

การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล ช่วงปี ค.ศ. 2017 – 2022 ด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา โดยใช้ซอฟต์แวร์ MintPy Monitoring Land Subsidence in Bangkok Metropolis and Vicinity during 2017 – 2022 by InSAR Time Series Technique with MintPY Software

ณัฐริณีย์ เอี้ยวรัตนวดี^{1,*} และ ปวัน ภิรมย์ทอง²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: 6470318721@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

การทรุดตัวของแผ่นดินมีสาเหตุจากธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ทั้งทางตรง เช่น การสูบน้ำบาดาล และทางอ้อม เช่น การขยายตัวของเมือง และการพัฒนาทางเศรษฐกิจ เมื่อขนาดการทรุดตัวสะสมมากเกินไปจนอาจก่อให้เกิดความเสียหาย ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการติดตามได้หลายวิธี แต่ยังมีข้อจำกัดที่ความละเอียดของข้อมูลในเชิงตำแหน่งไม่เพียงพอและมีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งการสำรวจระยะไกลสามารถลดข้อจำกัดนี้ได้โดยใช้เทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลาเพื่อตรวจสอบการทรุดตัวของแผ่นดิน งานวิจัยนี้ใช้การประมวลผลด้วยเทคนิค Small Baseline โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 ในวงโคจรขาขึ้น ช่วงปี ค.ศ. 2017 – 2022 และในวงโคจรขาลง ช่วงปี ค.ศ. 2018 – 2022 ด้วยซอฟต์แวร์ MintPy ซึ่งมีระยะเวลาในการประมวลผลอัตโนมัติได้อย่างรวดเร็ว เหมาะแก่การใช้เป็นระบบติดตามการทรุดตัวของแผ่นดิน โดยพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษาคือ กรุงเทพมหานครและปริมณฑลเนื่องจากเป็นพื้นที่ทางเศรษฐกิจของประเทศไทย จากการวิจัยพบว่าพื้นที่ที่มีอัตราการทรุดตัวสูง คือ ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า และพื้นที่นิคมอุตสาหกรรม จ.สมุทรสาคร โดยมีค่าอัตราการทรุดตัวมากกว่า 30 มิลลิเมตรต่อปี และมีค่าสหสัมพันธ์ของสองชุดข้อมูลอยู่ในช่วง 0.6 – 0.9 แสดงถึงความสอดคล้องกันระหว่างผลลัพธ์ ดังนั้นควรมีการติดตามและเฝ้าระวังอย่างต่อเนื่องในบริเวณพื้นที่ดังกล่าว

คำสำคัญ: อินซาร์, อินซาร์แบบอนุกรมเวลา, การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดิน, ซอฟต์แวร์ Mintpy

Abstract

Natural and human activities both cause land subsidence, either directly activity, groundwater pumping and indirectly activity, urbanization and economic development. When the cumulative subsidence size exceeds the limits, it can cause damage. Thus, a routine system of monitoring land subsidence should be implemented. Although there are many methods that

can precisely detect land subsidence but high cost and have a low spatial resolution. On the contrary, remote sensing using the InSAR technique can detect land subsidence. This research applies the Small Baseline technique to process Sentinel-1 data in ascending orbit 2017 - 2022 and in descending orbit 2018 - 2022 through MintPy software that has a processing time to update data quickly and suitable for detect land subsidence. The study area was Bangkok metropolis and vicinity which are the economic area of Thailand. From the research, it was found that the area with high subsidence tendency is Srinakarin-Romklao road and Samut Sakhon industrial area, with the displacement in the range of less than -30 millimeters per year. The correlation of the two datasets was in the range of 0.6 – 0.9 which are related. Therefore, there should be continuous monitoring and surveillance in such areas.

