



การศึกษาศักยภาพการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำสำหรับประเทศไทย

A STUDY ON POTENTIALS OF LOW DISTORTION MAP PROJECTIONS FOR THAILAND

ไพศาล สันติธรรมนนท์^{1*}, ประจวบ เรียบร้อย² และ ชานชัย พัชระอาภา³

¹รองศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²วิศวกรสำรวจอาวุโส, บริษัท อิตาเลียนไทยพัฒนา จำกัด

³วิศวกรสำรวจอาวุโส, บริษัท เอเชียเอ็นจิเนียริ่งคอนซัลแตนท์ จำกัด

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

บทคัดย่อ

การออกแบบและก่อสร้างสำหรับ โครงการต่างๆ ในประเทศไทยนิยมใช้ระบบการฉายแผนที่บนระนาบราบชนิดทรานส์เวอร์สมเมอร์เคเตอร์ หรือ ยูทีเอ็ม (Universal Transverse Mercator : UTM) การฉายแผนที่ยูทีเอ็มเป็นมาตรฐานสากลและอาจมีความคลาดเคลื่อนเชิงเส้น (linear distortion) บริเวณชายขอบของโซนในประเทศไทยสูงสุดถึง 965 ppm ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นภายในโซนยูทีเอ็มสำหรับการออกแบบและก่อสร้างมีขนาดใหญ่ การคำนวณประยุกต์ใช้ในงานออกแบบและการรังวัดจึงต้องระมัดระวังและไม่สามารถละเลยได้ในทุกขั้นตอนของการนำไปใช้งานวิจัยนี้เป็นการศึกษานำแนวทางการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ (Low Distortion Map Projection : LDP) เพื่อพัฒนาให้เป็นมาตรฐานการฉายแผนที่สำหรับงานก่อสร้างสำหรับประเทศไทยรายจังหวัดหรือแผนที่เฉพาะกิจสำหรับแต่ละโครงการ การฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ (LDP) อาจยอมให้ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นร่วมหรือสเกลแฟกเตอร์ร่วม CSF มีค่าน้อยจนถึงไม่เกิน 20 ppm ที่ถือว่าเล็กน้อยไม่มีนัยสำคัญและสามารถละเลยได้ การศึกษานี้ได้ผลการศึกษาศักยภาพการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ LDP สำหรับประเทศไทย พบว่าสำหรับจังหวัดที่มีขนาดพื้นที่ใหญ่ไม่มากนัก ประกอบกับลักษณะภูมิประเทศไม่สูงต่ำจากระดับแผนที่ที่ออกแบบเลือกไว้มาก เราสามารถกำหนดรูปแบบการฉายแผนที่ชนิดความคลาดเคลื่อนต่ำ (LDP) ที่มีความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นไม่เกิน 20 ppm ได้ หากเน้นความสำคัญที่พื้นที่ “เมือง” ครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 80% พบว่ามีจำนวน 58 จังหวัด ในจังหวัดเหล่านี้สามารถกำหนดให้มีรูปแบบการฉายแผนที่ LDP ได้โดยง่าย การฉายแผนที่ LDP ใช้การฉายแผนที่ชนิดกรุป เป็นชนิด-ทรานส์เวอร์สมเมอร์เคเตอร์ TM จำนวน 34 จังหวัด ชนิดแลมเบิร์ตคอนฟอร์มัลโคนิก LCC จำนวน 22 จังหวัด และเมอร์เคเตอร์แบบแกนเอียง OMC จำนวน 3 จังหวัด ส่วนอีก 19 จังหวัดที่เหลือยังคงรูปแบบการฉายแผนที่ LDP กลุ่มทั้งจังหวัดยังมีความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นเกิน 20 ppm และในจังหวัดที่มีขอบเขตกว้างใหญ่ เช่น เชียงใหม่ จะมีค่าสูงสุดจนถึง -229 ppm ประกอบกับมีภูมิประเทศเป็นภูเขาสูงส่วนมากและประชากรอาศัยกระจุกกระจายในพื้นที่สูงอีกด้วย ผลการศึกษาศักยภาพการกำหนดการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ LDP รายจังหวัดในประเทศไทยนี้สรุปได้ว่ามีโอกาสนำไปใช้สูงมาก แต่ยังคงการพัฒนาศึกษาปรับปรุงพารามิเตอร์ของการฉายสำหรับรายจังหวัดที่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นสูงเกินเกณฑ์ เช่น การพิจารณาแบ่งพื้นที่จังหวัดออกเป็นส่วนๆ

Phisan Santitamnont^{1*}, Prajuab Riabroy² and Chanchai Patchara-apa³

¹Associate Professor, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

²Senior Survey Engineer, Italian-Thai Development Public Company Limited

³Senior Survey Engineer, Asian Engineering Corporation Company Limited

คำสำคัญ: การฉายแผนที่ชนิดความคลาดเคลื่อนต่ำ (แอลดีพี); การฉายแผนที่ทรานสเวอร์สเมอร์เคเตอร์ (ทีเอ็ม); การฉายแผนที่แลมเบิร์ตคอนฟอร์มัลโคนิก (แอลซีซี); การฉายแผนที่เมอร์เคเตอร์แกนเอียง (โอเอ็มซี)

ABSTRACT

The Universal Transverse Mercator (UTM) map projection is the industry standard and being used for design and construction in Thailand. The UTM projection could introduce high linear distortion up to 965 ppm with the UTM zone over Thailand. Large linear distortion has to be properly applied and is not negligible for all steps during design and construction. To avoid these problems other countries are using alternative Low Distortion Map Projection (LDP). In this study we try to design appropriate LDPs for provincial or ad-hoc construction projects over Thailand. The design of provincial LDP is aiming, that the combined scale factor (CSF) will be less than 20 ppm. This study reveals that 58 Thai provinces, whose LDP could cover over 80% of “urban area”. The applicable LDPs are Transverse Mercator (TM) for 34 provinces, Lambert Conformal Conic (LCC) for 22 province and Oblique Mercator (OMC) for 3 provinces. The remaining 22 provinces are quite large, have mountainous topography and lot of people is living in the hills and mountings. Trying to fit LDPs for these large provinces results linear distortion larger than 20 ppm with maximum value 229 ppm. The results of the study concludes that provincial LDP standard for design and construction in Thailand is technical possible and very encouraging. For the remaining 22 provinces we could be dividing them in to small parts and should define LDP complete for the whold Thailand.

KEYWORD: Low Distortion Map Projection (LDP); Transverse Mercator Projection (TM); Lambert Conformal Conic Projection (LCC); Oblique Mercator (OMC)

1. บทนำ

ในการถ่ายทอดค่าพิกัดบนพื้นผิวโลกที่เป็นพิกัดภูมิศาสตร์หรือพิกัดขั้วเอเดติกส์ (ϕ, λ) หรือที่เรียกว่าพิกัดละติจูดและลองจิจูด การถ่ายทอดค่าพิกัดบนพื้นผิวโลกไปบนระนาบแผนที่จะอาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เรียกว่าการฉายแผนที่ (map projection) สำหรับงานออกแบบและก่อสร้างโครงการต่างๆในประเทศไทยกำหนดให้ใช้ระบบการฉายแผนที่ที่ทรานสเวอร์สเมอร์เคเตอร์ ยูทีเอ็ม (Universal Transverse Mercator : UTM) การฉายแผนที่ยูทีเอ็มเป็นมาตรฐานสากลและในพื้นที่ประเทศไทยอยู่ในพื้นที่การฉายแผนที่ยูทีเอ็ม 2 โซนคือโซน 46 และโซน 47 การฉายแผนที่ยูทีเอ็มในแต่ละโซนกำหนดให้ค่าสเกลแฟกเตอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9996 ไปจนถึง 1.00010 หรือคิดเป็นความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นในโซนใดๆอาจสูงที่สุดได้ถึง 1:10,000 หรือ 1,000 ppm หน่วย ppm เป็นความคลาดเคลื่อน part per million หรืออาจเทียบให้เห็นภาพว่าเทียบเท่า 1 มิลลิเมตรในระยะ 1 กิโลเมตร กรณีพิจารณาเฉพาะพื้นที่เป็นแผ่นดินของไทยจะเห็นได้ว่าบริเวณด้านตะวันออกของจังหวัดนครราชสีมาในแนวลองจิจูด 102° องศาพาดผ่าน หรือในแนวชายขอบของโซนยูทีเอ็มโซน 47 และ โซน 48 และในตำแหน่งขอบเขตชายแดนที่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมากจะมีความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นสูงสุด 965 ppm

ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นเป็นสัดส่วนของระยะทางราบที่รังวัดได้บนพื้นผิวโลกที่ลดทอนเป็นระยะทางบนระนาบบนพื้นผิวทรงรีของโลกเรียกว่า “true distance” เทียบกับระยะทางบนระนาบแผนที่ที่เรียกว่า “grid distance” ในขณะที่ความคลาดเคลื่อนใน

การรังวัดสมัยใหม่ เช่น การรังวัดเส้นฐาน GNSS อาจคลาดเคลื่อนเพียง 1 ถึง 10 ppm การรังวัดพิกัดด้วยกล้องโทเทิลสเตชันในระยะทางไม่เกิน 250 เมตร อาจคลาดเคลื่อนได้ 5 มิลลิเมตรหรือคิดเป็นความคลาดเคลื่อนเชิงเส้น 20 ppm เป็นต้น ดังนั้นความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นที่เป็นผลจากการฉายแผนที่ยูทีเอ็ม ถือได้ว่าเป็นความคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่ทำให้งานออกแบบและการรังวัดและคำนวณในงานก่อสร้างจะต้องมีการคำนวณประยุกต์ใช้ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นจากยูทีเอ็มอย่างระมัดระวังและหลีกเลี่ยงไม่ได้ในทุกขั้นตอนในวงจรการก่อสร้าง นอกจากนั้นการคำนวณบนระนาบแผนที่ผ่านการฉายแผนที่ยูทีเอ็มทำให้ภาระงานการเขียนแบบ CAD การประมวลภูมิสารสนเทศ GIS มีความยุ่งยากซับซ้อนเกิดขึ้นตามไปด้วย

ในสหรัฐอเมริกา มีแนวคิดในการฉายแผนที่ชนิดความคลาดเคลื่อนต่ำ (Low Distortion Map Projection : LDP) มาใช้ในโครงการก่อสร้างและการรังวัดในท้องถิ่น ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1933 โดยหน่วยงาน Coast and Geodetic Survey, NOAA ได้พัฒนาระบบการฉายแผนที่ระบบพิกัดฉากที่ช่วยให้งานออกแบบและการรังวัดพร้อมการคำนวณทำได้ง่ายเสมือนหนึ่งการปฏิบัติงานอยู่บนระนาบราบที่เรียกว่า Plane Surveying การพัฒนาแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ LDP ในสหรัฐอเมริกา รู้จักกันในนามของระบบพิกัดแผนที่ State Plane Coordinate System (SPCS) และพัฒนาต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันตามนโยบายของรัฐบาลสหรัฐที่เรียกว่า State Plane Coordinate System of 2022 : SPSC2022 และเป็นส่วนหนึ่งของ National Spatial Reference System (NSRS) [5] การฉายแผนที่ระบบพิกัดฉากในลักษณะเดียวกันนี้เกิดขึ้นมาก่อนในยุโรป ยุโรปเป็นแหล่งกำเนิดและการคิดค้นประดิษฐ์โดยนักคณิตศาสตร์ที่มีชื่อเสียงหลายๆ ท่าน การฉายแผนที่ระบบพิกัดฉากที่นิยมใช้แพร่หลายในยุโรป รู้จักกันในชื่อของ Gauss Krüger Projection (GK) สำหรับตัวอย่างการประยุกต์ใช้การฉายแผนที่ชนิดความคลาดเคลื่อนต่ำในประเทศไทยล่าสุดคือ การดำเนินการในโครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน (กรุงเทพฯ – นครราชสีมา) ผู้ออกแบบได้เลือกระบบการฉายแผนที่ทราานเวอร์สเมอเคเตอร์บนพื้นหลักฐาน WGS94 (WGS-TM) พร้อมแบ่งโซนการฉายแผนที่ออกเป็น 3 โซน เรียกว่า The First/Second/Third/Fourth Construction Coordinate Systems ตลอดระยะทางการออกแบบและก่อสร้างรถไฟความเร็วสูง 250 กิโลเมตร เริ่มต้นจากกรุงเทพฯ ไปจนถึงจังหวัดนครราชสีมา ในการออกแบบและประยุกต์การฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำในการออกแบบและดำเนินการก่อสร้างพบว่า Combined Scale Factor *CSF* ที่เกิดขึ้นในโครงการฯ มีค่าต่ำสุดมีค่าไม่เกิน -3 ppm ค่าสูงสุดมีค่าไม่เกิน +17 ppm ซึ่งถือว่าเป็นผลของการออกแบบที่ดีมากและส่งผลให้การทำงานที่ต่อเนื่องได้รับความสะดวก และเกิดประสิทธิภาพในการก่อสร้าง [1]

