม่ตรงกับ PROJ ทุกประการ และขาดฟีเจอร์บางประการ เช่น การเลื่อนพิกัดกริด (FE/FN) ในขณะที่ซอฟต์แวร์ไลบรารี PROJ ดูเหมือนว่าจะมีฟีเจอร์ครบถ้วนที่สุด สำหรับชุดซอฟต์แวร์อื่น ๆ ที่พัฒนาบนพื้นฐานซอฟต์แวร์ไลบรารี PROJ เช่น Quantum GIS, GDAL/OGR และอื่น ๆ อีกเป็นจำนวนมาก เราอาจอนุมานได้ว่าการอ่านนิยามการฉายแผนที่ PROJ สตริงส์จะสำเร็จและสามารถผลิตพิกัดกริดได้ผลลัพธ์ตรงกัน

เมื่อปรับแต่งนิยามการฉายแผนที่ PROJ แล้วได้ทำการแปลงค่าพิกัดจุดมุมในพื้นที่ตัวอย่างในเบื้องต้นมา 3 จุดที่ตำแหน่งเริ่มต้น-กลาง-ท้ายโครงการ และนำค่าพิกัดกริด LDP ที่ผลิตได้จาก LDP_Colab ที่พัฒนาขึ้นบนพื้นฐานของ PROJ ไบรารีนำไปเปรียบเทียบกับที่ได้จากซอฟต์แวร์ GeographicLib ที่ใช้อ้างอิงความละเอียดถูกต้องได้สูงสุด [8] และ Global Mapper ที่นิยมใช้ในงานออกแบบ CAD และประมวลผล GIS ปรากฏว่าได้ค่าผลต่างสูงสุด (Max) น้อยกว่า 0 มิลลิเมตร หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าพิกัดกริดที่ได้เท่ากัน ดังสรุปได้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัดกริด LDP คำนวณได้จากซอฟต์แวร์อ้างอิง

ซอฟต์แวร์โมดูล /เวอร์ชัน	ลักษณะเด่น	ผลต่างสูงสุด การฉาย TMC	ผลต่างสูงสุด การฉาย LCC	ผลต่างสูงสุด การฉาย OMC
GeographicLib v. 1.52 - TransverseMercator - ConicProj	อัลกอริทึมละเอียดถูกต้องสูงสุดใกล้เคียงกับความแม่นยำของเครื่อง (คอมพิวเตอร์) และแม่นยำเชิงเลข 9 นาโนเมตร	เหนือ = 0 มม. ต.ออก = 0 มม.	เหนือ = 0 มม. ต.ออก = 0 มม.	ไม่มีการฉายนี้
Global Mapper v.23 - Geographic Calculator	เป็นซอฟต์แวร์ราคาค่อนข้างต่ำ นิยมใช้ในการแปลงฟอร์แมตจัดเก็บข้อมูล GIS	เหนือ = 0 มม. ต.ออก = 0 มม.	เหนือ = 0 มม. ต.ออก = 0 มม.	เหนือ = 0 มม. ต.ออก = 0 มม.

สำหรับซอฟต์แวร์รุ่นใหม่ เช่น Global Mapper สามารถอ่านหรือเขียนนิยามการฉายในรูปแบบ PROJCS WKT (Well-known Text) โดยนิยาม LDP ที่ได้ทดสอบในงานวิจัยนี้สามารถนำพารามิเตอร์เข้าไปใน Global Mapper และผลิตเป็น PROJCS WKT ได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 นิยามของการฉายในรูปแบบ PROJCS WKT สำหรับนิยามการฉาย LDP จากโครงการตัวอย่าง

รหัส	PROJCS WKT
TMC	PROJCS["Transverse_Mercator",GEOGCS["GCS_GRS_1980",DATUM["D_GRS_1980",SPHEROID["GRS_1980",6378137,298.257222101]],PRIMEM["Greenwich",0],UNIT["Degree",0.017453292519943295]],PROJECTION["Transverse_Mercator"],PARAMETER["scale_factor",1.0000847],PARAMETER["central_meridian",99.06666666666977],PARAMETER["latitude_of_origin",19.55],PARAMETER["false_easting",20000],PARAMETER["false_northing",70000],UNIT["Meter",1]]
LCC	PROJCS["Lambert_Conformal_Conic",GEOGCS["GCS_GRS_1980",DATUM["D_GRS_1980",SPHEROID["GRS_1980",6378137,298.257222101]],PRIMEM["Greenwich",0],UNIT["Degree",0.017453292519943295]],PROJECTION["Lambert_Conformal_Conic"],PARAMETER["scale_factor",1.0000847],PARAMETER["standard_parallel_1",19.55],PARAMETER["standard_parallel_2",19.55],PARAMETER["central_meridian",99.06666666666977],PARAMETER["latitude_of_origin",19.55],PARAMETER["false_easting",20000],PARAMETER["false_northing",60000],UNIT["Meter",1]]
OMC	PROJCS["Hotine_Oblique_Mercator_Azimuth_Center",GEOGCS["GCS_GRS_1980",DATUM["D_GRS_1980",SPHEROID["GRS_1980",6378137,298.257222101]],PRIMEM["Greenwich",0],UNIT["degree",0.0174532925199433]],PROJECTION["Hotine_Oblique_Mercator_Azimuth_Center"],PARAMETER["scale_factor",1.0000847],PARAMETER["azimuth",40],PARAMETER["longitude_of_center",99.06666666666044],PARAMETER["latitude_of_origin",19.55],PARAMETER["false_easting",20000],PARAMETER["false_northing",60000],UNIT["Meter",1]]

8. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้เสนอหลักการออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำสำหรับโครงการ พร้อมได้ยกตัวอย่างพื้นที่โครงการที่เป็นลักษณะตามแนวยาว ในงานวิจัยได้มีการพัฒนาซอฟต์แวร์ออนไลน์ผ่านแพลตฟอร์ม Google Colab ชื่อว่า LDP_Colab ระบบซอฟต์แวร์สามารถอ่านข้อมูลแนวเส้นทางแล้วขยายให้เป็นพื้นที่เพื่อกำหนดจุดศูนย์กลางตามความละเอียดที่ผู้ใช้งานต้องการ ผู้ใช้ที่ใช้ระบบซอฟต์แวร์ LDP_Colab จะช่วยวิเคราะห์ลักษณะของภูมิประเทศโดยการอ่านจากฐานข้อมูลจากแบบจำลองระดับ SRTM15+ V2.1 และค่าแก้ไขจากแบบจำลอง Earth Gravitational Model 2008 (N) จากนั้นจะมีการผลิตค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) ที่เป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินค่า การออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำที่เลือกใช้และกำหนดพารามิเตอร์มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้กับโครงการ โดยเฉพาะความใกล้ชิดของระนาบของการฉายแผนที่ แกนการฉาย กับพื้นที่บริเวณโครงการ ทำให้ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม (CSF) จำกัดไว้ที่ ± 20 ppm หรืออาจจะมีการผ่อนปรนบ้างในกรณีที่ภูมิประเทศสูงต่ำแตกต่างกันมาก

ในงานวิจัยได้สรุปการประยุกต์ใช้การฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำที่ได้ออกแบบไว้ในโครงการและการใช้ระบบจัดการฉายแผนที่ร่วมกับระบบติดตามมาตรฐานเดิม เช่น ระบบพิกัดยูทีเอ็ม โดยมีข้อเสนอแนะและการชี้ประเด็นสำหรับแต่ละภาระงานว่าควรจะใช้ค่าพิกัดการฉายแผนที่แบบ LDP หรือ UTM และแนวทางการประยุกต์พร้อมประโยชน์ที่จะได้อีกด้วย

งานวิจัยยังได้ตรวจสอบความถูกต้องเชิงเลขและความเข้ากันได้ของนิยามการฉายแผนที่กับซอฟต์แวร์ GIS อื่น ๆ เช่น GeographicLib และ Global Mapper ซอฟต์แวร์ GeographicLib ที่ใช้อ้างอิงความละเอียดถูกต้องได้สูงสุด และ Global Mapper ที่นิยมใช้ในงานออกแบบ CAD และประมวลผล GIS พบว่าทั้งสองซอฟต์แวร์มีประสิทธิภาพเชิงเลขและนิยามการฉายแผนที่ที่เทียบเท่ากัน ผลต่างสูงสุด (Max) ของค่าพิกัดกริดน้อยกว่า 0 มิลลิเมตร หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าพิกัดกริดที่ใส่เท่ากัน

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สวัสดิ์ชัย เกรียงไกรเพชร อธิการบดีภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้เป็นอาจารย์ประสิทธิ์ประสาทความรู้การฉายแผนที่ให้แก่บัณฑิต นักศึกษา วิศวกร อย่างสม่ำเสมอต่อเนื่องมา และท่านยังได้ให้คำแนะนำองค์ความรู้การฉายแผนที่สูงอย่างลึกซึ้ง ทำให้บทความนี้มีความสมบูรณ์และสร้างแรงบันดาลใจให้ผู้เขียนได้พัฒนาระบบซอฟต์แวร์ประกอบงานวิจัยนี้ได้รับบรรลุผลเสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Dennis M. Ground Truth: Low Distortion Map Projections for Engineering, Surveying, and GIS. In: *Pipelines 2016*, ASCE, 17-20 July 2016, pp. 857-869. DOI: 10.1061/9780784479957.079.
- [2] Santitamont, P., Riabroy, P., and Patchara-apa, C. A Study on Potentials of Low Distortion Map Projections for Thailand. *Engineering Journal of Research and Development*, 2021, Volume 32, Issue 2.
- [3] Santitamont, P., Riabroy, P., and Patchara-apa, C. A Study on WGS-TM Map Projection of the Thai-Chinese High-Speed Rail Project. *Engineering Journal of Research and Development*, 2021, Volume 32, Issue 2.
- [4] Dennis L.D. The State Plane Coordinate System History, Policy and Future Directions. *NOAA Special Publication NOS NGS 13*, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geodetic Survey, 2018.
- [5] Snyder, J. P. Map Projection: A Working Manual. *Professional Paper*, 1395, US Government Printing Office: Washington, 1987.
- [6] 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
- [7] 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
- [8] Karney, C.F. Transverse Mercator with an accuracy of a few nanometers. *Journal of Geodesy*, 2011, 85 (8), pp. 475-485. DOI :10.1007/s00190-011-0445-3.