Keywords: InSAR, Time-series InSAR, Monitoring land subsidence, MintPy software

1. บทนำ

การทรุดตัวของแผ่นดินมีสาเหตุมาจากธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ เมื่อการทรุดตัวของแผ่นดินเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและทวีความรุนแรงมากขึ้น อาจนำไปสู่ความเสียหายต่อทรัพย์สิน, สิ่งปลูกสร้าง, ที่อยู่อาศัย และประชากรได้ ไม่ว่าจะเป็นทางตรงที่การทรุดตัวทำให้มีความเสียหายทางโครงสร้างหรือทางอ้อมที่จะทำให้ประสบปัญหาในการบริหารจัดการน้ำ ในบางพื้นที่ โดยสาเหตุหลักที่ยังส่งผลต่อการทรุดตัวของแผ่นดินในบางพื้นที่คือ การใช้น้ำบาดาล [1] ถึงแม้ว่าจะมีการออกกฎหมายควบคุมการใช้น้ำบาดาลแต่ก็ยังคงมีการใช้น้ำบาดาลเพื่ออุปโภคและบริโภคอยู่ อีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่ออัตราการทรุดตัวคือ การขยายตัวของเขตเมือง การพัฒนาทางเศรษฐกิจ [2] จากกิจกรรมการใช้ประโยชน์ของที่ดินที่ผ่านมาทำให้ในบางพื้นที่ที่อัตราการทรุดตัวที่ชะลอลงหรือยังมีการทรุดตัวแบบคงที่

และรวมไปถึงการเติบโตของพื้นที่เมืองที่อาจส่งผลให้แนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินเพิ่มขึ้นในอนาคต

ในปัจจุบันมีการตรวจสอบและติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินได้หลายวิธี วิธีแบบดั้งเดิมคือการเดินระดับ (Levelling) [3] และวิธีที่ใช้กันมากขึ้นในปัจจุบันคือการใช้ค่าความสูงที่ได้จากระบบนำทางด้วยดาวเทียม (Global Navigation Satellite System, GNSS) มีการตั้งตำแหน่งสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง (Continuously Operating Reference Stations, CORS stations) ที่ให้ค่าความถูกต้องในระดับมิลลิเมตร [4] แต่เนื่องจากข้อจำกัดของการทำให้สามารถตรวจวัดค่าความสูงได้ตำแหน่งเป็นจุด ทำให้การทำงานสำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่เป็นไปได้อย่างรวบไปถึงมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและการดำเนินงานสูง เทคนิคต่อมาคือการใช้ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกล (Remote Sensing) โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมซาร์ (Synthetic Aperture Radar, SAR) โดยเทคนิคนี้จะนำภาพพื้นที่เดียวกันแต่คนละช่วงเวลาามาเปรียบเทียบหาความแตกต่างกันของสัญญาณที่ตรวจจับได้และประมวลผลเพื่อหาการทรุดตัวของแผ่นดิน เรียกเทคนิคนี้ว่า อินซาร์ (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) โดยเทคนิคนี้ถ้าหากมีการประมวลผลเป็นอนุกรมเวลา (Time-series analysis) สามารถให้ค่าการทรุดตัวเฉลี่ยในระดับมิลลิเมตรต่อปี [5, 6] ยิ่งไปกว่านั้นในทุกๆจุดภาพหมายถึงหนึ่งการรังวัด ทำให้ผลลัพธ์ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ ซึ่งปัจจุบันภาพถ่ายดาวเทียมสามารถเข้าถึงได้ง่ายและให้บริการแบบไม่มีค่าใช้จ่ายทำให้ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ข้อมูลได้ตามความต้องการ ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากการประมวลผลด้วยเทคโนโลยีอินซาร์สำหรับการติดตามการทรุดตัวในงานหลายประเภทนอกเหนือจากการตรวจสอบแผ่นดินทรุดตงเช่น แผ่นดินไหว, ภูเขาไฟ, ธารน้ำแข็ง, เหมืองถ่านหิน, เขื่อนและสันนิบา เป็นต้น