2. การฉายแผนที่ชนิดคงรูปและสเกลแฟกเตอร์

การศึกษาพัฒนาการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ LDP สำหรับประเทศไทยรายจังหวัด การฉายแผนที่ชนิดความคลาดเคลื่อนต่ำเป็นการประยุกต์ใช้ฉายแผนที่ชนิดคงรูป (conformal map projections) ที่มีให้เลือกหลายรูปแบบ การฉายแผนที่ชนิดคงรูปในการศึกษานี้จะครอบคลุมการฉายแผนที่คงรูป 3 ชนิดพร้อมอักษรย่อคือ ทราานเวอร์สเมอเคเตอร์ (Transverse Mercator : TM), แลมเบิร์ตคอนฟอร์มอลโคนิก (Lambert Conformal Conic Projection : LCC) เมอร์เคเตอร์แกนเอียง (Oblique Mercator : OMC) รายละเอียดการฉายแผนที่ทั้ง 3 ชนิดสามารถหาอ่านได้ใน [8]

การออกแบบการฉายแผนที่จะตั้งเป้าให้ผลของการฉายแผนที่ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นรวมในพื้นที่ที่กำหนดเช่นในเขตจังหวัดใดๆ ให้ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นให้มีค่าน้อยกว่า 20 ppm หรือ 20 มิลลิเมตรต่อกิโลเมตร ซึ่งเป็นเกณฑ์ค่าที่ยอมรับ (tolerance) ที่วงการก่อสร้างถือว่าอยู่ในเกณฑ์ดี การออกแบบการฉายแผนที่ชนิดความคลาดเคลื่อนต่ำทำได้โดยการกำหนดรูปแบบการฉายแผนที่คงรูปโดยอาศัยแผ่นคลี่ของผิวรูปทรงของทรงกระบอกหรือทรงกรวย และเลือกทิศทางการสวมครอบไปบนทรงรี

โลกให้แบบแผนที่พื้นผิวภูมิประเทศให้มากที่สุด เพื่อให้สัดส่วนระยะทางรังวัดกับระยะทางบนระนาบแผนที่แตกต่างกันน้อยที่สุด โดยพิจารณาเฉพาะในพื้นที่ที่ให้ความสำคัญเช่น “พื้นที่เมือง” การกำหนดรูปแบบจะเป็นการเลือกพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ตำแหน่งพิกัดศูนย์กลางแผนที่ของการวางตัว ตำแหน่งของเมริเดียนกลาง (central meridian) หรือเส้นขนานกลาง (central parallel)

ในตารางต่อไปนี้ได้สรุป การฉายแผนที่ทรงรูป 3 ชนิด นอกจากจะต้องกำหนดสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ k_0 แล้วจะต้องมีพารามิเตอร์สำคัญและความเหมาะสมกับพื้นที่ที่จะประยุกต์ใช้สรุปได้ในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1 การฉายแผนที่ชนิดทรงรูปที่พิจารณาเลือกใช้

การฉายแผนที่	ระนาบแผนที่และการวางตัว	พารามิเตอร์สำคัญ	ความเหมาะสมกับพื้นที่
ทรานเวอร์สเมอเรเตอร์ (Transverse Mercator : TM)	ทรงกระบอกหมุนขวาง ขนานกับระนาบ อีควาเตอร์	จุดกำเนิด (φ_0, λ_0) เมริเดียนกลาง (λ_0)	ขอบเขตจังหวัดที่วางตัวใน เหนือ-ใต้
แลมเบิร์ตคอนฟอร์มัลโคนิก (Lambert Conformal Conic Projection : LCC)	ทรงกรวยครอบในแกน หมุนของโลก ผิวกรวย สัมผัสพื้นที่เป้าหมาย	จุดกำเนิด (φ_0, λ_0) เส้นขนานกลาง (φ_0)	ขอบเขตจังหวัดที่วางตัวใน แนวตะวันออก-ตะวันตก
เมอร์เคเตอร์แกนเอียง (Oblique Mercator : OMC)	แกนกลางทรงกระบอก หมุนไปในทิศทาง ต่างๆ	จุดกำเนิด (φ_0, λ_0) ทิศทางแกนเอียง skew (α_0)	ขอบเขตจังหวัดที่วางตัวใน ทิศทางอื่นๆ

จากตารางข้างต้นรูปแบบการฉายแผนที่ทรงรูปทั้ง 3 ชนิด TM, LCC และ OMC จะต้องมีการกำหนดจุดศูนย์กลางกำหนดแผนที่ ณ ตำแหน่งใด ๆ พิกัดขั้วโลกเป็น (φ_0, λ_0) แล้วกำหนดให้มีเส้นเมริเดียนกลาง (central meridian) สำหรับการฉาย TM หรือ เส้นขนานกลาง (central parallel) สำหรับการฉาย LCC หรือทิศทางแกนสำหรับการฉาย OMC ตามลำดับ ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นที่จะเกิดขึ้นในรูปแบบค่าสเกลแฟกเตอร์จะมีขนาดเปลี่ยนแปลงในระยะห่างออกมาจากแกนกลางการฉาย ค่าสเกลแฟกเตอร์ ณ จุดปฏิบัติงานนี้เรียกว่าค่าสเกลแฟกเตอร์ k บางครั้งเรียกว่า Point Scale Factor หรือ Projection Scale Factor (PSF) ก็เรียกค่าสเกลแฟกเตอร์จะแปรเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์ของฟังก์ชันการฉายทั้ง 3 รูปแบบ เรียกชื่อฟังก์ชันอย่างย่อเป็น $TM(\dots), LCC(\dots), OMC(\dots)$ ตามลำดับ ฟังก์ชันการฉายทั้ง 3 รูปแบบมีตัวแปรสำคัญดังนี้

$$k = k_0 \cdot TM(\varphi_0, \lambda - \lambda_0, \varphi) \quad (1)$$

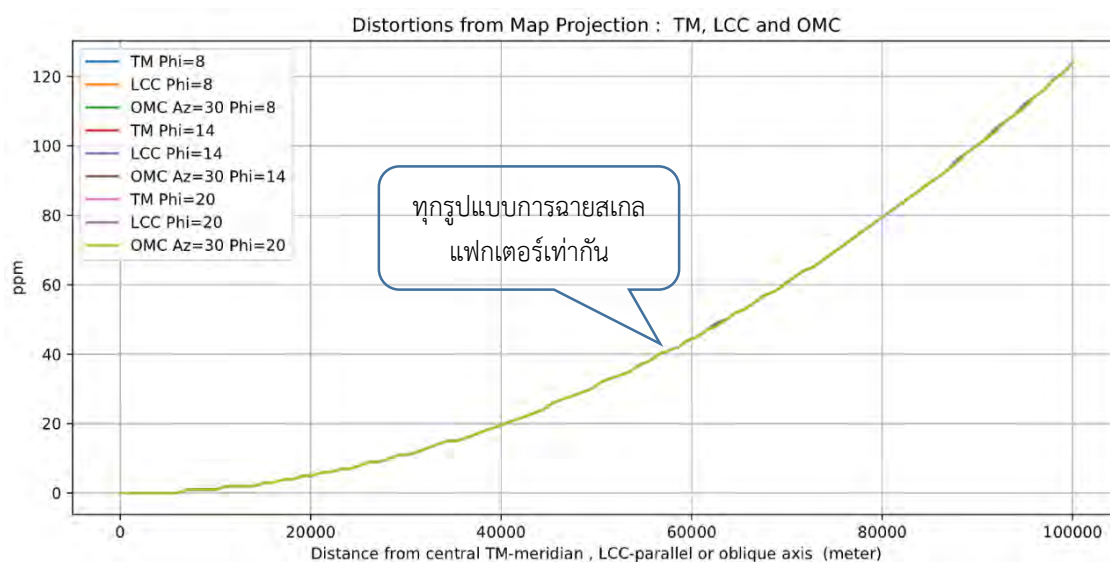
$$k = k_0 \cdot LCC(\varphi - \varphi_0, \lambda) \quad (2)$$

$$k = k_0 \cdot OMC(\varphi_0, \lambda_0, \alpha_0, \varphi, \lambda) \quad (3)$$

จากสมการข้างต้น สเกลแฟกเตอร์การฉาย ณ จุดเริ่มต้นบริเวณแกนกลางของการฉายแผนที่เป็น k_0

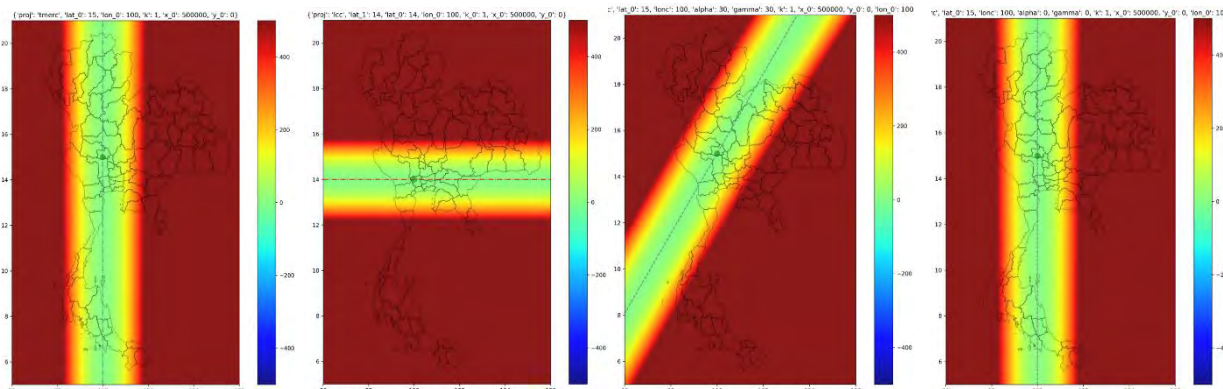
จากคุณลักษณะของสัณฐานของโลกและการออกแบบทางคณิตศาสตร์การฉายแผนที่ตามความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้จะเห็นได้ว่า ในการฉายแผนที่ทั้ง 3 รูปแบบมีคุณสมบัติสอดคล้องกัน กล่าวคือค่าสเกลแฟกเตอร์จะมีขนาดใหญ่ขึ้นในระยะตั้งฉาก

ออกมาจากแกนการฉายเรียกในที่นี้ค่า k และจะมีขนาดเป็น 20 ppm ที่ระยะห่างจากแกนกลางการฉายที่ระยะประมาณ 40 กิโลเมตร ในกราฟต่อไปนี้แสดงค่าคลาดเคลื่อนเชิงเส้นของการฉายแผนที่ทั้ง 3 รูปแบบ TM, LCC และ OMC เมื่อกำหนดศูนย์ก้านเนดที่ตำแหน่งต่างๆ ในพื้นที่ประเทศไทย ที่ระยะห่างใดตั้งจากนั้บออกจากเมอริเดียนกลางหรือเส้นขนานกลาง และสำหรับการฉาย OMC ที่แกนกลางทรงกระบอกหมุนไปในทิศทางต่างๆ รอบจุด $-90^\circ > \alpha_0 > 90^\circ$ ที่พิจารณาความคลาดเคลื่อนเชิงเส้น k จะนับจากระยะห่างตั้งจากออกมาจากแกนเอียง (skew axis) ผลการคำนวณค่าคลาดเคลื่อนเชิงเส้นหรือสเกลแฟกเตอร์ พบว่ามีการฉายแผนที่ทั้งสามให้ค่าคลาดเคลื่อนเชิงเส้น k ในหน่วย ppm มีความคงเส้นคงวา (consistency) หรือมีค่าเท่าๆ กัน ซึ่งจะช่วยการออกแบบการฉายแผนที่สำหรับแต่ละจังหวัด มีความสะดวกในการออกแบบเนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อนเชิงเส้น k เหมือนกัน



