

การประยุกต์ใช้สถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องในการติดตามระดับน้ำบาดาล

Application of Continuously Operating Reference Stations

for Monitoring Groundwater Levels

ภาคภูมิ กลุ่มในเมือง^{1,*} ชัยพร กิจประชา² และ เฉลิมชนม์ สติระพจน์³

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: Phakphum.momo789@gmail.com

บทคัดย่อ

น้ำบาดาลเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญที่ใช้ทั้งในภาคเกษตรและอุตสาหกรรม ต้องมีการบริหารจัดการอย่างเหมาะสม เพราะการใช้น้ำบาดาลในปริมาณที่มากเกินไปเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาแผ่นดินทรุดตัว และจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ งานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้ข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (Continuously Operating Reference Station : CORS) ซึ่งกระจายตัวทั่วประเทศ เพื่อเป็นเครื่องมือที่ช่วยบริหารจัดการน้ำบาดาลในอนาคต โดยทำการประมวลผลค่าพิกัดทางดิ่งของสถานี CORS ด้วยวิธีการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning : PPP) โดยใช้ซอฟต์แวร์วิจัย Bernese 5.4 ในแต่ละวันบนกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2020 ของสถานี SPBR, AYYA, KTBN และ PKKT เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์แบบเพียร์สันร่วมกับระดับน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกับสถานี CORS คือบ่อ GWA65, GWA9, 6008A016 และ PD63 โดยจับคู่ทดสอบเป็น 4 คู่ทดสอบคือ คู่ทดสอบที่ 1 SPBR-GWA65, คู่ทดสอบที่ 2 AYYA-GWA9, คู่ทดสอบที่ 3 KTBN-6008A016 และคู่ทดสอบที่ 4 PKKT-PD63 ผลการศึกษาพบว่า สถานี SPBR, AYYA, KTBN และ PKKT มีอัตราการทรุดตัวลง 3, 7, 3 และ 3 มม.ต่อปี ตามลำดับ ส่วนระดับน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์ GWA65 เพิ่มขึ้น 1.64 ม.ต่อปี, GWA9 ลดลง 0.03 ม.ต่อปี, 6008A016 เพิ่มขึ้น 0.95 ม.ต่อปี และ PD63 เพิ่มขึ้น 0.15 ม.ต่อปี และเมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดทางดิ่งกับระดับน้ำบาดาลของแต่ละคู่ทดสอบเป็นแบบรายวัน ได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของทั้ง 4 คู่ทดสอบคือ 0.08, 0.23, 0.38 และ 0.36 ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า ค่าพิกัดทางดิ่งของสถานี CORS มีความสัมพันธ์กับระดับน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์ที่อยู่บริเวณใกล้เคียงในระดับต่ำ เนื่องจากยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับค่าพิกัดทางดิ่งของสถานี CORS ด้วย ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ค่าพิกัดทางดิ่งของสถานี CORS เป็นตัวชี้วัดเพื่อบริหารจัดการปริมาณน้ำบาดาลได้โดยตรง

คำสำคัญ: การประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูง (PPP), สถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (CORS), ระบบระบุตำแหน่งบนโลกด้วยดาวเทียม (GNSS), ระดับน้ำบาดาล, การทรุดตัวของแผ่นดิน

Abstract

Groundwater is a vital resource used in agriculture and industry, requiring proper management. Over-extraction of groundwater can lead to land subsidence, affecting infrastructure. This research explores the application of Continuously Operating Reference Stations (CORS) to utilize satellite data for future groundwater management. Vertical coordinates of CORS stations were processed using the Precise Point Positioning (PPP) method with Bernese 5.4 software, on a daily basis within the ITRF2020 reference frame for SPBR, AYYA, KTBN, and PKKT stations. The data were analyzed to examine the Pearson correlation with groundwater levels from nearby observation wells (GWA65, GWA9, 6008A016, PD63). The results showed subsidence rates of 3-7 mm per year at the CORS stations, while groundwater levels varied by +1.64 m, -0.03 m, +0.95 m, and +0.15 m per year at the wells. The correlation coefficients (r) ranged from 0.08 to 0.38, indicating a low relationship between vertical coordinates and groundwater levels. This suggests that CORS vertical coordinates cannot directly serve as indicators for managing groundwater resources. Keywords: Precise Point Positioning (PPP), Continuously Operating Reference Stations (CORS), Global Navigation Satellite System (GNSS), Groundwater Levels, Land subsidence

1. คำนำ

การขุดเจาะบ่อน้ำบาดาลเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยแก้ไขปัญหาน้ำขาดแคลนในพื้นที่แห้งแล้ง แต่การใช้น้ำบาดาลอย่างมากเกินไปสามารถก่อให้เกิดปัญหาการทรุดตัวของพื้นดิน และน้ำเค็มแทรกซึมเข้ามาแทนที่น้ำจืด โดยเฉพาะในพื้นที่ตะวันออกของกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีการใช้น้ำบาดาลสูงและมีอัตราการทรุดตัวของพื้นดินมาก กรมทรัพยากรน้ำบาดาลจึงได้ดำเนินโครงการระบบเฝ้าระวังระดับและคุณภาพของน้ำบาดาลทุกปีงบประมาณ ซึ่งทำให้สามารถ

เก็บข้อมูลน้ำบาดาลอย่างต่อเนื่องและช่วยในการติดตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในอนาคต [1]