เทคนิค Small Baseline เป็นการประมวลผลแบบอนุกรมเวลาของเทคนิคอินซาร์รูปแบบหนึ่ง [7] โดยใช้หลักการหาผลต่างของภาพเฟส (Interferogram image) ที่มีระยะห่างจุดที่ถ่ายภาพ (Spatial baseline) และระยะเวลา (Temporal baseline) สั้นที่สุด เพื่อเป็นรักษาระดับคุณภาพ (Coherence) ของข้อมูลและด้วยลักษณะการประมวลที่มีข้อได้เปรียบหลายอย่าง เช่น การประมวลผลที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าและใช้ค่าความละเอียดที่ต่ำ ทำให้มีระยะเวลาการประมวลผลน้อย สามารถครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ ด้วยสาเหตุนี้ทำให้เทคนิค Small Baseline เป็นวิธีที่สามารถอัปเดตข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว เหมาะแก่การติดตามและเฝ้าระวัง (Monitoring) การทรุดตัวของแผ่นดิน โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ The Miami INsar Time-series software in Python (MintPy) [8, 9] ในการประมวลผลอินซาร์แบบอนุกรมเวลา (Time-series InSAR, TS-InSAR) สำหรับการตรวจหาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน ซอฟต์แวร์ MintPy ถูกพัฒนาขึ้นรูปแบบภาษาไพทอน (Python) โดยในการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ MintPy ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลคู่ภาพเรดาร์หรือที่เรียกว่าภาพ Interferogram ที่ผลิตจาก Alaska SAR Facility ซึ่งเป็นหน่วยงานส่งเสริมการประยุกต์ใช้ข้อมูลเรดาร์ที่จัดเก็บข้อมูลเรดาร์จากดาวเทียมดวงต่างๆ ไว้บนเว็บไซต์ ASF Vertex ทำให้สามารถเลือกข้อมูล

ในขอบเขตพื้นที่และช่วงเวลาที่ต้องการได้ ถือเป็นการลดเวลาการทำงานและลดขั้นตอนที่มีความซับซ้อนแก่ผู้ใช้

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการทรุดตัวของแผ่นดินบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลด้วยการประมวลผลของเทคโนโลยีอินซาร์แบบอนุกรมเวลา เทคนิค Small Baseline ด้วยซอฟต์แวร์ MintPy ซึ่งจะมีการตรวจสอบความสัมพันธ์ของข้อมูลอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินที่ประมวลผลได้โดยใช้ชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมทั้งในวงโคจรขาขึ้นและวงโคจรขาลงที่เป็นอิสระต่อกันเพื่อประเมินประสิทธิภาพและความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้องค์กรในประเทศไทยสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีอินซาร์มากขึ้นและเป็นการเสนอทางเลือกที่เหมาะสมในการติดตามและเฝ้าระวังอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยได้อย่างเป็นระบบ ลดการทำงานซ้ำซ้อนและประหยัดค่าใช้จ่าย

1.1 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิค Small Baseline ในการติดตามการทรุดตัวแบบอนุกรมเวลา โดยเทคนิค Small Baseline มีจุดเด่นในเรื่องการครอบคลุมเชิงพื้นที่ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการตรวจสอบและติดตามการทรุดตัว แต่ถ้าหากมองในมุมมองของความละเอียด (Resolution) ของผลลัพธ์การทรุดตัวของแผ่นดิน การประมวลผลด้วยเทคนิค Persistent Scatter ที่มี การประมวลผลที่ไม่มีการลดความละเอียดของภาพถ่ายดาวเทียมจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความละเอียดสูงแต่มีข้อจำกัดในเรื่องของความซับซ้อนในการประมวลผล เวลาที่ใช้ในการประมวลผล นอกจากนี้เทคนิค Small Baseline ที่มีข้อได้เปรียบที่ให้ผลลัพธ์การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินครอบคลุมพื้นที่กว้าง สามารถใช้เพื่อช่วยในการตรวจหาพื้นที่ที่มีการทรุดตัวที่สูงแล้วใช้เทคนิค Persistent Scatter ในการประมวลผลในพื้นที่เหล่านั้นเพื่อให้ได้ความละเอียดเพิ่มเติม เป็นการลดการดาวน์โหลดและประมวลผลข้อมูลปริมาณมาก ลดเวลาและข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในงานได้