รูปที่ 1 สเกลแฟกเตอร์ k ในพื้นที่ประเทศไทยสำหรับฉายแผนที่ TM, LCC และ OMC

ในรูปถัดไปแสดงการกระจายค่าสเกลแฟกเตอร์จากการฉายแผนที่ k อันเนื่องจากระยะห่างจากแกนกลางการฉายแผนที่ทั้งรูปทั้ง 3 ชนิด TM, LCC และ OMC โดยมีพารามิเตอร์จุดศูนย์ก้านเนด เส้นเมอริเดียนกลาง เส้นขนานกลาง จะเห็นว่าในระยะตั้งจากออกจาก “แกนกลาง” การฉายแผนที่ทั้ง 3 ชนิดมีการกระจายรูปร่างเหมือนกัน มีความคงเส้นคงวาดังกล่าวมาแล้ว ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า แผนที่การฉายทั้ง 3 ชนิดสามารถประยุกต์ใช้พัฒนาการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำสำหรับประเทศไทยรายจังหวัดได้ดีเหมือนกัน คุณลักษณะการกระจายค่าสเกลแฟกเตอร์จากการฉายแผนที่ k อันเนื่องจากระยะห่างจากแกนกลางการฉายแผนที่ทั้ง 3 ชนิด TM, LCC และ OMC แสดงไว้เป็นตัวอย่างในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2 ค่าสเกลแฟกเตอร์จากการฉายแผนที่ชนิดรูปทั้ง 3 ชนิด TM, LCC OMC แกนเอียง 30° และ OMC แกนเอียง 0°

3. การเลือกกระบวนการฉายแผนที่ที่ควรรูป

การเลือกกระบวนการฉายแผนที่ที่ควรรูปให้เราจะต้องเลือกกระบวนการฉายที่มีค่าระดับเฉลี่ยใกล้เคียงค่าระดับของพื้นที่ที่ให้ความสำคัญ (Dennis, 2016) พื้นที่ที่ให้ความสำคัญในที่นี้คือพื้นที่ “เมือง” ที่อาจมีกิจกรรมก่อสร้างเกิดขึ้นบ่อย ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นเนื่องจากความสูงต่าง (Height Scale Factor : HSF) ที่จะเกิดขึ้นคือค่าสเกลแฟกเตอร์รวมที่เป็นผลจากสเกลแฟกเตอร์จากการฉายแผนที่ลงไปบนพื้นผิวทรงรีโลกและสเกลแฟกเตอร์ที่เกิดจากความสูงต่างของค่าระดับพื้นที่ปฏิบัติงานกับระนาบพื้นผิวทรงรีโลก ในกรณีการฉายแผนที่ชนิดรูปทั้ง 3 ชนิด TM, LCC และ OM ผู้ออกแบบจะเลือกกระบวนการฉายแผนที่ให้แนบชิดกับภูมิประเทศเฉลี่ยในพื้นที่ใช้งานให้มากที่สุด ตัวอย่างเช่น ในพื้นที่ก่อสร้างที่สนใจมีค่าระดับเฉลี่ยของภูมิประเทศเป็น h_{PP} ซึ่งค่าระดับในที่นี้เป็นค่าระดับเหนือทรงรี (ellipsoidal height : h) สำหรับการพิจารณาความสูงภูมิประเทศในแต่ละจังหวัด ในการศึกษาได้เลือกใช้แบบจำลองระดับของโลก TanDEM-X (German Aerospace Center, DLR 2018) เป็นข้อมูลใช้ในการประมาณการค่าระดับเฉลี่ยของแต่ละจังหวัด h_{PP} และแบบจำลองระดับ Tandem-X ให้ค่าระดับเป็นชนิดความสูงเหนือทรงรี (h) ในกรณีที่แบบจำลองระดับสากล TanDEM-X มีความผิดพลาดหรือไม่สมบูรณ์ งานวิจัยจะเปลี่ยนไปใช้ค่าระดับ NASADEM [10] ในพื้นที่จังหวัดนั้นๆ ค่าระดับ NASADEM เป็นค่าระดับชนิดออร์โทเมตริก H_{PP} ปรับแก้ด้วยแบบจำลองจีอยด์ EGM-2008 แล้ว ดังนั้นหากจะใช้งานจะต้องแปลงค่าระดับให้เป็นค่าระดับเหนือทรงรี (h) เสียก่อน การแปลงค่าระดับความสูงในประเทศไทยปัจจุบันสามารถใช้แบบจำลองระดับ TGM-2017 [2] ซึ่งให้ความละเอียดถูกต้องดีกว่าสำหรับพื้นที่ประเทศไทย

หากได้เลือกกระบวนการแผนที่ h_{PP} ที่จะแนบไปกับภูมิประเทศโดยเฉลี่ยนี้แล้ว จากนั้นเราจะสเกลพื้นผิวทรงรีของโลก เช่นพื้นหลักฐาน WGS-84 โดยกำหนดค่านวนสเกลแฟกเตอร์การฉายแกนกลางการฉายเป็น k_0 และค่า k_0 อาจคำนวณได้จากค่าประมาณรัศมีโลก ณ จุดสัมผัสจากความสัมพันธ์ปรากฏใน [3] ดังสมการ

$$k_0 = 1 + \frac{h_{PP}}{R} \quad (4)$$

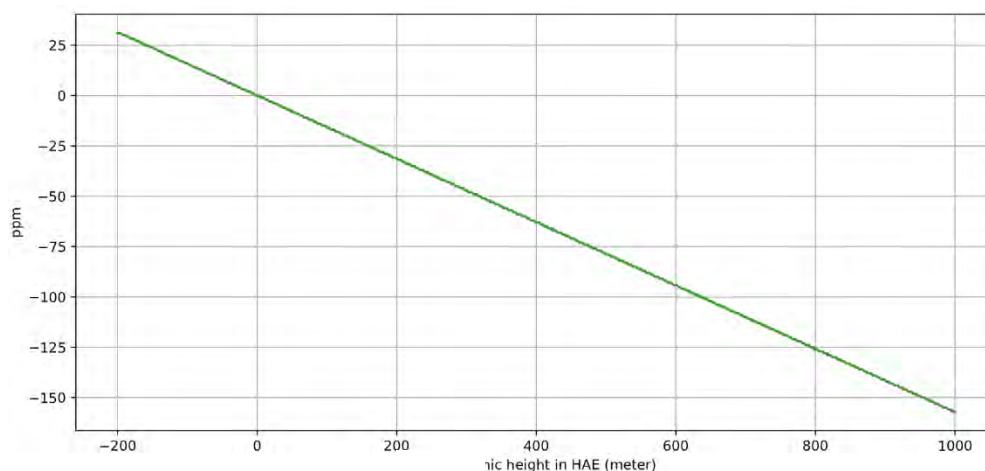
โดยที่ R คือรัศมีโลกโดยเฉลี่ยและอาจใช้ Gaussian Earth Radius คำนวณจากค่ารัศมีโลก radius of curvature in the (north-south) meridian (M) และ radius of curvature in the prime vertical (N) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของละติจูดของ ณ ตำแหน่งของโครงการ

$$R = \sqrt{MN} \quad (5)$$

[illegible]

ในแต่ละพื้นที่ปฏิบัติงาน เช่น การรังวัดด้วยกล้องโทเทิลสเตชัน พื้นที่อาจมีค่าระดับแตกต่างกันไปจากระนาบการฉายเฉลี่ย h_{PP} ที่เลือกไว้ในตอนต้น สมมติให้มีค่าระดับเหนือรูปทรงรีเป็น h_{Topo} ค่าระยะทางจากระยะทางลาดเอียงจะทอนให้อยู่ในระนาบราบเสียก่อน จากนั้นจะทอนลงระนาบพื้นผิวทรงรี ตามสัดส่วนระนาบความสูงของภูมิประเทศที่ปฏิบัติงานอยู่ ระยะทางจากการรังวัดด้วยกล้องโทเทิลสเตชัน ก็จะลดทอนลงบนระนาบของการฉายแบบคงรูป นั่นคือพื้นผิวทรงรีโลก ค่าสเกลแฟกเตอร์นี้เรียกว่า height scale factor (HSF) และเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

สำหรับในพื้นที่ประเทศไทยค่าระดับต่ำสุดในพื้นที่ภาคกลาง กทม. ค่าระดับใกล้ 0 เมตร ส่วนค่าระดับสูงสุดบริเวณยอดดอยอินทนนท์สูงสุดในประเทศอาจประมาณเป็น 2,500 เมตร ในทางปฏิบัติกิจกรรมก่อสร้างส่วนใหญ่อาจเกิดขึ้นที่ระดับความสูงไม่เกิน 1,000 เมตร จากความสัมพันธ์เมื่อคำนวณสเกลแฟกเตอร์จากค่าระดับ *HSF* พบว่าในพื้นที่ประเทศไทยค่าสเกลแฟกเตอร์เนื่องจากความสูงต่างจะอยู่ที่ -20 ppm ที่ความสูงต่าง +125 เมตร หรือคิดเป็น -120 ppm ที่ความสูงต่าง +1,000 เมตร ดังนั้น หากได้เลือกกระบวนการฉายและรูปแบบการฉายแผนที่คงรูปที่เหมาะสม ค่าสเกลแฟกเตอร์จากความสูง *HSF* ที่มีค่าเป็นลบนี้ก็จะไปชดเชยค่าสเกลแฟกเตอร์จากการฉายแผนที่ *k* ที่จะเป็นค่าบวกได้



รูปที่ 4 สเกลแฟกเตอร์ที่เกิดจากความสูงต่างภูมิประเทศ HSF

ดังนั้นหากนำสเกลแฟกเตอร์ทั้งสอง k และ HSF มาคิดคำนวณรวมกันจะเรียกว่า ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม หรือ Combined Scale Factor หรือ CSF ความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการ

$$CSF = k \cdot HSF \quad (7)$$

ในกรณีการประยุกต์ใช้การฉายแผนที่พบว่าค่าสเกลแฟกเตอร์ต่างๆ มักจะมีค่าเข้าใกล้ 1 มาก ดังนั้นค่าสเกลแฟกเตอร์จะมีจุดทศนิยมในตำแหน่งท้ายๆ จึงมีนัยสำคัญยิ่ง ดังนั้นเพื่อความแม่นยำในการคำนวณเชิงเลขและเพื่อความสะดวกในการเรียกใช้งาน เรานิยมแสดงแทนด้วยความผิดพลาดเชิงเส้นที่ปริมาณ ppm หรือ part per million จากความสัมพันธ์ ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม CSF จะสามารถเขียนในรูปแบบ ppm เราสามารถวิเคราะห์และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสเกลแฟกเตอร์ผ่านความสัมพันธ์ ppm และทำให้การคำนวณสะดวกดังนี้

$$ppm_{CSF} = ppm_k + ppm_{HSF} \quad (8)$$

โดยที่ $ppm_{\{CSF | k | HSF\}}$ เป็นผลการคำนวณสเกลแฟกเตอร์มาจากค่า CSF, k, HSF ตามลำดับ

เมื่อทำการรังวัดระยะทางในพื้นที่โครงการ ได้ระยะทางราบเป็น True Distance (TD) เราจะทอนลงบนระนาบการฉายแผนที่ที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ LDP เรียกในที่นี้ว่า ระยะทางบนแผนที่หรือระยะทางกริด Grid Distance (GD)

$$GD = CSF \cdot TD \quad (9)$$

ดังนั้นหากสเกลแฟกเตอร์ร่วม CSF มีปริมาณน้อยมากเช่น น้อยกว่า 20 ppm จะทำให้ระยะการรังวัดระยะทางราบ TD เทียบเท่ากับระยะทางบนแผนที่หรือกริด GD จึงทำให้เกิดความสะดวกดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ในกรณีตัวอย่างสำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา การฉายแผนที่คงรูปทั้ง 3 ชนิด TM, LCC และ OMC บนพื้นหลักฐาน GRS-80 ที่มีขนาดเกือบเท่ากับพื้นหลักฐาน WGS-84 อัตราการเปลี่ยนแปลงสเกลแฟกเตอร์เนื่องจากการฉายแผนที่ k ที่เกิดขึ้นในระยะห่างตั้งฉากจากห้วงออกมจากเส้นเมริเดียนกลางหรือเส้นขนานกลางห่างออกมา 40 กิโลเมตร ค่าสเกลแฟกเตอร์ k จะเป็น 20 ppm

สำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงสเกลแฟกเตอร์อื่นเนื่องจากความสูงภูมิประเทศเหนือหรือใต้ระนาบการฉายที่เรียกว่า *HSF* จะเป็น 20 ppm สำหรับความสูงต่าง 125 เมตร[3] และกรณีตัวอย่างในสหรัฐอเมริกา การออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ *LDP* สำหรับงานก่อสร้างอาจตั้งเป้าหมายให้สเกลแฟกเตอร์ร่วม *CSF* ไว้ที่ 20 ppm ไปจนถึง 100 ppm ตัวอย่างเช่น การออกแบบฉาย *LDP* ตามนโยบาย SPSC2020

สำหรับการวัดมุมที่ได้จากผลต่างของการรังวัดทิศทางนั้น เนื่องจากการฉายแผนที่ทรงรูปชนิด *TM*, *LCC* และ *OMC* ที่เป็นการฉายชนิดทรงรูป (conformal) ดังนั้นผลการรังวัดมุมก็สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงไม่มีการปรับแก้ใดๆ และเมื่อพื้นที่ปฏิบัติงานอยู่ห่างจากเส้นเมริเดียนกลางมากหรืออยู่เหนือหรือใต้ระนาบการฉายมาก การลดทอนระยะทางก็สามารถทำได้ด้วยความสัมพันธ์ค่าสเกลแฟกเตอร์สำหรับค่าระดับ *HSF* ที่กล่าวมาแล้ว ค่าระดับในพื้นที่ปฏิบัติงานอาจใช้ค่าระดับที่ได้จากหมุดควบคุมในโครงการที่อยู่ใกล้ที่สุด หรือหากจำเป็นสามารถอ่านได้จากแบบจำลองระดับโลก เช่น *NASADEM* หรือ *Tandem-X* ดังกล่าวมาแล้ว

การฉายแผนที่ชนิด *TM*, *LCC* และ *OMC* หากเทียบกับการฉายแผนที่ยูทียูเอ็มที่เลือกค่าสเกลแฟกเตอร์ที่เมริเดียนกลางเป็น $k_0 = 0.9996$ ทำให้ค่าสเกลแฟกเตอร์แปรเปลี่ยนในจุดทำงานที่ห่างจากเมริเดียนกลางระหว่าง 0.9996 ถึง 1.0004 หรือคิดเป็นค่าคลาดเคลื่อนเชิงเส้นสูงสุดเป็น 400 ppm หรือ 0.4 เมตรต่อระยะทาง 1 กิโลเมตร ณ ตำแหน่งบริเวณเมริเดียนกลางและบริเวณใกล้ขอบของโซนยูทียูเอ็ม การลดทอนระยะทางทั่วทั้งโซนยูทียูเอ็มมีความสำคัญและละเอียดไม่ได้ทั้งในขั้นตอนการเขียนแบบและการลงมือรังวัดเพื่อการก่อสร้าง

4. ขั้นตอนการวิเคราะห์การเลือกการฉายแผนที่และกำหนดพารามิเตอร์รายจังหวัด

การวิเคราะห์เลือกการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ *LDP* ว่าควรจะเป็น การฉายทรานเวอร์สเมอเรเตอร์ (Transverse Mercator : *TM*), การฉายแลมเบิร์ตคอนฟอร์มอลโคนิก (Lambert Conformal Conic Projection : *LCC*) หรือการฉายเมอร์เคเตอร์เอียง (Oblique Mercator : *OMC*) จะเริ่มจากการพิจารณาพื้นที่ขอบเขตในแต่ละจังหวัด ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้อมูลขอบเขตจังหวัดจากชุดข้อมูล FGDS v.4.1 Provincial Administration จากข้อมูลเรขาคณิตรูปหลายเหลี่ยม Polygon geometry เราพิจารณาขอบเขตสุด ในแนวเหนือใต้ และแนวตะวันออกไปตะวันตก กรณีพื้นที่จังหวัดทอดยาวในแนวเหนือใต้มากกว่าแนวตะวันออกไปตะวันตก เราจะกำหนดการฉายแผนที่เป็น *TM* แต่ถ้าพื้นที่จังหวัดทอดยาวแนวตะวันออกไปตะวันตกยาวมากกว่าขอบเขตเหนือ-ใต้ จะแนะนำกำหนดการฉายแผนที่เป็น *LCC* ด้วยเหตุผลของการกระจายค่าสเกลแฟกเตอร์ของการฉายแผนที่ทรงรูป ชนิด *TM*, *LCC* และ *OMC* ที่ได้วิเคราะห์ไว้ก่อนหน้านี้

การสร้างแผนที่การฉายความคลาดเคลื่อนต่ำวัตถุประสงค์หลักเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบก่อสร้างต่างๆ ดังนั้นหากคำนึงถึงประโยชน์ที่จะเกิดขึ้น พื้นที่“ประชากรหนาแน่น” หรือพื้นที่ “เมือง” จะได้รับการพิจารณาให้น้ำหนักพิเศษ เนื่องจากเราคงไม่สามารถออกแบบให้การฉายแผนที่ทุกๆ จุดบนพื้นที่ประเทศไทยมีความคลาดเคลื่อนต่ำ หรือเกณฑ์น้อยกว่า 20 ppm เสมอไป จากเงื่อนไขพื้นที่ “เมือง”

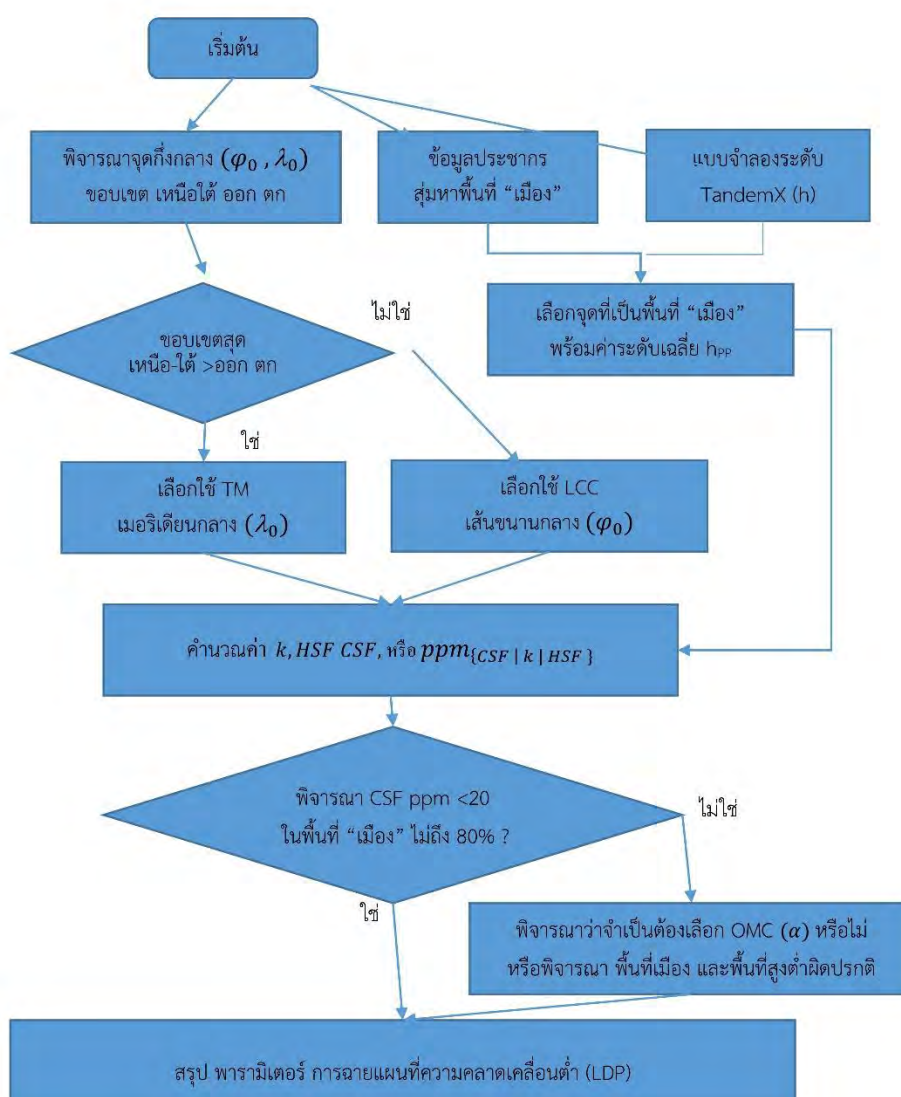
กระบวนการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ค่าพิคจุดสุ่มที่ได้จากแบบจำลองระดับ ในที่นี้คือ *TANDEM-X* [7] ไปอ่านค่าระดับความสูงภูมิประเทศ (h) และเพื่อความเร็วในการคำนวณ ในงานวิจัยนี้กำหนดระยะห่างกริดสุ่มเป็น 500 เมตร หรือคิดเป็นระยะทางในหน่วยมุมเป็น $s = \frac{500}{111,000} = 0.0045045045 \dots$ องศา ความละเอียดกริด 500 เมตร ทำให้การคำนวณสอดคล้องกับความละเอียดของ ข้อมูลประชากร และข้อมูลแบบจำลองระดับ ที่นำมาใช้ประกอบ อีกทั้งเพื่อให้จำกัดให้การคำนวณไม่นานเกินไป

ปัจจุบันบนคอมพิวเตอร์ PC Linux/Ubuntu ซีพียู i7 หน่วยความจำ 32 จิกะไบต์ และซอฟต์แวร์การฉายแผนที่ python/pyproj4/proj4 การคำนวณแต่ละจังหวัดใช้เวลาไม่เกิน 1 นาที แต่อย่างไรก็ตามยังให้ผลการวิเคราะห์ที่น่าจะถูกต้องแม่นยำพอเพียง

แบบจำลองระดับ TandemX ซึ่งค่าระดับที่ให้ป็นระดับเหนือทงรี h อยู่แล้ว สามารถนำไปคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์เนื่องจากค่าระดับ H_{SF} ได้เลย จุดระดับที่เลือกไว้สามารถนำค่าพิกัดไปคำนวณหาสเกลแฟกเตอร์ของการฉาย k ได้ แล้วสามารถคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม CSF

ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม CSF ที่ได้ทั่วพื้นที่จังหวัด นำมาประเมินเทียบกับจุดที่ปรากฏในพื้นที่ “เมือง” หากจุดที่ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม CSF มีค่าน้อยกว่า 20 ppm ก็ถือว่าประสบผลสำเร็จ นำสรุปรวมว่าสามารถครอบคลุมพื้นที่ “เมือง” ในจังหวัดนั้นๆ ถึงเกณฑ์ครบ 80% เป็นอย่างน้อยหรือไม่