ปัญหาการทรุดตัวของพื้นดินอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งปลูกสร้าง เช่น ถนนและอาคาร เนื่องจากการสูบน้ำบาดาลออกจะทำให้แรงดันน้ำในชั้นดินต่างและชั้นหินอุ้มน้ำลดลง [2,5] เป็นเหตุให้ชั้นดินอัดตัวแน่นและส่งผลให้พื้นดินทรุดตัวและตำแหน่งทางตั้งของพื้นเปลี่ยนแปลง ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งทางตั้งและระดับน้ำบาดาลจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ควรการศึกษา

ในปัจจุบันประเทศไทยได้ดำเนินกิจการศูนย์ข้อมูลค่าอ้างอิงพิกัดแบบต่อเนื่อง (National CORS Data Center, NCDC) มีหน้าที่ให้บริการค่าพิกัดที่มีความถูกต้องสูงและเป็นมาตรฐานเดียวกันทั้งประเทศแก่หน่วยงานภาครัฐ ภาคเอกชน และประชาชนทั่วไป โดยบูรณาการข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (Continuously Operating Reference Station, CORS) ของหน่วยงานต่าง ๆ ทั่วประเทศ และจากงานวิจัยในอดีต สถานี CORS ได้กลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งพื้นดิน [6,7] โดยสถานี CORS ทำหน้าที่เป็นจุดควบคุมแบบถาวรที่ใช้รับสัญญาณดาวเทียมนำหน (Global Navigation Satellite System, GNSS) เพื่อตรวจวัดพิกัดตำแหน่งด้วยความแม่นยำสูง ข้อมูลจาก CORS สามารถใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นดินในระดับเซนติเมตรหรือละเอียดกว่านั้น ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในการติดตามการทรุดตัวของพื้นที่ในระยะยาว

เทคโนโลยี GNSS (Global Navigation Satellite System) ไม่ได้ถูกนำมาใช้เพียงเพื่อการระบุตำแหน่งบนพื้นโลกเท่านั้น แต่ยังสามารถประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของมวลน้ำผิวดินได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของการจัดเก็บน้ำใต้ดินผ่านแนวทางการวิเคราะห์ภาระน้ำหนักจากน้ำผิวดิน [8,9]

งานวิจัยในต่างประเทศ เช่น การศึกษาของ Liu et al. (2019) [8] ได้แสดงให้เห็นว่าการผสานข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งจาก GNSS ร่วมกับข้อมูลจาก GRACE และ GLDAS สามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินในพื้นที่ภาคตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศจีนได้อย่างแม่นยำ แม้ในบริเวณที่มีการติดตั้งสถานีตรวจวัดน้ำบาดาลจำกัด ขณะที่ Xu et al. (2022) [9] แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้ข้อมูล GNSS เพียงอย่างเดียวในการติดตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินในมณฑลยูนนานตะวันตกสำหรับประเทศไทย การศึกษาของ อนิรุทธิ์ (2565) [10] ใช้เทคนิค Time-Series InSAR เพื่อวิเคราะห์การทรุดตัวของพื้นดินและความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันน้ำใต้ดินในพื้นที่นครปฐมและสมุทรสาคร พบว่าข้อมูลมีความสอดคล้องกัน

แม้ว่าจะมีการติดตั้งสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (CORS) กระจายอยู่ในหลายภูมิภาค และมีการเฝ้าระวังระดับน้ำบาดาลผ่านบ่อสังเกตการณ์ แต่การใช้ข้อมูลค่าพิกัดทางตั้งจาก GNSS เพื่อศึกษาความสัมพันธ์กับระดับน้ำบาดาลโดยตรงยังมีอยู่อย่างจำกัด งานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญและมุ่งเน้นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งทางตั้งของสถานี CORS และระดับน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่ศึกษา โดย

หวังว่าองค์ความรู้ที่ได้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการน้ำบาดาลและการวางแผนการใช้ทรัพยากรน้ำในพื้นที่ต่างๆ ในบริบทของประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลกับตำแหน่งทางตั้งของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง และศึกษาประโยชน์ของข้อมูลรังวัดสัญญาณ GNSS จากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องต่อการติดตามสถานการณ์ระดับน้ำบาดาลในประเทศไทย และเนื่องจากการศึกษาลักษณะนี้ยังมีน้อยในประเทศไทย อีกทั้งส่วนใหญ่จะเป็นการใช้เทคโนโลยี InSAR ในการศึกษา งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการใช้ค่าพิกัดทางตั้งของสถานี CORS เป็นตัวแทนการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลและมีสมมติฐานว่าค่าพิกัดทางตั้งของสถานี CORS นั้นมีความสัมพันธ์กับระดับน้ำบาดาลในระดับพื้นที่บริเวณใกล้เคียงกัน และผลลัพธ์ที่ได้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวางแผนบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลได้ในเบื้องต้น กล่าวคือ หากค่าพิกัดทางตั้งของสถานี CORS มีความสัมพันธ์ในระดับสูงกับระดับน้ำบาดาลบริเวณใกล้เคียง จะมีความหมายว่าตำแหน่งทางตั้งของสถานี CORS ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างต่อเนื่องจะสะท้อนให้เห็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของระดับน้ำบาดาลบริเวณใกล้เคียงตามไปด้วย ทำให้ทราบแนวโน้มของระดับน้ำบาดาลได้โดยไม่ต้องสร้างบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาล และสามารถต่อยอดเป็นองค์ความรู้เพื่อเป็นระบบแจ้งเตือนเกี่ยวกับการติดตามการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในพื้นที่ที่ไม่มีบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลและติดตามการทรุดตัวของพื้นดินได้ในอนาคต

