



ผลการศึกษาการฉายแผนที่ WGS-TM ในโครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน

A STUDY ON WGS-TM MAP PROJECTION OF THE THAI-CHINESE HIGH-SPEED RAIL PROJECT

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

¹รองศาสตราจารย์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²วิศวกรสำรวจอาวุโส, บริษัท อิตาลีไทยดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด

³วิศวกรสำรวจอาวุโส, บริษัท เอเชียเอ็นจิเนียริงริ่งคอนซัลแตนท์ จำกัด

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

บทคัดย่อ

ในโครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน (กรุงเทพฯ – นครราชสีมา) ผู้ออกแบบได้เลือกกระบวนการฉายแผนที่ที่ทรานเวอร์สมอเคเตอร์ (WGS-TM) ที่เป็นการประยุกต์ใช้การฉายแผนที่ชนิดความคลาดเคลื่อนต่ำ LDP วิธีหนึ่ง แต่เอกสารโครงการฯ ยังขาดความสมบูรณ์ในการส่งมอบให้นำไปใช้ เนื่องจากฝ่ายก่อสร้างของไทยจำเป็นต้องมีการรังวัดขยายหมุดควบคุมเพื่อการก่อสร้างเพิ่มเติมเพื่อการออกแบบหน้างานและการคำนวณงานรังวัดก่อสร้างต่างๆ จึงจำเป็นต้องการทราบนิยามการฉายแผนที่ TM ที่ใช้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะสเกลแฟกเตอร์ ในงานศึกษานี้ได้พบว่า การระบุค่าระดับ Geodetic height of projection plane h_{pp} ในเอกสารโครงการฯ ละเอียดยังไม่พอเพียงและอาจไม่ถูกต้อง ดังนั้นในงานศึกษาจึงได้ทดลองการนิยามการฉายแผนที่ TM โดยการใช้ระดับ Geodetic height of projection plane h_{pp} ที่ระบุในโครงการฯ ไปบวกขยายพื้นหลักฐานรูปทรงรี WGS-84 ทั้งสองแกน เพื่อทดแทนนิยามการฉายแผนที่ TM แล้วนำไปใช้ โดยการตรวจสอบจากการแปลงการฉายค่าพิกัดจากบัญชีค่าพิกัด WGS-UTM ปรากฏในโครงการฯ ที่เป็นหมุดควบคุมจำนวน 81 หมุด ปรากฏความแตกต่างของค่าพิกัดเป็น ± 3 มิลลิเมตร ผลต่างค่าพิกัดนี้ถือว่าน้อยมากสามารถละเลยได้และถือว่าการคาดเดานิยาม TM ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่วิธีการขยายพื้นหลักฐานนี้ไม่เคยปรากฏที่ใดมาก่อน ดังนั้นงานศึกษาจึงได้พยายามย้อนรอยหาค่าสเกลแฟกเตอร์ k_0 โดยวิธีการวนซ้ำ ผลการลองผิดลองถูกทำให้ได้ค่าสเกลแฟกเตอร์ k_0 เป็น 1.00000000, 1.000030770 และ 1.000025247 สำหรับโครงข่าย “Construction Coordinate System” ทั้งสาม เมื่อตรวจสอบย้อนกลับโดยการนำค่าสเกลแฟกเตอร์เหล่านี้ไปใช้ แล้วนำผลลัพธ์การคำนวณแปลงพิกัดการฉายของหมุดควบคุมไปเทียบกับ บัญชีค่าพิกัด WGS-UTM ในโครงการอีกครั้ง ปรากฏได้ความต่างค่าพิกัดเป็น ± 6 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าน้อยมาก ไม่มีนัยสำคัญ นิยามการฉายแผนที่ TM ระบุสเกลแฟกเตอร์ k_0 ที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้สะดวกกับซอฟต์แวร์ GIS และ CAD ต่างๆ ดังนั้นในการประยุกต์ใช้และออกแบบแผนที่การฉายชนิดความคลาดเคลื่อนต่ำ LDP เช่นนี้ควรระบุนิยามแผนที่ให้ชัดเจนด้วยมาตรฐานสากลเช่นในรูปแบบ PROJ4, EPSG, WKT, OGC เป็นต้น ที่จะมีการระบุสเกลแฟกเตอร์อย่างชัดเจน

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

¹*Associate Professor, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

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

³Senior Survey Engineer, Asian Engineering Corporation Company Limited

คำสำคัญ: การฉายแผนที่ทรานส์เวอร์สเมอร์เคเตอร์; ทีเอ็ม; การฉายแผนที่ชนิดความคลาดเคลื่อนต่ำ; แอลดีพี

ABSTRACT

During the Thai-Chinese High-speed Rail Project designer had opted Transverse Mercator (TM) Map Projection with WGS84 datum (WGS-TM) for the project. The Transverse Mercator (TM) is known as one of popular choices for Low Distortion Map Projection (LDP) for construction. Unfortunately during project implementation in Thailand the concrete information namely scale factor k_0 for datum plane is missed. Since Thai engineer need exact TM definition for calculation of the control point network extension, for construction surveying. The study has discovered that the definition of the given TM map projection especially the geodetic height of projection plane h_{pp} is inadequate and not practicable. To remedy this we have tried to recover the TM definition by expanding size of the ellipsoid datum using Geodetic height of projection plane h_{pp} . After applying this TM definition to 81 control points in the project and comparing to given WGS-UTM coordinates results horizontal difference by ± 3 millimeter, which is negligibly small and quite satisfactory. Nevertheless the study has tried to recover the actual scale factor by trial-and-error method. The latter try has revealed three new TM scale factors k_0 namely 1.00000000, 1.000030770 and 1.000025247 for each of "Construction Coordinate System" within the project. Using these scale factors for TM definitions and reprojecting the 81 control points then comparing with given WGS-UTM coordinates now results horizontal differences of ± 6 millimeter which is again considered to be small and negligible. The reversed computed scale factors has fulfilled the WGS-TM map projection definitions in project and engineer can now use them conveniently with familiar GIS and CAD software. We summarize that any LDP application for construction, the map projection should be defined with some de facto standard e.g. PROJ4, EPSG, WKT or OGC, which it always includes the defined scale factor k_0 .