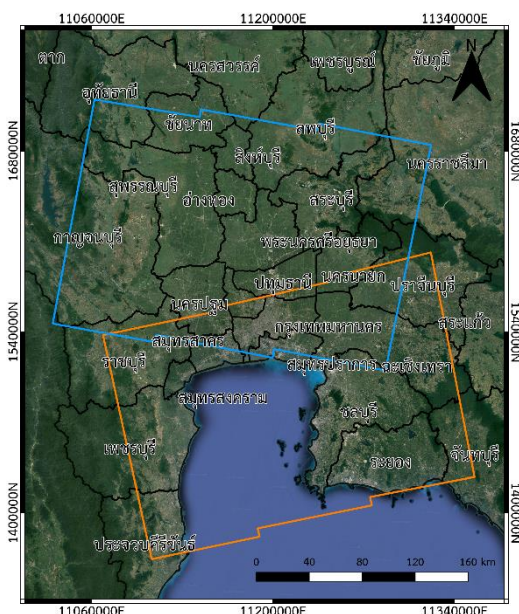
โดยจุดเด่นในการประมวลผลอินซาร์แบบอนุกรมเวลาด้วยซอฟต์แวร์ HyP3 และซอฟต์แวร์ MintPy ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ มีการรองรับการใช้ข้อมูล Interferogram ที่ผลิตได้จาก Alaska Satellite Facility (ASF) ซึ่งมีความสะดวกในการใช้อย่างมาก มากไปกว่านั้นในขั้นตอนการประมวลผลมีขั้นตอนขจัดค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากการทำ Unwrapping, การให้ค่าน้ำหนักในแต่ละเส้นของโครงข่าย Interferogram ก่อนนำไปคำนวณค่าการทรุดตัวแบบอนุกรมเวลาและมีการคัดเลือกจุดภาพโดยใช้ค่า Coherence เป็นเกณฑ์ ซึ่งทำให้การประมวลผลได้รับผลกระทบจากจุดภาพที่มีคุณภาพต่ำลดลง นอกจากนี้ภาพถ่ายดาวเทียมเรดาร์ที่ใช้ในการประมวลผลยังให้บริการแบบไม่มีค่าใช้จ่ายและดาวเทียมมีการโคจรมาบันทึกภาพ ณ บริเวณตำแหน่งเดิมที่เป็นระบบ รวมไปถึงการเพิ่มข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อนำไปประมวลผลที่มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน ใช้เวลาประมวลผลไม่นาน

1.1.1 พื้นที่ศึกษา

ลักษณะทางกายภาพบริเวณภาคกลางตอนล่าง เป็นแหล่งเกษตรกรรมที่สำคัญของประเทศไทย พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ราบลุ่ม ลักษณะทางธรณีวิทยา จากหลักฐานของชนิดตะกอนที่มาสสมตัวและลักษณะภูมิประเทศพบว่าประกอบไปด้วยที่ลุ่มชื้นแฉะ ที่ราบลุ่มน้ำท่วมถึง ดินดอนสามเหลี่ยม หาดทรายและสันดอนทราย มีแม่น้ำสายสำคัญคือ แม่น้ำเจ้าพระยาคณะกรรมการบูรณาการนโยบายพัฒนาภาค [10]

ลักษณะทางกายภาพบริเวณภาคตะวันออก เป็นที่ราบภูเขาสูงและมีที่ราบชายฝั่งทะเล มีลักษณะเว้าแหว่งไปตามการกัดเซาะของน้ำทะเลตามธรรมชาติ เป็นแหล่งนิคมอุตสาหกรรมที่ขับเคลื่อนเศรษฐกิจ ลักษณะทางธรณีวิทยา เป็นดินปนทราย ระบายน้ำได้ดี [10]

จากการศึกษาที่ผ่านมาในบริเวณพื้นที่จังหวัดกรุงเทพมหานครและปริมณฑล [11] ที่ติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินด้วยการใช้เทคนิค Persistent Scatter ร่วมกับเทคนิค Small Baseline พบว่าอัตราการทรุดตัวมากที่สุดอยู่ที่อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ และอำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี ประมาณ 30 มิลลิเมตรต่อปี ทางฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาพบอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 10 มิลลิเมตรต่อปีทางทิศเหนือและด้านตะวันออกของกรุงเทพมหานคร 10 – 20 มิลลิเมตรต่อปี นอกจากนั้นยังตรวจพบอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินอย่างรวดเร็วในเขตสะพานสูงและเขตลาดกระบัง หรืออย่างในงานวิจัย [12] ที่ได้ทำการศึกษาตรวจสอบหาอัตราการทรุดตัวในพื้นที่เดียวกัน โดยใช้เทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา พบว่าในพื้นที่สองฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยามีค่าอัตราการทรุดตัวอยู่ในช่วง 0 – 44 มิลลิเมตรต่อปี บริเวณเขตตอนเมืองและสายไหมมีการทรุดตัว 35 – 44 มิลลิเมตรต่อปี และจากการตรวจสอบการทรุดตัวสะสมพบว่าบริเวณตำบลปากน้ำ จังหวัดสมุทรปราการ มีค่าประมาณ 30 เซนติเมตร ทำให้เป็นพื้นที่ที่ควรเฝ้าระวังความเสี่ยงมากที่สุด