3. ทฤษฎีและแนวคิดงานวิจัย

การทรุดตัวของพื้นดินเกิดขึ้นจากการสูบน้ำบาดาลในปริมาณมาก ซึ่งส่งผลต่อแรงดันน้ำในชั้นหินอุ้มน้ำ ทำให้ดินและหินในชั้นใต้ดินเกิดการบีบอัดและเคลื่อนตัวลงไปในแนวดิ่ง ทฤษฎีนี้อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งทางตั้งของพื้นดินที่สามารถวัดได้โดยใช้ข้อมูลจากสถานี CORS ตำแหน่งทางตั้งดังกล่าวจะใช้วิธีการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning, PPP) โดยซอฟต์แวร์เชิงวิทยาศาสตร์ Bernese 5.4 ที่รองรับการคำนวณพิกัดทางตั้งในกรอบพิกัดอ้างอิงสากล (ITRF2020) ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวัดตำแหน่งทางตั้งของสถานี CORS ในแต่ละวัน เทคนิคนี้สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของพื้นดินในระดับมิลลิเมตร การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลและการทรุดตัวของพื้นดินนั้นสามารถทำได้โดยใช้การวิเคราะห์สถิติ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson Correlation Coefficient) เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งทางตั้งของสถานี CORS และระดับน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์ในพื้นที่ใกล้เคียง

การศึกษานี้ใช้หลักการในการเลือกจับคู่ระหว่างสถานี CORS และบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลเป็นคู่ทดสอบแบบ 1-1 โดยได้พิจารณาจากเกณฑ์สำคัญสองประการ คือ ระยะทางระหว่างสถานี CORS กับบ่อสังเกตการณ์ต้องอยู่ในรัศมีไม่เกิน 15 กิโลเมตร เพื่อให้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ

ระดับน้ำบาดาลและตำแหน่งทางตั้งมีความเกี่ยวเนื่องกันทางพื้นที่ และต้องเป็นบ่งชี้เหตุการณ์ที่มีข้อมูลการวัดระดับน้ำบาดาลอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาการศึกษาที่กำหนด เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มากพอสำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ได้อย่างถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ

3.1 การประมวลผลตำแหน่งจุดเดียวความละเอียดสูง

การประมวลผลตำแหน่งจุดเดียวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning, PPP) คือ เทคนิคการระบุตำแหน่งในระบบ GNSS ที่มีความแม่นยำสูง โดยสามารถประมวลผลตำแหน่งที่มีความละเอียดในระดับเซนติเมตร [3] ใช้ข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS และค่าแก้ความคลาดเคลื่อนต่างๆ ร่วมในการประมวลผลด้วย เช่น ค่าแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากนาฬิกาเครื่องรับ, ค่าแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรของดาวเทียม, ค่าแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ และค่าแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร

3.2 การทรุดตัวของพื้นดินที่เกิดจากน้ำบาดาล

การทรุดตัวของพื้นดินที่เกิดจากน้ำบาดาล (Groundwater-related Land Subsidence) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลในปริมาณมากเกินไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลให้แรงดันน้ำในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore Pressure) ลดลง ความดันที่หายไปจากน้ำในช่องว่างทำให้ชั้นดินและชั้นหินที่เคยได้รับการรองรับจากน้ำบาดาลสูญเสียสมดุล ส่งผลให้เกิดการอัดตัวของชั้นดิน โดยเฉพาะในชั้นดินเหนียวและดินละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำบาดาลสูง ชั้นดินเหล่านี้จะเกิดการบีบอัดตัวแน่น (Compaction) ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้พื้นดินลดระดับลง ผลกระทบจากการทรุดตัวของพื้นดินมีหลายด้าน เช่น โครงสร้างพื้นฐานเสียหาย, เกิดการเปลี่ยนแปลงของชั้นดินและหินในระยะยาว และความเสี่ยงต่อการเกิดน้ำท่วมที่เพิ่มขึ้น [4]

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของระดับน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลกับตำแหน่งทางตั้งของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง เพื่อการประยุกต์ใช้ข้อมูลรังวัดจากสถานี CORS ที่ถูกติดตั้งอย่างกระจายตัวทั่วประเทศเป็นหนึ่งเครื่องมือที่ช่วยบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาลในอนาคต ทำการจับคู่ทดสอบความสัมพันธ์เป็น 4 คู่ทดสอบคือ ทดสอบที่ 1 SPBR-GWA65, คู่ทดสอบที่ 2 AYYA-GWA9, คู่ทดสอบที่ 3 KTBN-6008A016 และคู่ทดสอบที่ 4 PKKT-PD63 โดยมีขั้นตอนดังนี้

4.1 ประมวลผลตำแหน่งทางตั้งของสถานี CORS

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning, PPP) โดยซอฟต์แวร์ เบิร์นส์ 5.4 เพื่อประมวลผลหาตำแหน่งทางตั้งของสถานี CORS 4 สถานี ได้แก่ สถานี SPBR, AYYA, KTBN และ PKKT ซึ่งเป็นสถานีที่ถูกเลือกใช้ในการศึกษาครั้งนี้ โดยการประมวลผลจุดเดียวความละเอียดสูงเป็นการ

ประมวลผลที่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลค่าแก้ต่าง ๆ ร่วมกับข้อมูลรังวัดสัญญาณ GNSS เพื่อให้ได้ค่าพิกัดฉากคาร์ทีเซียนในแต่ละวันบนกรอบอ้างอิงพิกัดสากล ITRF2020 และถูกต้องตามหลักการ จากนั้นนำค่าพิกัดที่ประมวลผลได้ไปเปลี่ยนเป็นค่าพิกัดภูมิศาสตร์ จากนั้นทำการตัดค่าความสูงเหนือทรงรีที่ผิดปกติ (outlier) ออกไป และนำค่าความสูงเหนือทรงรีที่เหลือมาใช้เป็นค่าพิกัดทางตั้งสำหรับการหาความสัมพันธ์ สำหรับรายละเอียดช่วงเวลาที่ทำ การประมวลผลมีรายละเอียดตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปรายละเอียดเกี่ยวกับสถานี CORS และช่วงข้อมูล