KEYWORD: Transverse Mercator Projection; TM; Low Distortion Projection (LDP)

1. บทนำ

ในโครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีน (กรุงเทพฯ – นครราชสีมา) ผู้ออกแบบได้เลือกระบบการฉายแผนที่ทรานส์เวอร์สเมอร์เคเตอร์ (WGS-TM) และระบบการฉายแผนที่ยูทีเอ็ม (WGS-UTM) ในการออกแบบและใช้ในการดำเนินการก่อสร้าง โดยโครงการฯ ได้กำหนดค่าพิกัดของหมุดควบคุมตลอดในแนวเส้นทางจาก กรุงเทพฯ ถึง นครราชสีมา ในทั้งสองรูปแบบเพื่อความสะดวกในการนำไปใช้งาน ส่งมอบให้ฝ่ายไทยเพื่อการดำเนินการโครงการ ดังปรากฏในตัวอย่างตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1 พิกัดหมุดควบคุม ในรูปแบบของ WGS-TM และ WGS-UTM

WGS-TM (The First Construction Coordinate System)					WGS-UTM (Drawing)				
Central meridian longitude(CML): 100°42', Geodetic height of projection plane 0m, Elevation abnormality: 0m, The Thai Sea Level (MSL) System.					Central meridian longitude(CML): 99°00', Geodetic height of projection plane 0m, Elevation abnormality: 0m, The Thai Sea Level (MSL) System.				
Point No.	Northing X(m)	Easting Y(m)	Height H(m)	Remarks	Point No.	Northing X(m)	Easting Y(m)	Height H(m)	Remarks
Control Point-First Class (CPI)					Control Point-First Class (CPI)				
CPI-30	1613361.0707	532854.7471	22.3986		CPI30	1613645.7570	715988.6272	22.3986	
CPI-31	1614926.7308	537343.4499	32.6048		CPI31	1615245.2257	720466.2720	32.6048	
CPI-32	1616846.8141	541291.8581	88.8367	CPI-32=GPS10-1	CPI32	1617195.1961	724400.9511	88.8367	CPI-32=GPS10-1
CPI-33	1619953.5680	542774.2611			CPI33	1620313.6189	725860.3131		
CPI-34	1619666.8268	543203.1609	147.0693	CPI-34=GPS11-2	CPI34	1620030.0457	726291.4432	147.0693	CPI-34=GPS11-2
CPI-35	1621296.5149	546128.3113	201.5654		CPI35	1621682.0107	729204.9060	201.5654	
CPI-36	1622002.7495	546847.5505			CPI36	1622393.7901	729918.9788		
CPI-36A	1622228.3825	549388.2804			CPI36A	1622638.5707	732458.5312		
CPI-37	1621825.1403	551270.3723			CPI37	1622249.3916	734344.0579		
CPI-38	1620476.4358	553752.4688	219.3996	CPI-38=GPS14-1	CPI38	1620919.0354	736836.8453	219.3996	CPI-38=GPS14-1
CPI-38A	1619884.0685	556789.9598			CPI38A	1620349.3392	739879.5042		
CPI-39	1620109.7450	559549.2582			CPI39	1620595.7927	742637.7976		
CPI-40	1620743.0750	564674.4349			CPI40	1621267.7905	747759.5894		
CPI-41	1621685.0672	568553.7176	376.2575		CPI41	1622239.2090	751632.9102	376.2575	
CPI-42	1622913.7303	572151.3360	359.2609	CPI-42=GPS18-2	CPI42	1623495.3035	755222.3853	359.2609	CPI-42=GPS18-2
GPS037	1527673.5663	479763.7061			GPS037	1527570.1201	663520.5141		

การนำระบบการฉายแผนที่ทรานเวอร์สเมอเรเตอร์ Transverse Mercator Projection (WGS-TM) มาใช้ในโครงการฯ เป็นไปตามแนวคิดของ การประยุกต์ใช้การฉายแผนที่ชนิดความคลาดเคลื่อนต่ำ (Low Distortion Projection : LDP) สำหรับความสะดวกในการนำไปใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งนิยมใช้ในสหรัฐอเมริกา รู้จักกันในนามของ State Plane Coordinate System (SPCS) หรือในยุโรปจะรู้จักกันในชื่อของ Gauss Krüger Projection (GK) การฉายแผนที่ชนิดความคลาดเคลื่อนต่ำ (LDP) อาศัยการฉายแผนที่ทรานเวอร์สเมอเรเตอร์ (Transverse Mercator : TM) หรือบางครั้งอาจเลือกใช้การฉายแผนที่แลมเบิร์ตคอนฟอร์มอลโคนิก (Lambert Conformal Conical Projection : LCC) หรือแม้กระทั่งการฉายแบบเมอร์เคเตอร์แกนเอียง (Oblique Mercator : OMC)