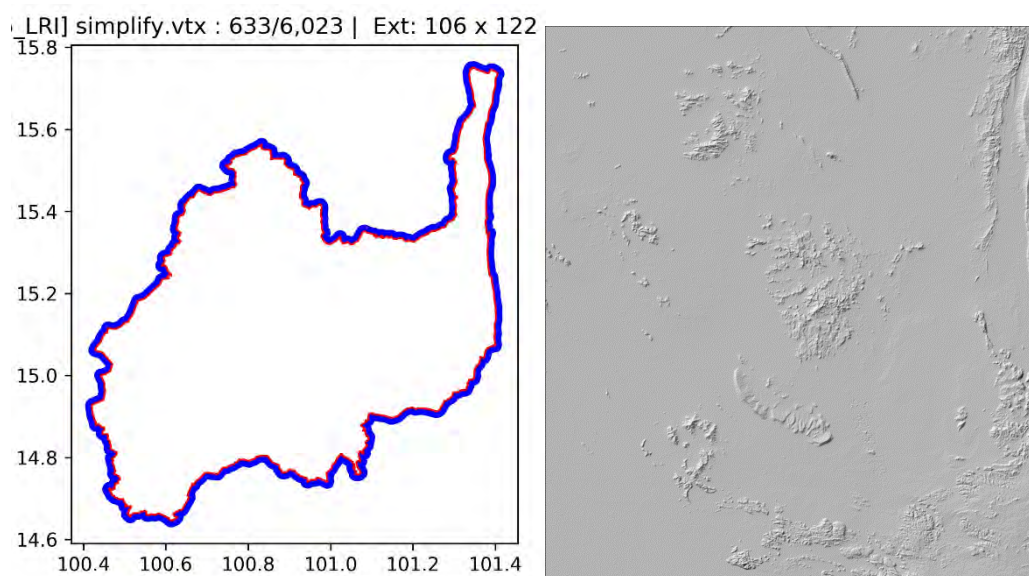
แนวทางวิเคราะห์เพื่อกำหนดการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ LDP สามารถสรุปเป็นรูปแบบโฟลว์ชาร์ตดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 5 กระบวนการวิเคราะห์เลือกการฉายแผนที่ TM, LCC และ OMC สำหรับแต่ละจังหวัด

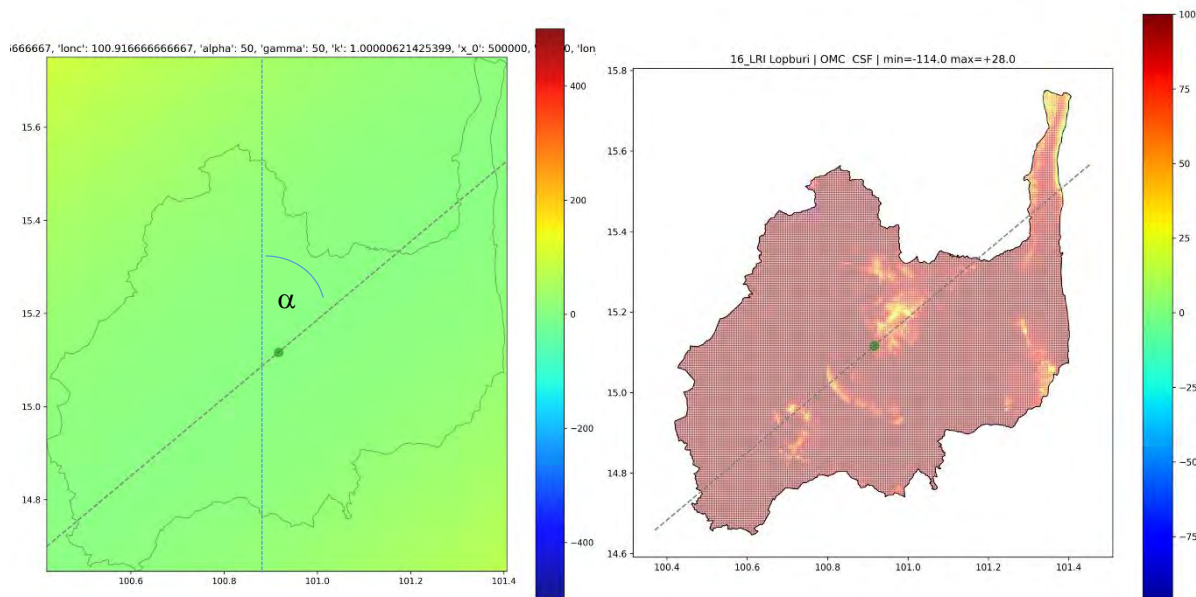
ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ในงานวิจัยขอใช้ตัวอย่างเป็น “จังหวัดลพบุรี” จังหวัดลพบุรีเป็นจังหวัดขนาดใหญ่ปานกลางมีขอบเขตสุดตะวันตกจรดตะวันออก 106 กิโลเมตรและขอบเขตสุดจากเหนือจรดใต้ 122 กิโลเมตร ดังนั้นรูปแบบการฉายแผนที่ที่เหมาะสมขึ้นต้นคือ ทราบเวอร์เมอร์เคเตอร์ TM แต่เนื่องด้วยขอบเขตตะวันออกไปตะวันตกไปข้างละ 61 กิโลเมตรและอาจทำให้เกิดค่าสเกลแฟกเตอร์การฉาย k จากค่าต่ำสุด 6 ppm ไปสูงสุดถึง 41 ppm ในขณะที่เดียวกันภูมิประเทศเป็นภูเขาเกือบ 1 ใน 3 ของจังหวัด ค่าระดับเหนือทรีจากแบบจำลองระดับ TandemX ให้ไว้มีค่าเฉลี่ย h_{pp} 63 เมตร ในขณะที่ค่าระดับต่ำสุดเป็น -40 เมตร ค่าระดับสูงสุดเป็น +774 เมตร หากคิดเป็นสเกลแฟกเตอร์สำหรับค่าระดับ HSF มีค่ามากถึง -120 ppm

ในการประเมินขั้นแรกได้เลือกการฉายแผนที่เป็น TM พบว่าค่าสเกลแฟกเตอร์รวมที่น้อยกว่า 20 ppm ตกอยู่ในพื้นที่เมืองน้อยกว่า 80% ให้เป็นเกณฑ์ไว้จึงถือได้ว่า ยังครอบคลุมพื้นที่เมืองไม่เพียงพอ เมื่อผ่านขั้นตอนการกำหนดค่าระดับการฉายแล้วทำให้เราคำนวณสเกลแฟกเตอร์รวม CSF ได้ทั่วทั้งจังหวัด หากพิจารณาเฉพาะพื้นที่สำคัญตามที่จำนวนประชากรหนาแน่นเป็น “เมือง” จะได้ค่าระดับความสูงเหนือทรีเป็น h_{pp} เป็น 39.52 เมตร (เปลี่ยนจากเดิม 63 เมตร)



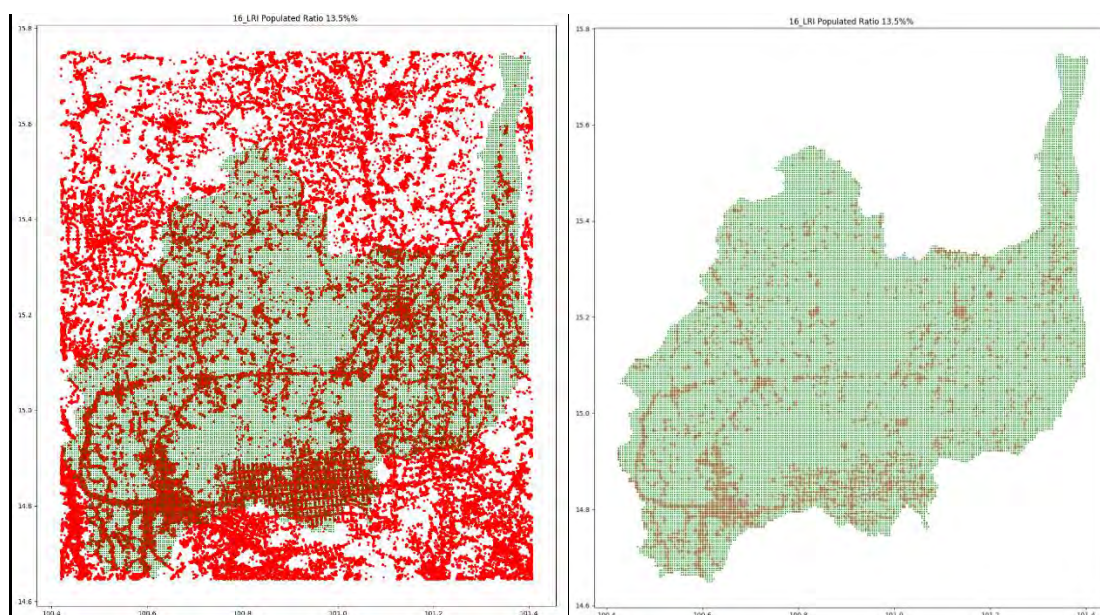
รูปที่ 6 ขอบเขตจังหวัดลพบุรี(ซ้าย) และภาพแสงเงาภูมิประเทศที่เป็นภูเขา (ขวา)

ดังนั้นเพื่อให้สเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ k ที่มีค่าน้อยๆ เพิ่มขึ้นในพื้นที่ โดยหลักการที่ว่าระยะทางห่างจากแกนกลางการฉายแผนที่ออกไปเป็นปัจจัยของสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ k ด้วยรูปร่างของขอบเขตจังหวัดค่อนข้างยาวรีในแนวแกนตะวันตกเฉียงใต้ ทอดยาวไปทางตะวันออกเฉียงเหนือ แนวแกนดังกล่าวประมาณเบื้องต้นมีทิศทางแอดมิช α_0 เป็น 50 องศา การกำหนดการฉายแผนที่จึงเปลี่ยนมาเป็น OMC พร้อมแกนเอียง แอดมิช α_0 เป็น 50 องศา ผลของการเปลี่ยนการฉายจาก TM มาเป็น OMC ทำให้ค่าสเกลแฟกเตอร์การฉายแผนที่ k ลดลง มีค่าต่ำสุด +6 ppm และสูงสุด +32 ppm ตามลำดับ ซึ่งลดลงจากเดิมเล็กน้อย และทำให้พื้นที่ที่มีค่าสเกลแฟกเตอร์รวม CSF มีขนาดน้อยกว่า 20 ppm เป็นสัดส่วนในพื้นที่ “เมือง” เป็น 98.4%



รูปที่ 7 จุดกำเนิดการขยายแผนที่ OMC และแกนเอียง (ซ้าย) ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม CSF (ขวา)

ในการวิเคราะห์ความเป็น “เมือง” จังหวัดลพบุรีมีจุดสุ่มวิเคราะห์รวมกัน 26,686 จุด ในจำนวนนี้จุดที่มีประชากรมากเกิน 20% คือมีจำนวนประชากรในกริด 11 ถึง 788 คน ที่เรียกว่า “พื้นที่เมือง” จุดแสดงพื้นที่เมืองนับรวมได้ 9,534 จุด คำนวณพื้นที่ความเป็นเมืองได้ 35.7% ตัวเลขบอกเป็นนัยยะว่า การตั้งถิ่นฐานของประชากรจังหวัดลพบุรีมีการกระจายตัวทั่วทั้งจังหวัด แต่สำหรับพื้นที่ทั่วไปในจังหวัดลพบุรีนั้น ซึ่งเป็นภูเขามาก และอาจมีพื้นที่ที่ประชากรในลักษณะกระจายอยู่อาศัยเบาบาง ในรูปต่อไปนี้แสดงจุดสุ่มระยะห่าง 500 เมตรที่เลือกใช้ทดลองงานวิจัยสีเขียว และจุดที่เป็นวงกลมสีแดงแสดงมีประชากร



รูปที่ 8 ตำแหน่งที่มีประชากรอาศัยอยู่ (ซ้าย) ตำแหน่งที่คัดเลือกว่าเป็น พื้นที่เมือง 13.5% (ขวา)

ในจังหวัดลพบุรีนี้ในภาพรวมทั้งจังหวัดมีค่าสเกลแฟกเตอร์ $CSF_{min,max,mean}$ ได้เป็น -114.28, 1 ตามลำดับ หากพิจารณาเฉพาะพื้นที่เมือง จะได้ $CSF_{min,max,mean}$ เป็น -86.27, 5 ตามลำดับ

ในลักษณะเดียวกันนี้ในงานวิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์หาการกระจายแผนที่แบบคงรูปทั้งสามรูปแบบที่เหมาะสมกับทุกจังหวัดในประเทศไทย ผลการวิเคราะห์พบว่ามี 58 จังหวัดสามารถกำหนดการกระจายแผนที่ LDP แล้วทำให้สเกลแฟกเตอร์ความคลาดเคลื่อนรวม CSF มีขนาดน้อยกว่า 20ppm โดยพื้นที่ที่ครอบคลุมสเกลแฟกเตอร์ค่าน้อยคิดเป็นพื้นที่ “เมือง” มากกว่า 80% ในจำนวนจังหวัดที่มีศักยภาพในการกำหนดการกระจายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ LPD จำแนกชนิดการกระจายแผนที่ได้เป็น ชนิดทรานเวอร์เมอร์เคเตอร์ TM 34 จังหวัด ชนิดแลมเบิร์ตคอนฟอร์มัลโคนิก LCC 22 จังหวัด และเมอร์เคเตอร์แบบแกนเอียง OMC 3 จังหวัด ปรากฏในรายละเอียด ภาคผนวก ข) เป็นตารางสรุปพารามิเตอร์ของการกระจายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำที่ได้กำหนดในการออกแบบทดสอบในงานวิจัยนี้