รูปที่ 1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล กรอบสีส้ม หมายถึงข้อมูลวงโคจรขาขึ้น, กรอบสีฟ้า หมายถึงข้อมูลวงโคจรขาลง

1.1.2 ชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ใช้ในการประมวลผล

ข้อมูลชุดภาพที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ ข้อมูลภาพ Interferogram ที่ผลิตจากภาพ SAR หรือ Single Look Complex (SLC) จากดาวเทียม Sentinel-1 มีความละเอียดของจุดภาพในทิศแนวบินของดาวเทียม (Azimuth resolution) ประมาณ 20 เมตร และความละเอียดของจุดภาพในทิศตั้งฉากกับแนวบินของดาวเทียม (Range resolution) ประมาณ 4 เมตร อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มีการเฉลี่ยจุดภาพ (Multilooking) ทำให้มี Azimuth resolution ประมาณ 80 เมตร และ Range resolution ประมาณ 80 เมตร ทั้งในวงโคจรขาขึ้น (Ascending) และวงโคจรขาลง (Descending) [13, 14] โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลชุดภาพที่ใช้ในการประมวลผล

พื้นที่	วงโคจร	จำนวนภาพ	จำนวนคู่ภาพ	ช่วงเวลา (วัน/เดือน/ปี)
กรุงเทพมหานคร, ปริมณฑล	ขาขึ้น	169	711	23/03/2017 - 22/12/2022
กรุงเทพมหานคร, ปริมณฑล	ขาลง	219	1778	22/03/2018 - 28/08/2022

2. หลักการและทฤษฎี

2.1 การสูบน้ำบาดาล

เนื่องจากการทรุดตัวของแผ่นดินสามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุและหนึ่งในสาเหตุที่สำคัญคือ การสูบน้ำบาดาลเกินขนาดในพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยน้ำบาดาลเป็นองค์ประกอบในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น เกษตรกรรม โรงงานอุตสาหกรรม อุปโภคและบริโภคในครัวเรือน [15] ในอดีตมีการสูบน้ำจากบ่อน้ำบาดาลขึ้นมาเป็นจำนวนมากทำให้น้ำในชั้นดินลดลงอย่างรวดเร็วส่งผลให้แผ่นดินเกิดการทรุดตัวในหลายพื้นที่ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการตราเป็นกฎหมายขึ้นเรียกว่า พระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่ออนุรักษ์และป้องกันน้ำบาดาลไม่ให้เสียหายและสามารถนำมาใช้ได้อย่างยั่งยืนแต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังคงมีการทรุดตัวอันเนื่องมาจากการขุดเจาะน้ำบาดาลอย่างต่อเนื่อง จากการศึกษาที่ผ่านมาในพื้นที่เมืองอาวกาสกาเลียเนส (Aguascalientes) ประเทศเม็กซิโก [3] ที่มีการสูบน้ำบาดาลที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดความเสี่ยงต่อโครงสร้างสิ่งปลูกสร้างและมีผลกระทบต่อประชากรโดยตรง พบอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินมากกว่า 10 เซนติเมตรต่อปี

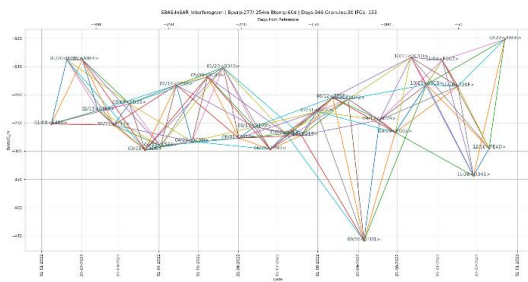
2.2 Time-series InSAR

การใช้เทคนิคอินซาร์เพื่อวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบการทรุดตัวของแผ่นดิน จำเป็นต้องใช้การประมวลผลอินซาร์ในรูปแบบอนุกรมเวลา (Time-series InSAR, TS-InSAR) เพื่อติดตามการทรุดตัวที่มีขนาดเล็กระดับมิลลิเมตรต่อปี เพื่อจัดหรือลดค่าเฟสอื่นๆ จำเป็นจะต้องอาศัยจำนวนภาพในการประมวลผล จากการศึกษาที่ผ่านมา เทคนิค Persistent Scatter เหมาะกับพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นพื้นที่เมืองมากกว่า เนื่องจาก