2. หลักการฉายแผนที่ทรานเวอร์สเมอเรเตอร์

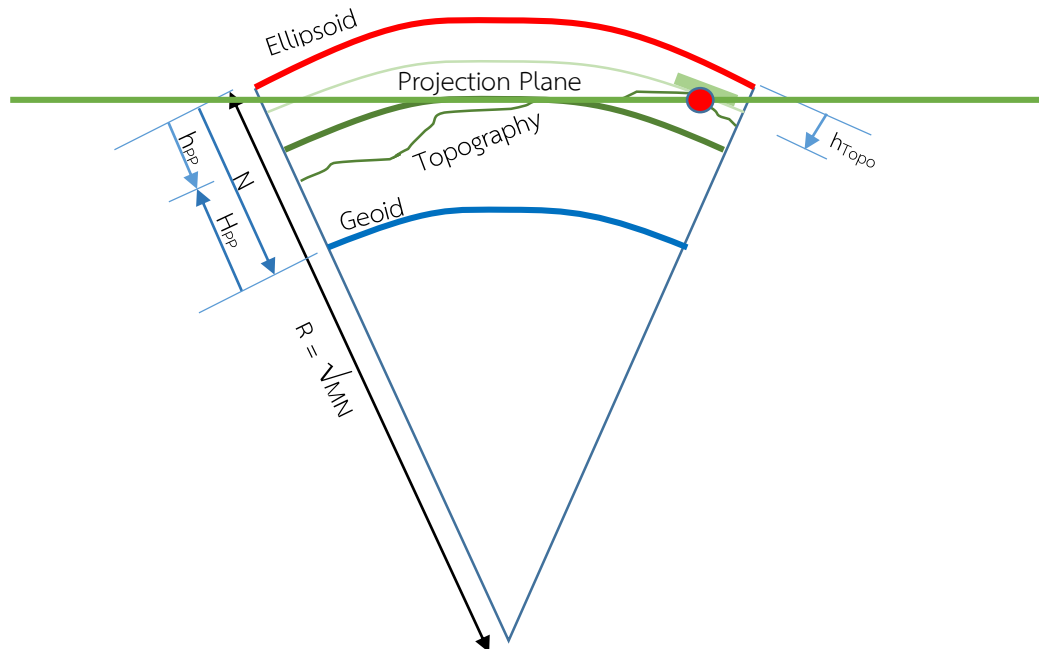
ในกรณีการฉายแผนที่ TM ผู้ออกแบบจะเลือกระนาบการฉายแผนที่ให้แนบชิดกับภูมิประเทศเฉลี่ยในพื้นที่ใช้งานให้มากที่สุด ตัวอย่างเช่น ในพื้นที่ก่อสร้างที่สนใจมีค่าระดับเฉลี่ยของภูมิประเทศเป็น h_{PP} ค่าระดับในที่นี้เป็นค่าระดับเหนือทรวงรี (ellipsoidal height : h) ระนาบแผนที่ที่จะแนบไปกับภูมิประเทศโดยเฉลี่ยนี้กำหนดโดยคำนวณสเกลแฟกเตอร์การฉายเป็น k_0 หากกรณีนี้ที่พื้นหลักฐานแผนที่เป็นรูปทรง WGS-84 ค่า k_0 คำนวณได้จากความสัมพันธ์ [2]

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

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

$$R = \sqrt{MN} \quad (2)$$

การออกแบบแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำด้วยการฉายแผนที่ TM แสดงให้เห็นดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 1 การกำหนดระนาบการฉายแผนที่ TM

ในการฉายแผนที่ TM จะต้องมีการกำหนดจุดศูนย์กลางกำหนดแผนที่ ณ ตำแหน่งใด ๆ พิกัดขั้วออกเดกีสเป็น (φ_0, λ_0) แล้วกำหนดให้มีเส้นเมริเดียนกลาง (central meridian) ผ่านในแนวเหนือใต้ ณ ตำแหน่งจุดเป็น λ_0 ค่าสเกลแฟกเตอร์อันเกิดจากนิยามการฉายแผนที่ที่ขนาดเปลี่ยนแปลง ค่าสเกลแฟกเตอร์ที่เอ็ม ณ จุดปฏิบัติงานนี้เรียกว่าค่า k ค่าสเกลแฟกเตอร์จะแปรเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์ของฟังก์ชันการฉาย $TM()$ ดังความสัมพันธ์อย่างย่อ

$$k = k_0 \cdot TM(\varphi_0, \lambda - \lambda_0) \quad (3)$$

แต่ในพื้นที่ปฏิบัติงาน เช่น การรังวัดด้วยกล้องโทเทิลสเตชัน พื้นที่อาจมีค่าระดับแตกต่างไปจากระนาบการฉายที่เลือกไว้ในตอนต้น สมมติให้มีค่าระดับเหนือรูปทรงรีเป็น h_{Topo} ค่าระยะทางเช่นระยะทางการรังวัดด้วยกล้องโทเทิลสเตชัน ก็จะต้องลดทอนลงบนระนาบของการฉาย TM นี้ สเกลแฟกเตอร์ที่เกิดจากผลต่างค่าระดับของพื้นที่ปฏิบัติงานกับค่าระดับของระนาบการฉาย จะใช้ในการลดทอนระยะทางการรังวัดบนพื้นผิวโลกในส่วนนี้เรียกว่า height scale factor (HSF)

$$HSF = \frac{R}{R + h_{Topo}} \quad (4)$$

ดังนั้นหากนำสเกลแฟกเตอร์ทั้งสองมารวมกันจะเรียกว่า ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม หรือ Combined Scale Factor CSF

$$CSF = k \cdot HSF \quad (5)$$

เมื่อทำการรังวัดระยะทางในพื้นที่โครงการ ได้ระยะทางราบเป็น True Distance (TD) เราจะทอนลงบนระนาบ
ทรานสเวอร์สเมอร์เคเตอร์ TM เรียกในที่นี้ว่า ระยะทางบนแผนที่หรือระยะทางกริด Grid Distance (GD)

$$GD = CSF \cdot TD \quad (6)$$

สเกลแฟกเตอร์ k หากเป็นปริมาณน้อยๆ มักแสดงแทนด้วยความผิดเพี้ยนเชิงเส้นที่เรียกว่า part per million หรือย่อเป็น ppm โดยทั่วไปสำหรับแผนที่การฉายแบบทรานสเวอร์สเมอร์เคเตอร์ (TM) บนพื้นหลักฐาน WGS-84 อัตราการเปลี่ยนแปลง
สเกลแฟกเตอร์รวม k ที่เกิดขึ้นจากการฉายแผนที่ในระยะห่างตั้งฉากห่างออกมาจากเส้นเมริเดียนกลาง 40 กิโลเมตร จะเป็น 20 ppm สำหรับอัตราการเปลี่ยนแปลงสเกลแฟกเตอร์อื่นเนื่องจากความสูงภูมิประเทศเหนือหรือใต้ระนาบการฉายที่เรียกว่า HSF จะเป็น 20 ppm สำหรับความสูงต่าง 125 เมตร [2] ดังนั้นการออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ LDP สำหรับงานก่อสร้าง อาจตั้งเป้าหมายให้สเกลแฟกเตอร์รวม CSF ไว้ที่ 20 ppm ไปจนถึง 100 ppm ตัวอย่างเช่น การออกแบบฉาย LDP ตามนโยบาย SPSC2020 [3,4] ในกรณีที่มีการออกแบบได้ผลดี $CSF < 20 \text{ ppm}$ หมายความว่ากรังวัดในกรอบพื้นที่ห่างจากเส้น
เมริเดียนกลางที่เลือกกำหนดให้ไม่มากนัก และหรืออยู่ในพื้นที่สูงหรือต่ำไปจากระนาบการฉาย TM ที่เลือกไว้เราอาจมีค่าแก้
ระยะทางสูงสุดที่จะคำนึงถึงไม่เกิน 20 มิลลิเมตรต่อระยะทาง 1 กิโลเมตร โดยทั่วไปสำหรับงานก่อสร้างและงานสำรวจรังวัดถือว่า
น้อยมากและอาจจะเลยได้เป็นส่วนมาก สำหรับการวัดมุมที่ได้จากผลต่างของทิศทางนั้นเนื่องจากการฉายแผนที่ชนิด TM หรือ
LCC เป็นการฉายชนิดคงรูป (conformal) ดังนั้นผลการรังวัดมุมก็สามารถนำมาใช้ได้โดยตรงไม่มีการปรับแก้ใดๆ และเมื่อพื้นที่
ปฏิบัติงานอยู่ห่างจากเส้นเมริเดียนกลางมากหรืออยู่เหนือหรือใต้ระนาบการฉายมาก การลดทอนระยะทางก็สามารถทำได้ด้วย
ความสัมพันธ์ ค่าสเกลแฟกเตอร์รวม CSF ที่กล่าวมาแล้ว