ในการศึกษาครั้งนี้ยังคงมี 19 จังหวัดที่ยังไม่สามารถกำหนดการกระจายแผนที่ LDP ใดๆ ที่เหมาะสมได้ สาเหตุอาจเกิดจากจังหวัดมีพื้นที่ขนาดใหญ่มาก เช่น จังหวัดนครราชสีมาที่มีขอบเขตตะวันออกจรดตะวันตกยาวสุดถึง 197 กิโลเมตร จังหวัดเชียงใหม่มีขอบเขตเหนือจรดใต้ยาวสุดถึง 321 กิโลเมตร จังหวัดเหล่านี้มักจะมีปัญหาขอบเขตขนาดใหญ่และประกอบกับมีภูมิประเทศเป็นพื้นที่ราบสลับที่สูงบนภูเขาแล้วมีประชาชนตั้งถิ่นฐานอยู่กระจัดกระจาย รายละเอียดปรากฏใน ภาคผนวก ก) ตารางจังหวัด ขอบเขตค่าระดับความสูงเหนือทรีที่เลือก พร้อมค่าระดับออร์โทเมตริก

ตารางที่ 2 แสดงเปอร์เซ็นต์การครอบคลุมพื้นที่ที่สามารถจำกัดความคลาดเคลื่อนได้น้อยกว่า 20ppm ในกรอบมรณิเปอร์เซ็นต์น้อยกว่า 80%

รหัสจังหวัด	% ครอบคลุมพื้นที่เมือง	สเกลพื้นที่เมือง	% ครอบคลุมจังหวัด	สเกลทั้งจังหวัด	รหัสจังหวัด	% ครอบคลุมพื้นที่เมือง	สเกลพื้นที่เมือง	% ครอบคลุมจังหวัด	สเกลทั้งจังหวัด
10_BKK	100.0	-3.10,1	80.0	-3.14,1	66_PCT	99.9	-16.22,5	46.4	-27.22,5
11_SPK	100.0	-2.4,0	78.6	-9.5,1	70_RBR	89.0	-100.35,4	46.1	-168.35,-16
12_NBI	100.0	-1.4,1	79.7	-1.4,1	72_SPB	97.0	-66.25,6	57.7	-120.25,2
13_PTE	100.0	-2.6,1	79.2	-2.6,1	73_NPT	100.0	-2.10,2	79.9	-2.10,2
14_AYA	100.0	-2.15,2	64.4	-2.15,3	74_SKN	100.0	-3.4,1	79.6	-3.4,1
15_ATG	100.0	-1.4,1	67.4	-3.4,1	75_SKM	100.0	-2.3,0	77.1	-2.3,1
16_LRI	98.4	-86.27,5	35.1	-114.28,1	76_PBI	92.0	-137.30,5	27.7	-222.30,-32
17_SBR	100.0	-2.3,1	57.7	-2.3,1	77_PKN	89.8	-85.30,6	36.9	-185.36,-15
18_CNT	100.0	-25.14,2	49.4	-39.14,2	81_KBI	94.8	-73.28,6	38.2	-199.53,3
20_CBI	97.5	-34.27,6	66.7	-112.29,3	82_PNA	98.6	-100.22,2	25.8	-196.32,-12
21_RYG	100.0	-21.11,2	66.3	-79.11,1	83_PKT	96.9	-70.7,0	66.8	-72.10,-5
22_CTI	89.4	-150.29,5	44.5	-231.30,-8	84_SNI	81.3	-60.77,10	32.1	-168.77,1
23_TRT	98.9	-44.25,2	46.8	-170.25,-4	85_RNG	93.3	-81.24,3	24.8	-192.41,-17
24_CCO	98.0	-30.25,3	50.1	-91.25,0	86_CPN	94.0	-75.38,3	53.4	-137.39,-5
25_PRI	99.5	-62.24,3	36.3	-173.24,-14	90_SKA	88.8	-70.44,8	36.1	-121.50,1
26_NYK	99.6	-194.12,2	45.2	-202.12,-23	91_STN	98.6	-57.19,3	31.6	-103.19,-8
27_SKW	94.4	-16.28,8	29.6	-97.28,1	92_TRG	98.8	-50.25,3	49.8	-184.25,-5
31_BRM	90.2	-49.51,7	35.2	-54.51,6	93_PLG	99.0	-40.23,2	44.5	-180.33,-7
32_SRN	95.0	-35.45,6	37.4	-46.48,6	94_PTN	99.8	-64.9,1	52.8	-139.19,-2
33_SSK	90.5	-57.38,8	43.5	-80.38,4	96_NWT	90.8	-144.27,4	27.0	-209.29,-13
34_UBN	87.7	-37.82,8	53.2	-95.82,6	19_SRI	79.2	-75.27,2	44.8	-132.28,-4
35_YST	99.4	-25.28,3	48.1	-36.30,3	30_NMA	57.7	-75.119,20	21.1	-115.121,19
37_ACR	100.0	-25.19,3	63.1	-43.19,3	36_CPM	65.4	-129.61,11	18.7	-155.62,-9
38_BKN	99.6	-38.24,3	38.1	-54.33,2	42_LEI	58.9	-193.58,12	16.2	-194.59,-7
39_NBP	97.8	-39.22,3	45.6	-61.30,2	50_CMI	11.2	-299.111,16	2.8	-299.116,-19
40_KKN	79.8	-55.86,11	34.6	-73.86,9	51_LPN	75.9	-115.37,2	26.2	-138.41,-18
41_UDN	80.5	-53.65,10	40.3	-66.67,11	52_LPG	70.5	-154.59,7	15.8	-256.62,-14
43_NKI	97.8	-52.24,3	42.8	-105.24,2	53_UTT	54.0	-110.73,11	11.5	-235.73,-15
44_MKM	100.0	-8.19,3	52.8	-11.19,3	54_PRE	72.5	-141.59,8	16.6	-195.59,-13
45_RET	93.9	-34.43,7	43.9	-35.44,8	55_NAN	51.0	-201.53,4	8.4	-235.53,-24
46_KSN	91.3	-51.36,5	43.4	-56.36,3	56_PYO	75.6	-141.28,6	18.5	-188.29,-10
47_SNK	94.4	-61.33,6	48.2	-68.36,4	57_CRI	56.7	-162.90,11	19.7	-194.94,-2
48_NPM	95.8	-49.29,6	46.5	-73.31,5	58_MSN	21.8	-183.134,6	2.3	-208.142,-15
49_MDH	98.6	-40.20,5	36.7	-60.20,-1	63_TAK	15.7	-170.193,16	2.6	-268.195,-25
60_NSN	87.7	-37.66,8	33.4	-253.66,2	65_PLK	46.3	-203.82,13	14.4	-264.82,-13
61_UTI	96.9	-141.25,4	27.6	-222.25,-33	67_PNB	62.2	-224.59,6	19.5	-240.59,-13
62_KPT	84.4	-159.43,7	27.5	-260.43,-8	71_KRI	29.9	-179.115,33	6.2	-244.115,-13
64_STI	97.1	-166.28,4	35.5	-175.30,-5	80_NST	79.5	-107.48,10	40.7	-119.48,8
					95_YLA	54.4	-140.34,3	13.6	-205.34,-23

สำหรับพารามิเตอร์ ศูนย์กำเนิดแผนที่บนพิกัดกริด False Easting และ False Northing ที่จะเลือกใช้ เมื่อพิจารณาจาก ขอบเขตสุดตะวันตกจรดตะวันออก และขอบเขตสุดเหนือจรดใต้ พบว่าที่จังหวัดเชียงใหม่มีความยาวที่สุดเป็น 321 กิโลเมตร ดังนั้นในการศึกษาต่อไปอาจจะต้องแบ่งพื้นที่เป็นสองส่วน เช่น กรณีจังหวัดเชียงใหม่ อาจแบ่งพื้นที่เป็น “เชียงใหม่เหนือ” และ “เชียงใหม่ใต้” ดังนั้นในภาพรวมทั้งประเทศอาจอนุมานว่า ขอบเขตการฉายแผนที่ที่คลาดเคลื่อนค่า LDP สำหรับแต่ละจังหวัดในประเทศไทยจะคลุมพื้นที่น้อยกว่า 200 กิโลเมตร ดังค่าพิกัดกริดผลจากการฉายแผนที่ LDP ทั้ง 3 แบบ เรียกในที่นี้ว่า (E', N') อาจกำหนดค่า False Easting และ False Easting เป็น +200,000 เมตรทั้งสองแกน ทั้งนี้เพื่อชดเชยค่าพิกัดกริดที่คำนวณได้ในตอนแรกเป็น (E, N) ในทั้งสองแกนที่ค่าพิกัดเป็นลบและอาจไม่สะดวกต่อการใช้งานปฏิบัติ อีกประการหนึ่งค่าพิกัดกริด LDP ที่ปรากฏเป็นค่าพิกัดรูปแบบใหม่ในการใช้งานในแต่ละจังหวัดจะได้มีตัวเลขค่าพิกัดที่จะไม่ซ้ำหรือใกล้เคียงกับพิกัดจากยูทีเอ็ม จึงไม่สร้างความสับสนกับค่าพิกัดยูทีเอ็มที่ใช้อยู่แล้วในประเทศไทย ซึ่งระบบพิกัดยูทีเอ็มเองก็มีการกำหนดค่า False Easting และ False Northing เป็น +500,000 และ 0 เมตร

ดังนั้น ค่าพิกัดแผนที่การฉายความคลาดเคลื่อนค่าของจังหวัดในประเทศไทย (Provincial LDP) พิกัดกริดคำนวณได้จาก

$$E = E' + 200,000 \text{ m.} \quad (10)$$

$$N = N' + 200,000 \text{ m.} \quad (11)$$

5. ประโยชน์ที่จะได้จากการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนค่า LDP

ในกรณีที่มีการออกแบบแผนที่ความคลาดเคลื่อนค่าได้ผลดีกล่าวคือ $CSF < 20 \text{ ppm}$ หมายความว่าความกว้างวัดในกรอบพื้นที่ห่างจากแกนการฉายแผนที่ชนิดคงรูปไม่มากนัก และจุดปฏิบัติงานอยู่ในพื้นที่สูงหรือต่ำไปจากระนาบการฉายแผนที่ LDP ไม่มากนัก ผลจากการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนค่าแบบนี้ เราอาจมีค่าแกระยะทางที่เป็นสัดส่วนระยะทางกริดแผนที่ที่เทียบกับระยะทางราบพื้นผิวโลกจริง มีค่าสูงสุดที่ไม่เกิน 20 มิลลิเมตรต่อระยะทาง 1 กิโลเมตร หรือคิดเป็นรูปแบบอัตราส่วนจะได้ 1:50,000 โดยทั่วไปสำหรับงานงานก่อสร้างและงานสำรวจรังวัดถือว่าน้อยมากและอยู่ในเกณฑ์น้อยกว่าความสามารถในงานรังวัดแผนที่ภูมิประเทศและการรังวัดก่อสร้าง การรังวัดและการคิดคำนวณในพื้นที่กว้าง แม้ว่าปัจจุบันเราสามารถใช้การรังวัดดาวเทียม GNSS ในการรังวัดหมุดควบคุมได้อย่างแม่นยำ แต่เมื่อทำการรังวัดขยายหมุดควบคุมในโครงการก่อสร้าง เช่น งานวงรอบด้วยการรังวัดด้วยกล้องโทเทิลสเตชันที่ไปเชื่อมกับระบบพิกัดยูทีเอ็มจากการรังวัดดาวเทียม บ่อยครั้งที่ผู้ปฏิบัติหลงลืมค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม CSF อันเกิดจากการฉายแผนที่ยูทีเอ็มและพื้นที่ปฏิบัติงานบางครั้งอาจมีระดับห่างจากผิวทรงรีมาก ทำให้ผลการรังวัดเกิดค่าแข่งขันขนาดใหญ่และอาจมองค่าแข่งขันนี้เป็นค่าเศษเหลือของงานวงรอบว่าเป็นความคลาดเคลื่อนชนิดสุ่ม แล้วกระจายค่าเศษเหลือขนาดใหญ่ไปทั่วทั้งการคำนวณในวงรอบ