สถานีที่	ชื่อสถานี	ช่วงข้อมูล	ระยะเวลา(วัน)
1	SPBR	1 ม.ค. 2563 – 25 มิ.ย. 2566	1,272
2	AYYA	1 มี.ค. 2562 – 30 ก.ย. 2566	1,675
3	KTBN	1 ม.ค. 2562 – 30 มิ.ย. 2566	1,642
4	PKKT	1 พ.ย. 2562 – 30 ก.ย. 2566	1,430

4.2 ศึกษาแนวโน้มระดับน้ำบาดาลแต่ละบ่อ

ข้อมูลระดับน้ำบาดาลเป็นข้อมูลจากบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลที่ถูกสำรวจและเก็บบันทึกข้อมูลเฉลี่ยเป็นรายวันโดยเครื่องวัดระดับน้ำบาดาลแบบอัตโนมัติ และให้บริการข้อมูลโดยกรมทรัพยากรน้ำบาดาล ซึ่งบ่อที่ถูกเลือกใช้งานวิจัยครั้งนี้เป็นบ่อที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งสถานี CORS มากที่สุด ทำให้ได้ข้อมูลระดับน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาล 4 บ่อ คือ บ่อ GWA65, GWA9, 6008A016 และ PD63 โดยที่ข้อมูลระดับน้ำบาดาลแต่ละบ่อจะอยู่ในช่วงเวลาเดียวกันกับสถานี CORS ที่เป็นคู่ทดสอบ ข้อมูลระดับน้ำบาดาลที่ได้นั้นมีบางส่วนที่ระดับมีความผิดปกติเมื่อเทียบกับแนวโน้มของข้อมูลที่ถูกบันทึกจากบ่อเดียวกันแบบบันทึกโดยเจ้าหน้าที่ จึงมีการตัดข้อมูลดังกล่าวออกไป สำหรับข้อมูลที่มีการขาดหายนั้น งานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการประมาณค่าข้อมูลที่ขาดหายไปใช้ทดแทน เนื่องจากต้องการรักษาความเป็นธรรมชาติของข้อมูลให้ได้มากที่สุด มีรายละเอียดตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สรุปรายละเอียดเกี่ยวกับบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลและช่วงข้อมูล

บ่อสังเกตการณ์ที่	ชื่อบ่อสังเกตการณ์	ช่วงข้อมูล	ระยะเวลา (วัน)
1	SPBR	1 ม.ค. 2563 – 25 มิ.ย. 2566	1,272
2	AYYA	1 มี.ค. 2562 – 30 ก.ย. 2566	1,675
3	KTBN	1 ม.ค. 2562 – 30 มิ.ย. 2566	1,642
4	PKKT	1 พ.ย. 2562 – 30 ก.ย. 2566	1,430

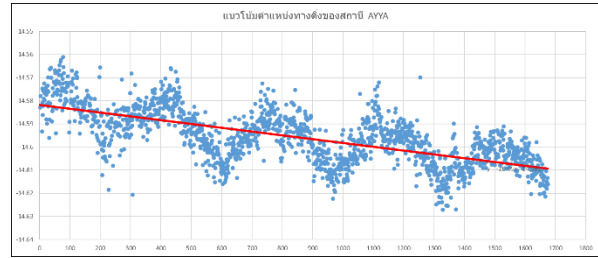
4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับตำแหน่งทางตั้งของ CORS ที่อยู่บริเวณใกล้เคียง

การหาความสัมพันธ์ในงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์สถิติสหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson Correlation Coefficient) ในการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างคู่ทดสอบในแต่ละคู่ เพื่อทดสอบลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างข้อมูลสองชุด ได้แก่ ค่าระดับน้ำบาดาลและค่าพิกัดทางตั้งจากสถานี

CORS ที่อยู่บริเวณใกล้เคียงกัน มี 4 คู่ทดสอบและรายละเอียดตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปรายละเอียดการจับคู่ทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์

คู่ทดสอบที่	CORS-บ่อสังเกตการณ์	ข้อมูลที่ตรงกัน(วัน)	ระยะทาง(km)
1	SPBR-GWA65	545	3.15
2	AYYA-GWA9	727	7.50
3	KTBN-6008A016	1,466	9.30
4	PKKT-PD63	1,137	0.15