หากเทียบกับการฉายแผนที่ยูทีเอ็มที่เลือกค่าสเกลแฟกเตอร์ที่เมริเดียนกลางเป็น $k_0 = 0.9996$ หรือคิดเป็น 400 ppm
สำหรับในพื้นที่ประเทศไทยค่าสเกลแฟกเตอร์จะแปรเปลี่ยนในจุดทำงานที่ห่างจากเมริเดียนกลางมากที่สุด นั่นคือสำหรับ
ยูทีเอ็มโซน 47 และโซน 48 จะปรากฏที่แนวขอบสุดของแถบยูทีเอ็มทั้งสองคือในบริเวณลองจิจูด 102° และค่าสเกลแฟกเตอร์นี้จะ
มีค่ามากขึ้น จนถึงตำแหน่งเส้นศูนย์สูตรจะมีค่าเป็น 1000 ppm ดังนั้นค่าสเกลแฟกเตอร์สำหรับประเทศไทยที่มีค่าสูงปรากฏในพื้นที่
ภาคตะวันออกของจังหวัดนครราชสีมาและมีความผิดเพี้ยนเชิงเส้นสูงสุดเป็น 965 ppm หรือ 0.965 เมตรต่อระยะทาง 1 กิโลเมตร
ดังนั้นการปรับแก้ระยะทางด้วยสเกลแฟกเตอร์ในการประยุกต์ใช้ระบบพิกัดยูทีเอ็มจึงมีความสำคัญและมีนัยสำคัญที่จะละเลยไม่ได้
ทั้งในขั้นตอนการเขียนแบบและการลงมือรังวัดเพื่อการก่อสร้าง

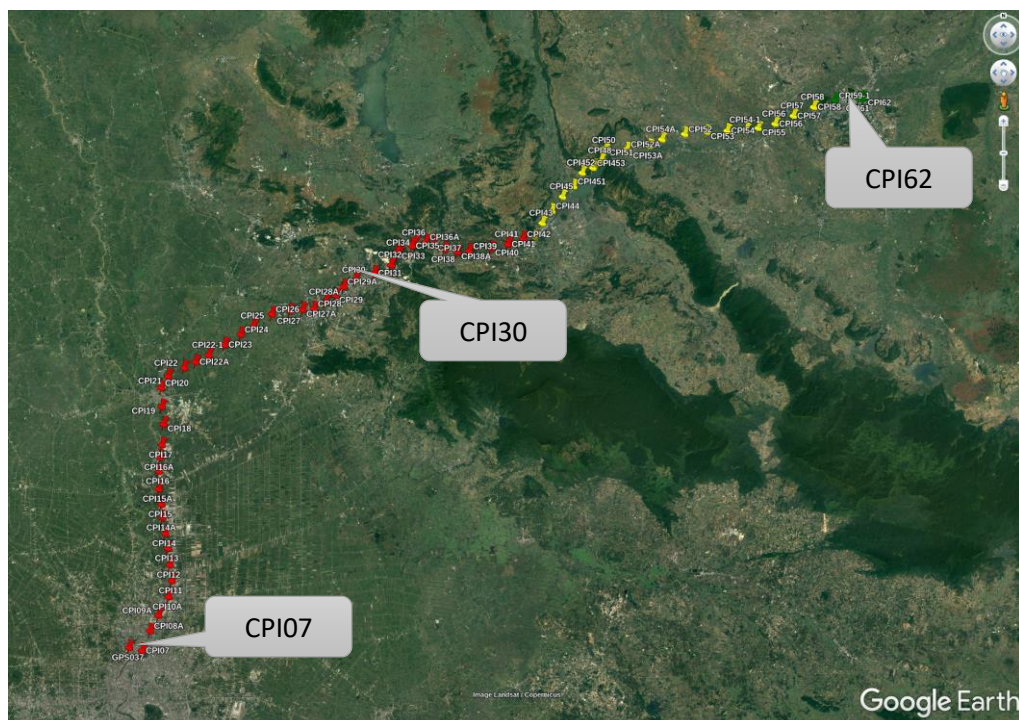
3. การฉายแผนที่แบบทรานสเวอร์สเมอร์เคเตอร์ WGS-TM ในโครงการฯ

ในโครงการรถไฟความเร็วสูงไทย-จีนการฉายแผนที่ทรานสเวอร์สเมอร์เคเตอร์ (WGS-TM) ได้แบ่งพื้นที่แยกออกเป็นระบบพิกัด
ตามรูปแบบการฉายแผนที่ออกเป็น 4 พื้นที่ เรียกว่า “Coordinate Construction System” ทั้งนี้เพื่อให้ความผิดเพี้ยนเชิงเส้นที่เกิดจาก
การฉาย TM และความสูงต่างของภูมิประเทศรวมเป็นสเกลแฟกเตอร์ว่า CSF เกิดขึ้นน้อยที่สุดตามที่กล่าวมาแล้ว และเพื่อความ
สะดวกในการวิเคราะห์ผลในงานวิจัยได้กำหนดชื่อเรียกโซนในตารางคอลัมน์ขวาสุด ดังนี้โครงการฯ จึงแบ่งพื้นที่ มีพารามิเตอร์
ของการฉาย TM จำนวนหกชุดควบคุมที่จะใช้วิเคราะห์ตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2 โชนการฉายแผนที่ทรานเวอร์สเมอเรเตอร์ (WGS-TM) ในโครงการฯ