อีกกรณีหนึ่งในการปฏิบัติงานรังวัดก่อสร้าง เช่น การกำหนดตำแหน่งพิกัดที่จะก่อสร้าง ช่วงสำรวจจะต้องกำหนดค่าสเกลแฟกเตอร์ลงในอุปกรณ์รังวัดโดยเฉพาะโทเทิลสเตชันเป็นครั้งๆ การใช้งานอุปกรณ์โทเทิลสเตชันสำหรับแต่ละผู้ผลิตก็มีความแตกต่างกันมาก และการปฏิบัติงานในสนามอาจมีความไม่สะดวกและสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวยสำหรับการทำงานที่มีหลายๆ ขั้นตอน บางครั้งช่วงรังวัดตัดสินใจไม่ใช้เนื่องจากระยะทางที่จะรังวัดค่อนข้างสั้น จึงทำให้บ่อยครั้งสเกลแฟกเตอร์ถูกละเลยในการปฏิบัติงานในสนามไป

อีกบทบาทหนึ่งของการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ LDP ในโครงการที่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงและอาจมีการผลิตชิ้นงานสำเร็จจากโรงงาน (prefabrication) นอกพื้นที่ก่อสร้าง เช่น การก่อสร้างทางยกระดับ การก่อสร้างรถไฟความเร็วสูง การก่อสร้างอุโมงค์ สมมุติว่ามีการออกแบบชิ้นงานหรือโครงสร้าง ขนาดสัก 20 เมตร หากอ่านค่าพิกัดตัวเลขจากระบบ CAD ที่เขียนขึ้นบนพื้นฐานการฉายแผนที่ LDP ที่ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 20 ppm จะเกิดความคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 0.4 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถละเอียดสำหรับการคำนวณ และการรังวัดปฏิบัติงานในสนาม ในขณะที่ระบบการฉายแผนที่ยูทียูเอ็มความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นได้สูงสุดคือ 1,000 ppm หรือคิดเป็นขนาด 20 มิลลิเมตรสำหรับการชดเชยขนาดของชิ้นงานหรือโครงสร้างนี้ ความคลาดเคลื่อนระบบนี้จะมากกว่าค่าที่ยอมให้ได้ (tolerance) ในงานก่อสร้าง ผู้ปฏิบัติงานจะต้องคำนึงถึงอยู่เสมอทั้งในการคำนวณในสำนักงานและการปฏิบัติงานในพื้นที่ก่อสร้าง

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การนำการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ (LDP) จะทำให้ภาระงานที่ยู่ยากซับซ้อนในการคำนวณระหว่างการเขียนแบบ CAD การประมวล GIS ตลอดจนการทำแผนที่และการรังวัดหน้างานก่อสร้าง งานผลิตชิ้นงานผลิตนอกสถานที่ก่อสร้าง การปฏิบัติงานสำรวจจะมีความสะดวกเช่นการทำแผนที่ plane survey การวัดคำนวณต่างๆ อาจสามารถละเอียดสเกลแฟกเตอร์ไปได้ ยกเว้นเสียแต่ว่า ในพื้นที่ปฏิบัติงานที่ค่าระดับแตกต่างไปจากระบบการออกแบบการฉายแผนที่ h_{Topo} นั้นมาก ผู้ปฏิบัติสามารถคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์ HSF แล้วนำไปคิดรวมกับค่าสเกลแฟกเตอร์จากการฉายแผนที่โดยการอ่านเอาจากค่าสเกลแฟกเตอร์ k ของหมุดควบคุมที่อยู่ใกล้ๆ การคำนวณสเกลแฟกเตอร์รวม CSF ทำได้ง่ายไม่ซับซ้อน

6. บทสรุปและข้อคิดเห็น

การฉายแผนที่ชนิดความคลาดเคลื่อนต่ำ (Low Distortion Map Projection : LDP) เป็นการประยุกต์ใช้ฉายแผนที่ชนิดคงรูป (conformal map projection) ที่มีนักคณิตศาสตร์ที่ยิ่งใหญ่ในอดีตได้คิดประดิษฐ์ไว้ให้เลือกใช้หลากหลายรูปแบบ และในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การฉายทรานเวอร์สเมอเรเตอร์ (Transverse Mercator : TM), การฉายแลมเบิร์ตคอนฟอร์มอลโคนิก (Lambert Conformal Conic Projection : LCC) และการฉายเมอเรเตอร์แกนเอียง (Oblique Mercator : OMC) การฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำจะตั้งเป้าให้ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นร่วม (Combined Scale Factor) ในพื้นที่ที่กำหนด ในเขตพื้นที่ที่มีความสำคัญผนวกกับพื้นที่ที่ภูมิประเทศอำนวยให้ และอาจยอมให้ความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นร่วมมีขนาดน้อยมากถึง 20 ppm หรือคิดเป็นอัตราส่วน 1:50,000 การเลือกระบบการฉายแผนที่จะให้มีความละเอียดใกล้เคียงค่าระดับของพื้นที่ที่มีความสำคัญ พื้นที่ที่มีความสำคัญในที่นี้คือพื้นที่เมืองที่อาจมีกิจกรรมก่อสร้างเกิดขึ้นบ่อย

ผลการศึกษาการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำสำหรับประเทศไทยพบว่า โดยการกำหนดการฉายแผนที่แบบคงรูป (conformal projection) กลุ่มพื้นที่ทั้งจังหวัดที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนักและมีภูมิประเทศไม่สูงต่ำไปจากระบบแผนที่ ทำให้เราสามารถกำหนดรูปแบบ การฉายแผนที่ชนิดความคลาดเคลื่อนต่ำ (LDP) ที่มีความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นขนาดไม่เกิน 20 ppm โดยมีเกณฑ์การครอบคลุมพื้นที่เมือง มากกว่า 80% พบว่าเป็นไปได้สำหรับ 58 จังหวัดในประเทศไทย ส่วนอีก 19 จังหวัดที่เหลือผลจากการออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ LDP อย่างง่าย ยังคงมีความคลาดเคลื่อนเชิงเส้นเกิน 20 ppm และบางจังหวัดมีสเกลแฟกเตอร์ขนาดใหญ่สูงสุดที่ -229 ppm อันเนื่องมาจากขอบเขตจังหวัดขนาดใหญ่ ขอบเขตมีรูปร่างทิศทางไม่ปกติ ภูมิประเทศเป็นภูเขาส่วนมากและประชากรอาศัยกระจุกกระจาย เช่น จังหวัดเชียงใหม่ และ จังหวัดนครราชสีมา เป็นต้น

ในพื้นที่ 58 จังหวัดที่สามารถกำหนดการฉายแผนที่ LDP ได้โดยที่สเกลแฟกเตอร์ความคลาดเคลื่อนรวมมีขนาดน้อยกว่า 20 ppm และเกณฑ์พื้นที่ครอบคลุมสำหรับพื้นที่ “เมือง” มากกว่า 80% ในจังหวัดที่มีศักยภาพในการกำหนดการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ LPD การออกแบบเลือกการฉายแผนที่แบ่งเป็น ชนิดทรานเวอร์เมอร์เคเตอร์ TM 34 จังหวัด ชนิดแลมเบิร์ตคอนฟอร์มัลคอนิก LCC 22 จังหวัด และเมอร์เคเตอร์แบบแกนเอียง OMC 2 จังหวัด

จากการศึกษาศักยภาพการกำหนดการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ LDP รายจังหวัดในประเทศไทยถือได้ว่าเป็นไปได้มาก แต่ยังคงต้องการพัฒนาศึกษาในรายละเอียดและปรับปรุงต่อไป โดยเฉพาะในจังหวัดที่ยังไม่เข้าเกณฑ์อาจจะเกิดจากพื้นที่และรูปร่างของขอบเขตจังหวัดมีขนาดใหญ่ เช่น นครราชสีมา หรือบางจังหวัดก็อาจมีภูมิประเทศที่มีความสูงต่ำมาก ๆ เช่น เชียงใหม่ ดังนั้นการออกแบบขั้นตอนต่อไปจะต้องพิจารณารายจังหวัด และอาจจะต้องแบ่งพื้นที่จังหวัดออกเป็นส่วนๆ เช่น พื้นที่เหนือ พื้นที่ใต้ พื้นที่ตะวันออก พื้นที่ตะวันตก หรือโซนใดๆ และยังต้องพิจารณาขอบเขตให้คลุมอำเภอ ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องต่อการกำหนดมาตรฐานของประเทศ รวมทั้งการพิจารณาทบทวนการเลือกการฉายแผนที่ว่าควรปรับเปลี่ยนเป็นการฉายแบบ การฉายทรานเวอร์เมอร์เคเตอร์ (Transverse Mercator : TM), การฉายแลมเบิร์ตคอนฟอร์มัลคอนิก (Lambert Conformal Conic Projection : LCC) หรือการฉายเมอร์เคเตอร์แกนเอียง (Oblique Mercator : OMC) พร้อมกับการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆให้เหมาะสมต่อไป

ความสำเร็จของการออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ (Low Distortion Map Projection : LDP) สำหรับพื้นที่แต่ละจังหวัดจะช่วยทำให้การดำเนินการสำรวจออกแบบและก่อสร้างสะดวก เป็นมาตรฐาน การลดการคำนวณที่ยุงยากซับซ้อนต่างๆ จะทำให้ภาระในงานสำรวจออกแบบ การประเมินปริมาณเนื้องาน การเขียนแบบ CAD การประมวล GIS ตลอดจนการทำแผนที่ การปฏิบัติรังวัดหน้างานก่อสร้าง และงานผลิตชิ้นส่วนในการก่อสร้าง มีความสะดวกเช่นการทำแผนที่ plane survey ในการปฏิบัติงานสามารถลดค่าสเกลแฟกเตอร์ได้ ในอนาคตประเทศไทยอาจพิจารณากำหนดเป็นมาตรฐานให้วงการวิชาชีพรับทราบ และนำไปปฏิบัติ สำหรับโครงการสำรวจออกแบบที่มีขนาดใหญ่หรือเป็นโครงการชนิดแนวเส้นทาง (corridor project) ขอบเขตข้ามจังหวัด โครงการสามารถพิจารณาเลือกใช้ การฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำเฉพาะกิจได้เอง (ad-hoc LDP) ซึ่งจะต้องพิจารณาขอบเขตโครงการ ความสูงต่ำของภูมิประเทศ ในแต่ละโครงการเป็นรายๆ ไป

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] Damrongchai P. , Duangdee N. : Evaluation of TGM2017 for Height System Using GNSS/ Levelling Data in Thailand, *Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies.*, 2019, Volume 10 No.10 ISSN 2228-9860.
- [3] Dennis M.: Ground Truth: Low Distortion Map Projections for Engineering, Surveying, and GIS, Pipelines, ASCE, 2016.
- [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] Juliana P. Blackwell: *State Plane Coordinate System of 2 0 2 2 Policy Document*, National Geodetic Survey, National Ocean Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019.
- [6] Karney, C. F. F., Transverse Mercator with an accuracy of a few nanometers, *Journal of Geodesy*, 85(8), 475-485, 2011.