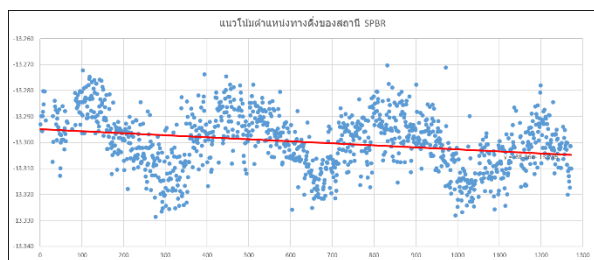


รูปที่ 2 แนวโน้มตำแหน่งทางดิ่งของสถานี AYYA

5. ผลการศึกษา

5.1 แนวโน้มตำแหน่งทางดิ่งของ CORS แต่ละสถานี

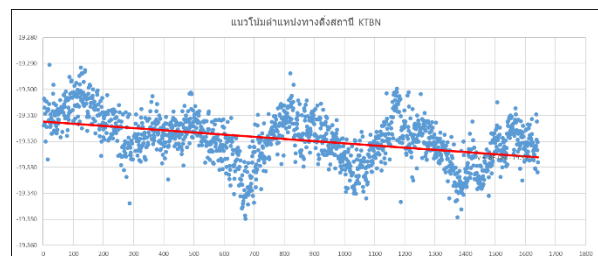
สถานีที่ 1 SPBR เป็นสถานี CORS ที่ตั้งอยู่บนอาคารสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดสุพรรณบุรี โดยพิกัดภูมิศาสตร์ของสถานีที่เผยแพร่โดย ศูนย์ข้อมูลค่าอ้างอิงพิกัดแบบต่อเนื่องแห่งชาติ (NCDC) คือ ละติจูดที่ 14.53 องศาเหนือ ลองจิจูดที่ 100.13 องศาตะวันออก สถานี SPBR ถูกติดตั้งอยู่บนอาคารสำนักงาน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีรากฐานแข็งแรงและได้รับการเสริมเสาเข็มลึก โครงสร้างทางธรณีวิทยาของพื้นที่ประกอบด้วย ชั้นดินเหนียวสลับกับชั้นดินทราย การศึกษาข้อมูลการเปลี่ยนแปลงพิกัดทางดิ่งระยะเวลา 1,272 วัน ผลการศึกษาพบว่า สถานี SPBR มีการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดทางดิ่งตามรูปที่ 1 คือมีแนวโน้มการทรุดตัวลงอย่างสม่ำเสมอ มีความแปรผันตามฤดูกาลและมีอัตราการเคลื่อนตัวลงประมาณ 3 มิลลิเมตรต่อปี



รูปที่ 1 แนวโน้มตำแหน่งทางดิ่งของสถานี SPBR

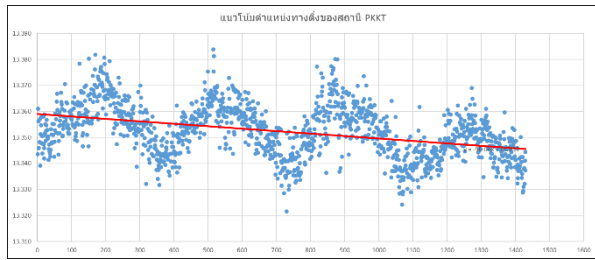
สถานีที่ 2 AYYA เป็นสถานี CORS ที่ตั้งอยู่บนอาคารสำนักงานที่ดินจังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยพิกัดภูมิศาสตร์ของสถานีที่เผยแพร่โดย ศูนย์ข้อมูลค่าอ้างอิงพิกัดแบบต่อเนื่องแห่งชาติ (NCDC) คือ ละติจูดที่ 14.36 องศาเหนือ ลองจิจูดที่ 100.58 องศาตะวันออก สถานี AYYA ถูกติดตั้งอยู่บนอาคารสำนักงาน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีรากฐานแข็งแรงและได้รับการเสริมเสาเข็มลึก โครงสร้างทางธรณีวิทยาของพื้นที่ประกอบด้วย ชั้นดินเหนียวสลับกับชั้นดินทราย การศึกษาข้อมูลการเปลี่ยนแปลงพิกัดทางดิ่งระยะเวลา 1,675 วัน ผลการศึกษาพบว่า สถานี AYYA มีการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดทางดิ่งตามรูปที่ 2 คือมีแนวโน้มการทรุดตัวลงอย่างสม่ำเสมอ มีความแปรผันตามฤดูกาลและมีอัตราการเคลื่อนตัวลงประมาณ 7 มิลลิเมตรต่อปี

สถานีที่ 3 KTBN เป็นสถานี CORS ที่ตั้งอยู่บนอาคารสำนักงานที่ดินจังหวัดสมุทรสาคร สาขากระทุ่มแบน โดยพิกัดภูมิศาสตร์ของสถานีที่เผยแพร่โดย ศูนย์ข้อมูลค่าอ้างอิงพิกัดแบบต่อเนื่องแห่งชาติ (NCDC) คือ ละติจูดที่ 13.62 องศาเหนือ ลองจิจูดที่ 100.30 องศาตะวันออก สถานี KTBN ถูกติดตั้งอยู่บนอาคารสำนักงาน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีรากฐานแข็งแรงและได้รับการเสริมเสาเข็มลึก โครงสร้างทางธรณีวิทยาของพื้นที่ประกอบด้วย ชั้นดินเหนียวสลับกับชั้นดินทราย การศึกษาข้อมูลการเปลี่ยนแปลงพิกัดทางดิ่งระยะเวลา 1,642 วัน ผลการศึกษาพบว่า สถานี KTBN มีการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดทางดิ่งตามรูปที่ 3 คือมีแนวโน้มการทรุดตัวลงอย่างสม่ำเสมอ มีความแปรผันตามฤดูกาลและมีอัตราการเคลื่อนตัวลงประมาณ 3 มิลลิเมตรต่อปี