พื้นที่หรือโซน	เส้นเมริเดียน กลาง	Geodetic height of projection plane h_{PP} หรือ H_{PP}	จำนวนหมุด ควบคุม	ชื่อโซนในงานวิจัย
First Construction Coordinate Sys.	100°42'	0 m	47	TM10042@000m
Second Construction Coord Sys.	? ไม่ปรากฏ	? ไม่ปรากฏ	?	?
Third Construction Coordinate Sys.	101°48'	195 m	26	TM10148@195m
Fourth Construction Coordinate Sys.	102°15'	160 m	8	TM10215@160m

ในตารางนี้ปรากฏความไม่ชัดเจนค่า Geodetic height of projection plane ที่ควรเป็นความสูงเหนือซีออยด์ แต่ค่าระดับที่ให้น่าจะเป็น ระดับทะเลปานกลาง หรือความสูงออร์โทเมตริก (H)



รูปที่ 2 ตำแหน่งหมุดควบคุมในโครงการ และหมุดเริ่มต้น หมุดกลาง และหมุดสุดท้าย

จากหลักการสร้างแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำ (LDP) ดังที่กล่าวมาแล้ว หากนำค่า Geodetic height of projection plane (h) ตามที่ปรากฏในเอกสารโครงการ k_0 เพื่อยกระดับหรือลดระดับของภูมิประเทศ แต่ระดับของการฉายแผนที่ดังกล่าวสอดคล้องค่าระดับ รทก. หรือ orthometric height (H) ในขั้นต้นจึงได้ลองนำค่าชื่อยอด (Geoid Undulation: N) ไปแก้ด้วยความสัมพันธ์

$$h = N + H \quad (7)$$

แบบจำลองชื่อยอดในประเทศไทยเลือกใช้แบบจำลอง EGM-2008 และ Thailand Geoid Model 2017 (TGM-2017) โดยที่แบบจำลองทั้งสองมีความละเอียดถูกต้องในระดับ “เมตร” และ “5-เซนติเมตร” ตามลำดับ (Damrongchai and Duangdee, 2019) ซึ่งสามารถนำไปคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์ k_0 จะให้ผลไม่ต่างกันมากนัก แต่อย่างไรก็ตามในโครงการฯ ไม่ได้ระบุว่า พื้นที่โครงการฯ ได้เลือกใช้ คาร์ทีเซียนโลก R ซึ่งเป็นฟังก์ชันของละติจูดที่ตำบลใด ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกเอาฟังก์ชันของมุมเริ่มต้น มุมกลาง และมุมสุดท้ายในแนวเส้นทางในโครงการฯ เป็นค่าของการคำนวณค่าคาร์ทีเซียนโลก R จากนั้นใช้ซอฟต์แวร์ไลบรารี proj4 เรียกใช้ผ่านโมดูล pyproj เขียนด้วยภาษาไพธอน ซอฟต์แวร์ไลบรารี proj4 กำหนดนิยามของการฉายแผนที่ทราเนเวอร์สเมอเรเตอร์ในรูปแบบสตริง 1 บรรทัด สัญลักษณ์ {} คือพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้จะกำหนดได้

`+proj=tmerc +lat_0=0.0 +lon_0={} +k_0={} +x_0=500000. +y_0=0 +a={} +b={} +units=m +no_defs`

จะเห็นได้ว่า a และ b จะใช้คาร์ทีเซียนกึ่งแกนหลักและรัศมีกึ่งแกนรองของ WGS-84 ค่าเมอร์เคียนกลาง lon_0 เป็นไปตามที่ผู้ออกแบบกำหนดตามโซน ส่วน k_0 จะต้องคำนวณตามหลักการที่กำหนดกระบวนการฉายให้ย้ายไปทาบพื้นผิวภูมิประเทศในพื้นที่ที่ต้องการ

จากนั้นผู้ใช้จะใช้ฟังก์ชัน transform จาก pyproj ในการแปลงพิกัดจากระบบการฉายแผนที่ที่นิยามไว้ และตามเอกสารโครงการฯ มีความไม่ชัดเจนจึงทำให้รูปแบบนิยามการฉายแผนที่คำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์ k_0 ได้ต่างกัน ไปสู่ระบบการฉายแผนที่ที่มีอยู่แล้ว เช่น WGS-UTM หรือ Geodetic WGS-1984 เมื่อได้คำนวณพิกัด TM ได้นำไปเปรียบเทียบกับค่าพิกัด WGS-TM ของแต่ละโซน ผลต่างทางแกน E, N คำนวณในรูปแบบ Root mean square Error (RMSE) สรุปผลดังตาราง

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัด TM จำนวนด้วย proj4 กับ WGS-TM

รูปแบบการคำนวณ	k_0	เปรียบเทียบจำนวน proj4 กับ WGS-TM
1.คำนวณ $h = N + H$ จากนั้นคำนวณค่ารัศมีโลก R แล้วคำนวณ k_0	0.99999575 1.00002642 1.00002091	TM10042@000m RMSE: 6.7538 m. TM10148@195m RMSE: 7.1377 m. TM10215@160m RMSE: 7.1675 m.
2. ไม่คิด Undulation N คำนวณค่ารัศมีโลก R จากหมุม CPI07	1.00000000 1.00003066 1.00002516	TM10042@000m RMSE: 0.0001 m. TM10148@195m RMSE: 0.1735 m. TM10215@160m RMSE: 0.1435 m.
3. ไม่คิด Undulation N คำนวณค่ารัศมีโลก R จากหมุม CPI30	1.00000000 1.00003066 1.00002516	TM10042@000m RMSE: 0.0001 m. TM10148@195m RMSE: 0.1757 m. TM10215@160m RMSE: 0.1453 m.
4. ไม่คิด Undulation N คำนวณค่ารัศมีโลก R จากหมุม CPI62	1.00000000 1.00003066 1.00002516	TM10042@000m RMSE: 0.0001 m. TM10148@195m RMSE: 0.1768 m. TM10215@160m RMSE: 0.1462 m.

จากตารางผลการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า การประยุกต์ใช้ค่าแก้ไขออกซ์ทำให้ได้ผลต่างภาพรวมมากถึง 6.7 ถึง 7.1 เมตร ดังข้อสงสัยก่อนหน้านี้ ดังนั้นการวิเคราะห์จึงได้ลองสมมุติว่าค่าระดับระนาบการฉายนำมาใช้ในการคำนวณค่า k_0 โดยตรงปรากฏได้ผลดีขึ้นมาก และได้มีการเปลี่ยนค่ารัศมีโลกคิดจากหมุมหัวโครงการฯ หมุมกลางโครงการฯ และหมุมสุดท้ายโครงการฯ ได้ผลดีและดูเหมือนจะถูกต้องสำหรับโซนแรกในเส้นทาง TM10042@000m ผลต่างน้อยกว่ามิลลิเมตร แต่เมื่อพิจารณาโซน TM10148@195m และโซน TM10215@160m ค่าพิกัดต่างกัน 0.17 และ 0.14 เมตร และสังเกตได้ว่าตำแหน่งที่คำนวณรัศมีโลกมีผลทำให้พิกัดต่าง 1 ถึง 3 เซนติเมตร แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้ยังไม่น่าพอใจ

4. การฉายแผนที่แบบทรานสเวอร์เมอร์เคเตอร์ด้วยสเกลพื้นหลักฐาน WGS-84

เนื่องจากมีความไม่ชัดเจนในการกระจัดระนาบของการฉายแผนที่ TM โดยการคำนวณค่าสเกลแฟกเตอร์ k_0 อีกวิธีหนึ่งที่ได้คือการขยายหรือสเกลพื้นหลักฐาน WGS-84 ด้วยค่าระดับ Geodetic height of projection plane (h) ทำให้ได้ค่า a และ b ค่ารัศมีกึ่งแกนหลักและรัศมีกึ่งแกนรองของ WGS-84 เป็นค่าใหม่เรียกชื่อ a' และ b' ดังนี้

$$a' = a + h \quad (8)$$

$$b' = b + h \quad (9)$$

พร้อมกับกำหนดสเกลแฟกเตอร์ให้ $k_0 = 1.00000000$ วิธีนี้จะตัดข้อสงสัยเกี่ยวกับการคำนวณรัศมีโลกออกไปได้ เมื่อทำการสร้าง proj4 สตริงส์ เพื่อนิยามการฉาย TM โดยการขยายพื้นหลักฐานออกไปแต่ละพื้นที่เฉลี่ยภูมิประเทศ ทำการแปลงค่าพิกัด WGS-UTM ดังนั้นนิยามของ Proj4 สตริงส์ที่ใช้กำหนดให้ซอฟต์แวร์ proj4 ทำการคำนวณการฉายแผนที่ดังสตริงส์ต่อไปนี้


```

..... TM10042@000 .....
Proj('+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=100.7 +k=1 +x_0=500000 +y_0=0 +a=6378137 +b=6356752.3142 +units=m +no_defs',
preserve_units=True)
..... TM10148@195 .....
Proj('+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=101.8 +k=1 +x_0=500000 +y_0=0 +a=6378332 +b=6356947.3142 +units=m +no_defs',
preserve_units=True)
..... TM10215@160 .....
Proj('+proj=tmerc +lat_0=0 +lon_0=102.25 +k=1 +x_0=500000 +y_0=0 +a=6378297 +b=6356912.3142 +units=m +no_defs',
preserve_units=True)

```

เมื่อทำการแปลงค่าพิกัด TM ด้วยวิธีการขยายพื้นหลักฐานคำนวณด้วยไลบรารี proj4 นำผลพิกัดที่ได้ไปเปรียบเทียบกับพิกัด WGS-TM จากโครงการฯ ได้ผลต่างอยู่ในเกณฑ์ไม่เกิน 3 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าไม่มีนัยสำคัญและสมมุติฐานน่าจะถูกต้อง ผลเปรียบเทียบพิกัดคำนวณ proj4 กับ WGS-TM ปรากฏให้เห็นสรุปในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัด TM คำนวณด้วย proj4 กับ WGS-TM จากวิธีการขยายพื้นหลักฐาน

โซน	เปรียบเทียบพิกัดคำนวณ proj4 กับ WGS-TM
TM10042@000m	RMSE: 0.0001 m.
TM10148@195m	RMSE: 0.0032 m.
TM10215@160m	RMSE: 0.0027 m.

แต่อย่างไรก็ตามการนิยามการฉายแผนที่ที่ฐานสเวอ์เมอร์เคเตอร์ด้วยการขยายพื้นหลักฐานไม่มีปรากฏในที่อื่นใดหรือไม่เป็นที่นิยม รวมทั้งระบบแผนที่ SPCS ของสหรัฐอเมริกาที่มีการออกแบบแผนที่ LDP นักร้อยแบบ ดังนั้นงานวิจัยจึงมุ่งหาพารามิเตอร์ที่ยังขาดจริงอยู่ 1 ค่า นั่นคือค่าสเกลแฟกเตอร์ k_0 สำหรับแต่ละโซนว่า ผู้ออกแบบน่าจะได้ออกแบบอย่างไร

5. การหาค่าสเกลแฟกเตอร์ด้วยวิธีการวนซ้ำ

การหาค่าพารามิเตอร์ที่ยังขาดจริงอยู่ 1 ค่าคือค่าสเกลแฟกเตอร์ k_0 สามารถทำได้ง่ายวิธีหนึ่งคือการ เขียน โปรแกรมให้ สเกลแฟกเตอร์ k_0 แปรเปลี่ยนทีละน้อย เพื่อเป็นการประหยัดเวลาควรประมาณค่า k_0 ให้ใกล้เคียงค่าที่ควรจะเป็นเสียก่อน และเมื่อได้สเกลแฟกเตอร์แล้วได้นำค่าสเกลแฟกเตอร์คำนวณย้อนกลับไปหาค่าระดับเหนือทรงรีของระนาบการฉายแผนที่ h_{pp} วิธีนี้อาจเรียกว่า เป็นการลองผิดลองถูก (trial and error) ผลจากการหาค่าสเกลแฟกเตอร์สำหรับทั้ง 3 โซน ปรากฏผลในตาราง

ตารางที่ 5 ผลการขยายสเกลเฟกเตอร์ และการเปรียบเทียบค่าพิกัด จำนวนด้วย proj4 กับ WGS-TM