- [7] Airbus : *WorldDEM Technical Product Specification, Digital Surface Model, Digital Terrain Model, Version 2.5*, Airbus Defence and Space Intelligence, 2015.
- [8] Snyder, J.P., *Map Projection A Working Manual*, USGS Professional Paper 1395, US Government Printing Office, Washington, 1987
- [9] German Aerospace Center (DLR) : *TanDEM-X - Digital Elevation Model (DEM) - Global, 90m.*, 2018.
<https://doi.org/10.15489/ju28hc7pui09>
- [10] NASA JPL, *NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001 [Data set]*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2020-Apr-15 from https://doi.org/10.5067/MEaSURES/NASADEM/NASADEM_HGT.001

ภาคผนวก ก รหัสจังหวัด ขอบเขต ค่าระดับความสูงเหนือทรวงรี h_{pp} และค่าระดับออร์โทเมตริก H_{pp} เฉลี่ย

รหัสจังหวัด	จังหวัด	ตะวันออก-ตก (กิโลเมตร)	เหนือ-ใต้ (กิโลเมตร)	hpp (เมตร)	Hpp (เมตร)
10_BKK	กรุงเทพมหานคร	66	51	-26.84	3.36
11_SPK	จ.สมุทรปราการ	56	26	-27.65	1.98
12_NBI	จ.นนทบุรี	33	38	-27.92	3.15
13_PTE	จ.ปทุมธานี	66	39	-27.43	2.96
14_AYA	จ.พระนครศรีอยุธยา	64	62	-27.15	3.96
15_ATG	จ.อ่างทอง	35	40	-25.14	6.76
16_LRI	จ.ลพบุรี	106	122	39.52	70.44
17_SBR	จ.สิงห์บุรี	33	44	-21.24	11.00
18_CNT	จ.ชัยนาท	68	57	-5.75	27.57
20_CBI	จ.ชลบุรี	96	110	22.21	49.75
21_RYG	จ.ระยอง	91	64	5.25	31.35
22_CTI	จ.จันทบุรี	92	115	50.04	73.60
23_TRT	จ.ตราด	71	122	3.57	24.90
24_CCO	จ.ฉะเชิงเทรา	123	88	-4.34	22.71
25_PRI	จ.ปราจีนบุรี	104	97	-4.20	22.83
26_NYK	จ.นครนายก	63	61	-15.00	13.76
27_SKW	จ.สระแก้ว	115	106	53.31	77.85
31_BRM	จ.บุรีรัมย์	115	184	152.09	177.64
32_SRN	จ.สุรินทร์	108	127	132.03	156.04
33_SSK	จ.ศรีสะเกษ	108	135	124.76	146.43
34_UBN	จ.อุบลราชธานี	136	209	124.93	144.85
35_YST	จ.ยโสธร	88	117	125.62	150.21
37_ACR	จ.อำนาจเจริญ	68	82	131.37	154.32
38_BKN	จ.บึงกาฬ	100	75	137.01	166.67
39_NBP	จ.หนองบัวลำภู	74	100	202.11	232.52
40_KKN	จ.ขอนแก่น	153	161	164.72	194.23
41_UDN	จ.อุดรธานี	175	142	167.59	197.49
43_NKI	จ.หนองคาย	144	78	151.52	182.63
44_MKM	จ.มหาสารคาม	69	137	136.16	164.45
45_RET	จ.ร้อยเอ็ด	115	118	121.73	148.06
46_KSN	จ.กาฬสินธุ์	122	101	148.53	175.15
47_SNK	จ.สกลนคร	126	145	152.56	180.34
48_NPM	จ.นครพนม	87	136	132.34	158.78
49_MDH	จ.มุกดาหาร	97	78	160.66	184.68
60_NSN	จ.นครสวรรค์	187	126	21.46	54.99
61_UTI	จ.อุทัยธานี	120	95	58.89	93.80
62_KPT	จ.กำแพงเพชร	110	116	49.02	84.74
64_STI	จ.สุโขทัย	85	126	42.43	78.81
66_PCT	จ.พิจิตร	87	80	5.04	38.84
70_RBR	จ.ราชบุรี	97	89	28.94	61.52
72_SPB	จ.สุพรรณบุรี	108	112	-2.50	30.86
73_NPT	จ.นครปฐม	56	58	-27.63	4.21
74_SKN	จ.สมุทรสาคร	42	32	-28.66	2.24
75_SKM	จ.สมุทรสงคราม	24	30	-26.28	4.99
76_PBI	จ.เพชรบุรี	108	86	18.92	50.34
77_PKN	จ.ประจวบคีรีขันธ์	95	186	26.91	56.07
81_KBI	จ.กระบี่	89	117	17.45	39.90
82_PNA	จ.พังงา	55	178	5.02	30.74
83_PKT	จ.ภูเก็ต	20	48	8.76	33.89
84_SNI	จ.สุราษฎร์ธานี	146	158	17.22	41.46
85_RNG	จ.ระนอง	63	164	32.86	60.84
86_CPN	จ.ชุมพร	97	158	37.32	65.09
90_SKA	จ.สงขลา	116	182	21.61	35.79
91_STN	จ.สตูล	61	85	17.58	33.64
92_TRG	จ.ตรัง	80	99	17.87	36.70
93_PLG	จ.พัทลุง	76	89	11.51	28.69
94_PTN	จ.ปัตตานี	78	44	1.65	12.80
96_NWT	จ.นราธิวาส	79	99	34.93	43.13
19_SRI	จ.สระบุรี	94	91	56.27	86.15
30_NMA	จ.นครราชสีมา	197	186	207.68	235.40
36_CPM	จ.ชัยภูมิ	122	154	224.11	254.01
42_LEI	จ.เลย	140	162	327.45	358.69
50_CMI	จ.เชียงใหม่	162	321	551.31	589.52
51_LPN	จ.ลำพูน	69	142	366.19	404.27
52_LPG	จ.ลำปาง	132	244	277.72	315.27
53_UTT	จ.อุตรดิตถ์	138	137	121.84	156.38
54_PRE	จ.แพร่	119	127	181.53	217.62
55_NAN	จ.น่าน	108	179	357.30	391.78
56_PYO	จ.พะเยา	99	103	394.68	430.65
57_CRI	จ.เชียงราย	138	162	463.73	501.06
58_MSJ	จ.แม่ฮ่องสอน	138	241	556.46	596.03
63_TAK	จ.ตาก	185	297	307.20	344.53
65_PLK	จ.พิษณุโลก	134	157	105.24	138.87
67_PNB	จ.เพชรบูรณ์	124	205	166.30	197.59
71_KRI	จ.กาญจนบุรี	183	214	83.65	118.69
80_NST	จ.นครศรีธรรมราช	121	164	-0.09	19.94
95_YLA	จ.ยะลา	85	118	137.13	146.58

*** ในกรอบสี่เหลี่ยมคือจังหวัดที่มีพื้นที่ขอบเขตกว้างขวางมากหรือภูมิประเทศมีความสูงต่ำแตกต่างกันมาก จึงทำให้ยัง ไม่สามารถกำหนดรูปแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ (LDP) ได้

ภาคผนวก ข พารามิเตอร์การฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ LDP ที่ได้ศึกษาออกแบบ

รหัสจังหวัด	การฉาย	lat_0	lon_0	alpha	k0	รหัสจังหวัด	การฉาย	lat_0	lon_0	alpha	k0
10_BKK	LCC	13°46'	100°37'	-	"0.999995779"	37_ACR	TM	15°54'	104°44'	-	"1.000020656"
11_SPK	LCC	13°36'	100°43'	-	"0.999995652"	39_NBP	TM	17°11'	102°18'	-	"1.000031776"
13_PTE	LCC	14°04'	100°41'	-	"0.999995686"	40_KKN	TM	16°25'	102°35'	-	"1.000025899"
14_AYA	LCC	14°21'	100°32'	-	"0.999995731"	42_LEI	TM	17°25'	101°38'	-	"1.000051482"
18_CNT	LCC	15°08'	100°02'	-	"0.999999097"	44_MKM	TM	16°00'	103°10'	-	"1.000021409"
21_RYG	LCC	12°51'	101°26'	-	"1.000000826"	45_RET	TM	15°55'	103°49'	-	"1.000019139"
24_CCO	LCC	13°36'	101°26'	-	"0.999999318"	48_NPM	TM	17°23'	104°26'	-	"1.000020807"
25_PRI	LCC	14°03'	101°39'	-	"0.999999340"	50_CMI	TM	18°47'	98°44'	-	"1.000086668"
26_NYK	LCC	14°13'	101°10'	-	"0.999997641"	51_LPN	TM	18°07'	98°57'	-	"1.000057569"
27_SKW	LCC	13°47'	102°19'	-	"1.000008383"	52_LPG	TM	18°20'	99°31'	-	"1.000043660"
30_NMA	LCC	14°57'	102°07'	-	"1.000032656"	54_PRE	TM	18°12'	100°03'	-	"1.000028539"
38_BKN	LCC	18°09'	103°43'	-	"1.000021539"	55_NAN	TM	18°51'	100°50'	-	"1.000056169"
41_UDN	LCC	17°26'	102°52'	-	"1.000026349"	56_PYO	TM	19°14'	100°11'	-	"1.000062044"
43_NKI	LCC	17°56'	102°50'	-	"1.000023821"	57_CRI	TM	19°51'	99°52'	-	"1.000072894"
46_KSN	LCC	16°38'	103°37'	-	"1.000023354"	58_MSN	TM	18°49'	98°02'	-	"1.000087477"
49_MDH	LCC	16°34'	104°31'	-	"1.000025260"	62_KPT	TM	16°20'	99°32'	-	"1.000007707"
53_UJT	LCC	17°45'	100°31'	-	"1.000019155"	63_TAK	TM	16°43'	98°48'	-	"1.000048300"
60_NSN	LCC	15°41'	100°09'	-	"1.000003374"	64_STI	TM	17°16'	99°43'	-	"1.000006671"
61_UTI	LCC	15°21'	99°29'	-	"1.000009259"	65_PLK	TM	16°59'	100°33'	-	"1.000016547"
66_PCT	LCC	16°16'	100°21'	-	"1.000000792"	67_PNB	TM	16°17'	101°09'	-	"1.000026147"
70_RBR	LCC	13°32'	99°35'	-	"1.000004551"	71_KRI	TM	14°35'	99°03'	-	"1.000013154"
74_SKN	LCC	13°34'	100°13'	-	"0.999995493"	72_SPB	TM	14°37'	99°54'	-	"0.999999606"
76_PBI	LCC	12°57'	99°37'	-	"1.000002975"	73_NPT	TM	13°55'	100°06'	-	"0.999995655"
94_PTN	LCC	6°44'	101°21'	-	"1.000000259"	75_SKM	TM	13°24'	99°57'	-	"0.999995867"
16_LRI	OMC	15°07'	100°55'	50°00'	"1.000006214"	77_PKN	TM	11°57'	99°38'	-	"1.000004232"
19_SRI	OMC	14°38'	101°01'	45°00'	"1.000008849"	80_NST	TM	8°23'	99°47'	-	"0.999999987"
47_SNK	OMC	17°23'	103°49'	-50°00'	"1.000023985"	81_KBI	TM	8°10'	99°00'	-	"1.000002746"
12_NBI	TM	13°55'	100°24'	-	"0.999995609"	82_PNA	TM	8°33'	98°27'	-	"1.000000790"
15_ATG	TM	14°37'	100°21'	-	"0.999996046"	83_PKT	TM	7°59'	98°21'	-	"1.000001378"
17_SBR	TM	14°55'	100°21'	-	"0.999996660"	84_SNI	TM	9°02'	99°04'	-	"1.000002708"
20_CBI	TM	13°12'	101°12'	-	"1.000003493"	85_RNG	TM	9°58'	98°42'	-	"1.000005168"
22_CTI	TM	12°53'	102°08'	-	"1.000007870"	86_CPN	TM	10°21'	99°04'	-	"1.000005870"
23_TRT	TM	12°22'	102°32'	-	"1.000000562"	90_SKA	TM	6°56'	100°33'	-	"1.000003399"
31_BRN	TM	14°49'	102°57'	-	"1.000023915"	91_STN	TM	6°51'	99°58'	-	"1.000002765"
32_SRN	TM	14°53'	103°39'	-	"1.000020761"	92_TRG	TM	7°33'	99°36'	-	"1.000002811"
33_SSK	TM	14°51'	104°22'	-	"1.000019618"	93_PLG	TM	7°31'	100°04'	-	"1.000001810"
34_UBN	TM	15°11'	105°07'	-	"1.000019644"	95_YLA	TM	6°11'	101°14'	-	"1.000021570"
35_YST	TM	15°54'	104°20'	-	"1.000019751"	96_NWT	TM	6°11'	101°43'	-	"1.000005495"
36_CPM	TM	16°02'	101°49'	-	"1.000035237"						