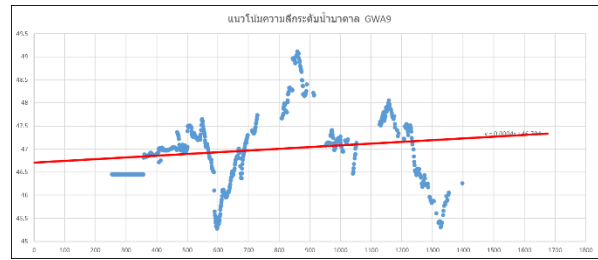


รูปที่ 3 แนวโน้มตำแหน่งทางดิ่งของสถานี KTBN

สถานีที่ 4 PKKT เป็นสถานี CORS ที่ตั้งอยู่บนอาคารสำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด โดยพิกัดภูมิศาสตร์ของสถานีที่เผยแพร่โดย ศูนย์ข้อมูลค่าอ้างอิงพิกัดแบบต่อเนื่องแห่งชาติ (NCDC) คือ ละติจูดที่ 13.91 องศาเหนือ ลองจิจูดที่ 100.54 องศาตะวันออก สถานี PKKT ถูกติดตั้งอยู่บนอาคารสำนักงาน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีรากฐานแข็งแรงและได้รับการเสริมเสาเข็มลึก โครงสร้างทางธรณีวิทยาของพื้นที่ประกอบด้วย ชั้นดินเหนียวสลับกับชั้นดินทราย การศึกษาข้อมูลการเปลี่ยนแปลงพิกัดทางดิ่งระยะเวลา คือ 1,430 วัน ผลการศึกษาพบว่า สถานี PKKT มีการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดทางดิ่งตามรูปที่ 4 คือมีแนวโน้มการทรุดตัวลงอย่างสม่ำเสมอ มีความแปรผันตามฤดูกาลและมีอัตราการเคลื่อนตัวลงประมาณ 3 มิลลิเมตรต่อปี



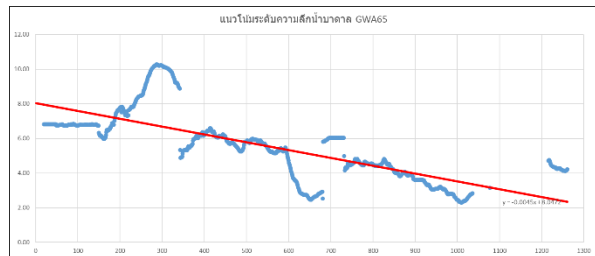
รูปที่ 4 แนวโน้มตำแหน่งทางดิ่งของสถานี PKKT



รูปที่ 6 แนวโน้มความลึกระดับน้ำบาดาลบ่อ GWA9

5.2 แนวโน้มระดับน้ำบาดาลแต่ละบ่อ

บ่อสังเกตการณ์ที่ 1 GWA65 ตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่วัดเทพสุทธาวาส สุพรรณบุรี อำเภอศรีประจันต์ จังหวัดสุพรรณบุรี โดยเป็นบ่อที่มีความลึก 36 เมตร ตั้งอยู่ในพื้นที่เหนืออ่างเจ้าพระยาตอนล่าง ลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ประกอบด้วย ชั้นดินเหนียวสลับกับชั้นดินทราย มีการบันทึกข้อมูลระดับน้ำบาดาลโดยเครื่องวัดระดับน้ำบาดาลแบบอัตโนมัติ ภายใต้ช่วงเวลาการศึกษา 1,272 วัน ผลการศึกษาพบว่า ความลึกระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงลดลง ตามรูปที่ 5 สื่อความหมายว่าระดับน้ำบาดาลมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นแบบไม่มีความแปรผันตามฤดูกาล โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ 1.64 เมตรต่อปี



รูปที่ 5 แนวโน้มความลึกระดับน้ำบาดาลบ่อ GWA65

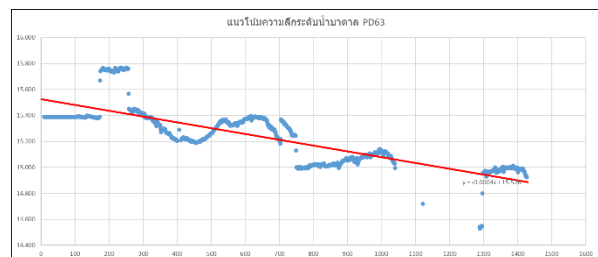
บ่อสังเกตการณ์ที่ 2 GWA9 ตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่โรงเรียนวัดขุนทิพย์ อำเภออุทัย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยเป็นบ่อที่มีความลึก 99 เมตร ตั้งอยู่ในพื้นที่เหนืออ่างเจ้าพระยาตอนล่าง ลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ประกอบด้วย ชั้นดินเหนียวสลับกับชั้นดินทราย มีการบันทึกข้อมูลระดับน้ำบาดาลโดยเครื่องวัดระดับน้ำบาดาลแบบอัตโนมัติ ภายใต้ช่วงเวลาการศึกษา 1,675 วัน ผลการวิเคราะห์พบว่า ความลึกระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ตามรูปที่ 6 สื่อความหมายว่าระดับน้ำบาดาลมีแนวโน้มที่ลดลงแบบไม่มีความแปรผันตามฤดูกาล โดยมีอัตราการลดลงประมาณ 0.03 เมตรต่อปี

บ่อสังเกตการณ์ที่ 3 6008A016 ตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตสมุทรสาคร อำเภอเมืองสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร โดยเป็นบ่อที่มีความลึก 300 เมตร ตั้งอยู่ในพื้นที่เหนืออ่างเจ้าพระยาตอนล่าง ลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ประกอบด้วย ชั้นดินเหนียวสลับกับชั้นดินทราย มีการบันทึกข้อมูลระดับน้ำบาดาลโดยเครื่องวัดระดับน้ำบาดาลแบบอัตโนมัติ ภายใต้ช่วงเวลาการศึกษา 1,642 วัน ผลการศึกษาพบว่า ความลึกระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงลดลง ตามรูปที่ 7 สื่อความหมายว่าระดับน้ำบาดาลมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นแบบไม่มีความแปรผันตามฤดูกาล กล่าวคือน้ำบาดาลมีอัตราการเพิ่มขึ้นประมาณ 0.95 เมตร ต่อปี