โซน	สเกลเฟกเตอร์ k_0	เปรียบเทียบจำนวน proj4 กับ WGS-TM (m)	h_{PP}^* (m)	Geodetic height of projection plane h_{PP} หรือ H_{PP} (m)
TM10042@000m	1.00000000	RMSE: 0.0001	0.0	0
TM10148@195m	1.00003077	RMSE: 0.0063	195.68	195
TM10215@160m	1.00002525	RMSE: 0.0043	160.56	160

ผลการหาค่าสเกลเฟกเตอร์ k_0 ด้วยการวนซ้ำแล้ว นำ k_0 ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับไลบรารี proj4 เพื่อการนิยามการฉายภาพบนสเฟียร์เมอร์เคเตอร์ ให้ผลลัพธ์ที่ถือว่าเทียบเท่ากับพิกัด WGS-TM ที่โครงการฯ ได้คำนวณมาให้และกำหนดให้ใช้ เมื่อเปรียบเทียบจำนวน proj4 กับ WGS-TM มีผลต่างเล็กน้อยในเกณฑ์ 4 ถึง 6 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าไม่มีนัยสำคัญ

ในหลักการเดียวกันได้ลองคำนวณย้อนกลับของค่าระดับเหนือทรีที่ปรับให้เข้าภูมิประเทศเรียกชื่อในที่นี้ว่า h_{PP}^* ค่ารัศมีโลก R จะเลือกจำนวนจากตำแหน่งใดก็ได้ในโครงการฯ พบว่าให้ผลต่างต่อค่าพิกัดที่คำนวณได้คลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 มิลลิเมตรและนำไปเปรียบเทียบกับ h_{PP} หรือ H_{PP} ที่โครงการฯ ให้มาจะต่างกันอยู่ในเกณฑ์ 0.68 และ 0.56 เมตรในโซน TM10148@195m และ TM10215@160m ณ จุดนี้จึงอาจสรุปได้ว่าค่า “Geodetic height of projection plane” ที่ให้นั้นคือ ความสูงเหนือทรี h_{PP} ที่ยกระดับขึ้นมาเพื่อให้มาแตะระดับภูมิประเทศในโครงการฯ และ ไม่ได้ให้จุดทศนิยมที่จำเป็นอีกอย่างน้อย 2 ตำแหน่ง ในขณะที่แบบจำลองข้อมูล TGM2017 ในแนวเส้นทางมีค่าระหว่าง -30 ไปจนถึง -28 เมตร โดยประมาณ ซึ่งไม่น่าจะต้องใช้ในกรณีนี้

จากการคำนวณย้อนกลับของค่าระดับเหนือทรี ทำให้สรุปว่าในการทำเอกสารไม่ได้ให้ความสำคัญกับเลขนัยสำคัญของค่าระดับ h_{PP} ซึ่งจะส่งผลต่อค่าสเกลเฟกเตอร์ k_0 ที่จะต้องใช้ ข้อสังเกตอีกประการหนึ่งที่สำคัญคือ ค่าสเกลเฟกเตอร์ k_0 เพื่อใช้ในการคำนวณเชิงเลขมีเสถียรภาพจำนวนหลักทศนิยมจะต้องไม่น้อยกว่า 9 หลัก มิเช่นนั้นแล้วผลการคำนวณค่าพิกัด TM จะไม่สามารถผลิตผลลัพธ์แม่นยำระดับมิลลิเมตรได้

เมื่อกำหนดนิยามการฉายแผนที่ TM ได้ชัดเจน จึงได้ทำการประยุกต์ใช้ ในที่สมมุติให้มีงานรังวัดบริเวณหอดูดาวในโซนต่างๆ โดยที่ระดับพื้นผิวภูมิประเทศใช้ค่าประมาณจากแบบจำลองระดับ NASADEM [6] คำนวณลดทอนเป็นค่าระดับเหนือทรีแล้ว h_{Topo} จากนั้นจึงนำไปคำนวณเป็น Height Scale Factor HSF และ Combined Scale Factor CSF ผลปรากฏ CSF ค่าต่ำสุดมีค่าไม่เกิน -3 ppm ค่าสูงสุดมีค่าไม่เกิน 17 ppm ซึ่งถือว่ามีความดีมา ส่งผลให้การปฏิบัติงานในโครงการฯ มีความสะดวกตามที่ผู้ออกแบบมุ่งหวังไว้รายละเอียดค่าสเกลเฟกเตอร์สำหรับแต่ละโซนตามลำดับแสดงในตารางนี้

ตารางที่ 6 ผลการค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม หรือ Combined Scale Factor: CSF ในแต่ละโซน

โซน	สเกลแฟกเตอร์ k_0	ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม ค่าต่ำสุด Min PPM	ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม ค่าสูงสุด Max ppm
TM10042@000m	1.00000000	-3 ppm	17 ppm
TM10148@195m	1.00003077	-3 ppm	12 ppm
TM10215@160m	1.00002525	4 ppm	14 ppm

6. บทสรุปและข้อคิดเห็น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินวิธีคำนวณการฉายแผนที่ โครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูงไทย-จีน พบว่า เอกสารโครงการฯ ยังขาดความสมบูรณ์ในการมอบให้ฝ่ายไทยนำไปใช้งาน เนื่องจากฝ่ายก่อสร้างจำเป็นต้องมีการรังวัดขยายหมุดควบคุมเพื่อการก่อสร้างเพิ่มการออกแบบหน้างานและการคำนวณงานรังวัด การคำนวณสเกลแฟกเตอร์ ค่าสเกลแฟกเตอร์ร่วม หรือ Combined Scale Factor CSF โครงการฯ จึงจำเป็นต้องรับรู้นิยามการฉายแผนที่ TM ที่กำหนด

การนิยามการฉายแผนที่สามารถทำได้ง่ายโดยการใช้มาตรฐานซอฟต์แวร์ที่นิยามไว้ดีแล้ว เช่น PROJ4, EPSG, WKT, OGC เป็นต้น การระบุนิยามการฉายด้วยมาตรฐานนี้จะทำให้สะดวกนำไปใช้กับซอฟต์แวร์ GIS และ CAD เพื่อการบริหารโครงการ งานการออกแบบ และงานอำนวยความสะดวกต่างๆ ในโครงการรถไฟฟ้าความเร็วสูงไทย-จีน มิได้ชี้แจง ค่าสเกลแฟกเตอร์ k_0 หรือ ความสูงเหนือทรีรี h_{PP} ที่ยกระดับระนาบการฉาย TM ขึ้นมาเพื่อให้มาแต่ละระดับภูมิประเทศในโครงการฯ แต่ไม่ได้ให้จุดทศนิยมที่จำเป็นอีกอย่างน้อย 2 ตำแหน่ง จึงทำฝ่ายไทยไม่สามารถนำไปใช้งานได้ถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามด้วยบัญชีค่าพิกัด WGS-UTM และ WGS-TM ปรากฏในโครงการฯ ที่เป็นหมุดควบคุมจำนวน 81 หมุด ทำให้สามารถที่จะย้อนรอยหาค่าสเกลแฟกเตอร์ k_0 ได้ ดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 5 ผลการขยายหาค่าสเกลแฟกเตอร์ และการเปรียบเทียบค่าพิกัด คำนวณด้วย proj4 กับ WGS-TM

ดังนั้นเอกสารโครงการฯ นอกจะมีบัญชีรายชื่อค่าพิกัดในระบบยูทีเอ็ม WGS-UTM พร้อมระบบพิกัด WGS-TM แล้วควรจะมีระบบสเกลแฟกเตอร์ k_0 และอาจเพิ่มความสะดวกในการนำไปใช้งานด้วยนิยามการฉายแผนที่ที่เป็นมาตรฐานสากล เช่น ในโครงการรถไฟฟ้าไทย-จีนในแต่ละโซนจะมีนิยามการฉายแผนที่ เช่น การใช้ proj4 สอดคล้องกับ สำหรับแต่ละโซนดังนี้

```
..... TM10042@000 .....  
+proj=tmerc +lat_0=0.0 +lon_0=100.7 +k_0=1.00000000 +x_0=500000. +y_0=0 +a=6378137.0 +b=6356752.3142 +units=m  
+no_defs  
..... TM10148@195 .....  
+proj=tmerc +lat_0=0.0 +lon_0=101.8 +k_0=1.000030770 +x_0=500000. +y_0=0 +a=6378137.0 +b=6356752.3142 +units=m  
+no_defs  
..... TM10215@160 .....  
+proj=tmerc +lat_0=0.0 +lon_0=102.25 +k_0=1.000025247 +x_0=500000. +y_0=0 +a=6378137.0 +b=6356752.3142 +units=m  
+no_defs
```

จากผลลัพธ์หากนำไปประมาณการ Combined Scale Factor CSF ที่อาจเกิดขึ้นได้ในโครงการฯ พบว่า ค่าต่ำสุดมีค่าไม่เกิน -3 ppm ค่าสูงสุดมีค่าไม่เกิน 17 ppm ซึ่งถือว่าเป็นผลการออกแบบที่ดีมาก ส่งผลให้การปฏิบัติงานในโครงการฯ โดยเฉพาะการรังวัดก่อสร้างและการรังวัดควบคุมต่างๆ จะมีความสะดวกตามที่ต้องการอย่างแน่นอน

ในแง่ของความละเอียดถูกต้องเชิงเลขเป็นไปได้อีกหลายโครงการมีการใช้ซอฟต์แวร์ไลบรารีสำหรับการคำนวณงานฉายแผนที่รุ่นก่อนๆ โดยเฉพาะซอฟต์แวร์ที่พัฒนาด้วยภาษาฟอร์แทรนและอาจมีการใช้สูตรเชิงเลขที่มีจำนวนเทอมจำกัดจึงทำให้ผลการคำนวณพิกัดอาจมีความละเอียดถูกต้องเชิงเลขเพียงหลักเดซิเมตร-เซนติเมตร แต่ปัจจุบันการรังวัดด้วยกล้องโทเทิลสแตชัน ระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ และการรังวัดจีเอ็นเอสเอส ในงานก่อสร้างมีความละเอียดถูกต้องระดับมิลลิเมตร โครงการต่างๆ จึงควรเลือกใช้ซอฟต์แวร์ไลบรารีรุ่นใหม่ เช่น Geographiclib โดย ดร.ชาร์ล คาร์นี [5] เป็นต้น ซอฟต์แวร์ไลบรารีเหล่านี้พัฒนามาจากโปรแกรมซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เป็นปัจจุบัน เช่น ใช้ภาษาซีหรือไพธอน ซึ่งจะช่วยให้การคำนวณมีความละเอียดถูกต้องเหมาะสมกับผลการรังวัดด้วยเครื่องมือสมัยใหม่

นอกจากนี้ในการประยุกต์ใช้และออกแบบแผนที่การฉายชนิดความผิดเพี้ยนต่ำ LDP จะส่งผลทำให้ค่าสเกลแฟกเตอร์เล็กลง จึงทำให้จำนวนจุดทศนิยมหลังทศนิยม มีนัยสำคัญยิ่ง ในขณะที่เดียวกันระบบคอมพิวเตอร์มีข้อจำกัดในการคำนวณ floating-point ดังนั้นการออกแบบการฉายแผนที่ LDP ควรพิจารณาเลือกจำนวนจุดทศนิยมของสเกลแฟกเตอร์ไม่มากนักและระบุต่อท้าย (exact) ดังปรากฏในงานพัฒนา SPCS2022 ของสหรัฐอเมริกา ตามข้อเสนอแนะของ Dennis [2] ในการออกแบบการฉายแผนที่ LDP ที่กล่าวว่า “Step 5. Keep the definition simple and clean” ในกรณีของโครงการรถไฟไทย-จีนและผลจากการค้นหาทำให้จำนวนทศนิยมของ k_0 ต้องระบุ 9 หลักเนื่องจากความพยายามหาค่าย้อนกลับดังกล่าวมาแล้ว

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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
- [2] Dennis M. : *Ground Truth : Low Distortion Map Projections for Engineering, Surveying, and GIS*, Pipelines, 2016, ASCE

- [3] 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.
- [4] Juliana P. Blackwell: *State Plane Coordinate System of 2022 Policy Document*, National Geodetic Survey, National Ocean Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019.
- [5] Karney, C. F. F., Transverse Mercator with an accuracy of a few nanometers, *Journal of Geodesy*, 2011, 85(8), 475-485 (2011)
- [6] 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