รูปที่ 7 แนวโน้มความลึกระดับน้ำบาดาลบ่อ 6008A016

บ่อสังเกตการณ์ที่ 4 PD63 ตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่วัดผาสุกมณีจักร อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี โดยเป็นบ่อที่มีความลึก 110 เมตร ตั้งอยู่ในพื้นที่เหนืออ่างเจ้าพระยาตอนล่าง ลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ประกอบด้วย ชั้นดินเหนียวสลับกับชั้นดินทราย มีการบันทึกข้อมูลระดับน้ำบาดาลโดยเครื่องวัดระดับน้ำบาดาลแบบอัตโนมัติ ภายใต้ช่วงเวลาการศึกษา 1,430 วัน ผลการศึกษาพบว่า ความลึกระดับน้ำบาดาลเปลี่ยนแปลงลดลง ตามรูปที่ 8 สื่อความหมายว่าระดับน้ำบาดาลมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นแบบไม่มีความแปรผันตามฤดูกาล โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้น 0.15 เมตรต่อปี



รูปที่ 8 แนวโน้มความลึกระดับน้ำบาดาลบ่อ PD63

5.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับน้ำบาดาลกับตำแหน่งทางตั้งของสถานี CORS

ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรในแต่ละคู่ทดสอบโดยใช้สถิติสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Person correlation) เนื่องจากการทดสอบนี้มี 2 ตัวแปร คือ ตำแหน่งทางตั้งของสถานี CORS และระดับน้ำบาดาล ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละคู่ทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละคู่ทดสอบ

คู่ทดสอบที่	สถานี	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
1	SPBR-GWA65	0.08
2	AYYA-GWA9	0.23
3	KTBN-6008A016	0.38
4	PKKT-PD63	0.36

จากตารางที่ 4 พบว่าคู่ทดสอบที่ 1-4 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) 0.03, 0.23, 0.38 และ 0.36 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแปลความหมายได้ว่าความสัมพันธ์ของตำแหน่งทางตั้งของสถานี CORS และระดับน้ำบาดาล มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ ผลจากความสัมพันธ์ในระดับต่ำของข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้ส่งผลให้ทราบว่าจะไม่ควรใช้ข้อมูลจากสถานี CORS ในพื้นที่ประเทศไทยมาติดตามสถานการณ์ระดับน้ำบาดาล เนื่องจากยังมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อตำแหน่งทางตั้งของสถานี CORS นอกจากการเพิ่มหรือลดของระดับน้ำบาดาล อีกทั้งสถานี CORS ถูกติดตั้งบนโครงสร้างที่ได้รับการเสริมเสาเข็มลึก และบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลไม่ได้ยึดติดกับสถานี CORS มีระยะห่างหลายกิโลเมตร ตามตารางที่ 3 แม้ระดับน้ำบาดาลเกิดเปลี่ยนแปลงอาจจะไม่ส่งผลกระทบต่อความชัดเจนกับโครงสร้างของอาคารที่ติดตั้งสถานี CORS อีกทั้งข้อมูลระดับน้ำบาดาลที่บันทึกได้อาจไม่สะท้อนกับความเป็นจริงของระดับน้ำบาดาลที่อยู่ใต้สถานี CORS

6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งทางตั้งของสถานี CORS ยังไม่สามารถนำมาใช้เป็นค่าชี้วัดการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำบาดาลได้โดยตรง เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งทางตั้งของสถานี CORS และระดับน้ำบาดาลจากบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลอยู่ในระดับต่ำ ($r = 0.03 - 0.38$) ซึ่งเป็นผลจากหลายปัจจัยร่วมกัน เช่น ลักษณะการติดตั้งสถานี CORS โดยสถานีที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ทั้งหมดถูกติดตั้งบนอาคารที่มีโครงสร้างรากฐานแข็งแรงและมีการเสริมเสาเข็มลึก ทำให้ไม่ได้รับผลจากการทรุดตัวของพื้นดินที่จะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคาร และระยะห่างระหว่างสถานี CORS กับบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลอยู่ห่างกันหลายกิโลเมตร ส่งผลให้ค่าพิภพทางตั้งของสถานี CORS ไม่สามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำบาดาลในพื้นที่ของบ่อสังเกตการณ์ได้โดยตรง แต่อาจใช้ร่วมกับข้อมูลอื่นเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการติดตามแนวโน้มการทรุดตัว และการศึกษาของต่างประเทศในบางกรณี [8,9] พบว่าข้อมูลตำแหน่งทางตั้งจากสถานี CORS สามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของน้ำบาดาลได้ และเมื่อถูกใช้

ร่วมกับข้อมูล GRACE สามารถวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำบาดาลในระดับภูมิภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต ควรเลือกทดสอบในเชิงพื้นที่ระหว่าง 1 สถานี CORS กับบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลหลายบ่อที่อยู่รอบหรือหาความสัมพันธ์ในบริบทที่หลากหลายมากขึ้น เช่น ในพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิประเทศและธรณีวิทยาต่างกัน เพื่อการจำแนกปัจจัยที่ส่งผลต่อการทรุดตัวของตัวพื้นดินจากน้ำบาดาลมากขึ้น หรือควรพิจารณาประมวลผลข้อมูลที่มีลักษณะที่ได้จากการสำรวจภาคสนาม, ข้อมูลจากเทคโนโลยี InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) และข้อมูลแรงโน้มถ่วงจากดาวเทียม GRACE เพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งทางตั้งของพื้นที่ได้

ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายและการประยุกต์ใช้ หน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรพิจารณาโครงการออกแบบและติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่องที่มีลักษณะเป็นเสาเดี่ยวบนพื้นดินที่อยู่เหนือแหล่งน้ำบาดาลหรือพื้นที่เสี่ยงต่อการทรุดตัวของพื้นดิน หรือติดตั้งในบริเวณเดียวกับบ่อสังเกตการณ์น้ำบาดาลที่อยู่กลางแจ้งและสะดวกต่อการรับสัญญาณดาวเทียม โดยสามารถติดตั้งในลักษณะโครงการที่เป็นการทดสอบนำร่องเพื่อการเก็บข้อมูลและศึกษาความสัมพันธ์ของข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS กับน้ำบาดาลโดยเฉพาะ หากสามารถทำได้โดยใช้งบประมาณที่ไม่สูงมาก จะทำให้ง่ายต่อการบำรุงรักษาและดำเนินโครงการได้อย่างต่อเนื่อง อีกทั้งการเก็บบันทึกข้อมูลที่มีความต่อเนื่องไม่ตกหล่น จะเกิดประโยชน์ทั้งในด้านวิชาการและการประยุกต์ใช้มากขึ้น และหากโครงการทดสอบนำร่องดังกล่าวสามารถดำเนินการทำให้เกิดประโยชน์ได้จริง ควรมีการขยายผลต่อไปในพื้นที่ศึกษาอื่น ๆ หรือสามารถพัฒนาระบบเฝ้าระวังการทรุดตัวของพื้นดินโดยใช้เทคโนโลยีสำรวจร่วมกับองค์ความรู้ด้านอื่น อีกทั้งควรส่งเสริมการบูรณาการข้อมูลจากหลายหน่วยงาน เพื่อจัดทำฐานข้อมูลกลางที่เป็นประโยชน์ทั้งในด้านการศึกษาวิจัยและการติดตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมและทรัพยากรต่าง ๆ ในอนาคต เช่น การจัดตั้งศูนย์ข้อมูลเพื่อเก็บข้อมูลสำรวจที่ได้จากงานภาคสนามหรือเครื่องวัดต่าง ๆ ที่หน่วยงานราชการเป็นผู้ดำเนินงาน เพื่อให้เป็นแหล่งรวมข้อมูลที่สามารถเข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและง่ายมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทางด้านสถานที่และทรัพยากรในการดำเนินงานวิจัยนี้ รวมถึงกรมโยธาธิการและผังเมือง, กรมที่ดิน และกรมทรัพยากรน้ำบาดาลที่เอื้อเฟื้อข้อมูลซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการศึกษาครั้งนี้

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงต่อคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ สำหรับคำแนะนำอันทรงคุณค่าทั้งในด้านวิชาการและเทคนิคตลอดระยะเวลาการดำเนินงาน รวมถึงนิสิตร่วมภาควิชาทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการประมวลผลข้อมูลและจัดทำงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณครอบครัวที่ให้งานกำลังใจและการสนับสนุนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นแรงผลักดันสำคัญให้การศึกษาวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2566). รายงานประจำปี 2566. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. สืบค้นจาก <https://www.dgr.go.th/>
- [2] Sun, Y. (2024). Research on the analysis and management measures of land subsidence caused by groundwater exploitation in Tianjin, China. Proceedings of the 4 th International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/61/20240924>
- [3] Bulbul, S., Bilgen, B., & Inal, C. (2021). The performance assessment of Precise Point Positioning (PPP) under various observation conditions. *Measurement*, 171, 108780. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108780>
- [4] Hung, W.-C., Hwang, C., Lin, S.-H., Wang, C.-S., Chen, Y.-A., Tsai, P.-C., & Lin, K.-C. (2024). Exploring groundwater depletion and land subsidence dynamics in Taiwan's Choushui river alluvial fan: Insights from integrated GNSS and hydrogeological data analysis. *Frontiers in Earth Science*, 12,1370626. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1370626>
- [5] Ji, K. H., & Herring, T. A. (2012). Correlation between changes in groundwater levels and surface deformation from GPS measurements in the San Gabriel Valley, California. *Geophysical Research Letters*, 39, L01301. <https://doi.org/10.1029/2011GL050195>
- [6] Tran, D. T., Nguyen, D. H., Vu, N. Q., & Nguyen, Q. L. (2023). Crustal displacement in Vietnam using CORS data during 2018–2021. *Earth Sciences Research Journal*, 27(1), 27–36. <https://doi.org/10.15446/esrj.v27n1.102630>
- [7] Paziewski, J., Stepniak, K., Sieradzki, R., & Yigit, C. O. (2023). Dynamic displacement monitoring by integrating high-rate GNSS and accelerometer: on the possibility of downsampling GNSS data at reference stations. *Gps Solutions*, 27(3), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01500-x>
- [8] Liu, Z., Jiang, J., & Ma, J. (2019). Estimating terrestrial water storage changes using GNSS vertical displacement observations in Southwest China. *Entropy*, 21(7), 664. <https://doi.org/10.3390/e21070664>
- [9] Xu, W., Jiang, W., Li, Y., & Zhou, M. (2022). Recovering regional groundwater storage anomalies by integrating GNSS and hydrological models in western Yunnan, China. *Frontiers in Water*, 4, 838174. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.838174>
- [10] อนิรุทธ์ ลดาวิดี, อนุเฝ้า ออบแพทย์ และ สรวิศ สุภเวทย์, การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำใต้ดิน และอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินจากเทคนิคอนุกรมเวลา InSAR, *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 21, เชียงราย*, 24-26 สิงหาคม 2565, หน้า SGI14–1.