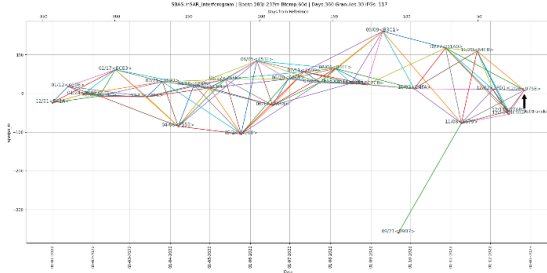
สามารถหาจุดภาพที่มีสัญญาณที่เสถียรหรือหมายถึงจุดภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นดินน้อยได้มากกว่า เช่น หลังคาบ้านเรือน อาคารตึกสูง ซอฟต์แวร์ที่ให้บริการประมวลผลด้วยเทคนิค Persistent Scatter ได้แก่ StaMPS [16] ที่ประมวลผลแบบไม่มีการลดความละเอียดแต่เป็นการเพิ่มต้นทุนในการทำงานและเวลา ซึ่งต่างจากเทคนิค Small Baseline ที่เป็นการประมวลผลโดยไม่ได้นับเฉพาะจุดสัญญาณมีความเสถียรมากแต่จะเป็นการประมวลผลกับจุดภาพโดยรวม โดยอาศัยหลักการการเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio, SNR) ทำให้เทคนิค Small Baseline เหมาะกับการตรวจสอบและติดตามพื้นที่ขนาดใหญ่ เช่น การทรุดตัวของภูเขาไฟแผ่นดินไหว ธารน้ำแข็ง หรือ ดินถล่ม เป็นต้น

2.3 เทคนิค Small Baseline (SB)

ลักษณะเด่นที่สำคัญของเทคนิคนี้ คือจะใช้การจับคู่ภาพ Interferogram ที่มีระยะห่างจุดที่ถ่ายภาพ (Spatial baseline) และระยะเวลา (Temporal baseline) สั้นที่สุด และมีการจับคู่ภาพให้เสมือนมีการวัดซ้ำเพื่อเป็นการเพิ่ม Redundancy ซึ่งทำให้ได้ลักษณะการจับคู่ภาพคล้ายโครงข่าย ดังรูปที่ 2, 3 โดยแกน x หมายถึงวันที่ทำการบันทึกข้อมูล, แกน y หมายถึงระยะห่างของการถ่ายภาพในหน่วยเมตร, จุดหมายถึงภาพ Interferogram และเส้นเชื่อม หมายถึงการจับคู่ของภาพ Interferogram



รูปที่ 2 การจับคู่ภาพของเทคนิค Small Baseline บริเวณพื้นที่ศึกษา
ชุดภาพวงโคจรขาขึ้น ยกตัวอย่างปี ค.ศ. 2022



รูปที่ 3 การจับคู่ภาพของเทคนิค Small Baseline บริเวณพื้นที่ศึกษา
ชุดภาพวงโคจรขาลง ยกตัวอย่างปี ค.ศ. 2022

การจับคู่กันด้วยวิธีนี้จะช่วยลดความแตกต่างของเวลาและค่ามุมการถ่ายภาพทำให้สัญญาณรบกวนที่ไม่มีค่าสหสัมพันธ์กัน (Decorrelation noise) ลดลงด้วยเช่นกัน เพื่อเป็นการรักษาค่า Coherence ที่เป็นดัชนี

บอกคุณภาพข้อมูลให้อยู่ในระดับสูง และในทางทฤษฎีหลักการนี้จะมีขั้นตอนการเฉลี่ยจุดภาพ (Multilooking) หรือ การทำ Downsampling ข้อมูลภาพถ่ายเพื่อเป็นการเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio, SNR) โดยอาศัยสมมติฐานที่ว่าจุดภาพข้างเคียงกันที่นำมาหาค่าเฉลี่ยมีลักษณะการทรุดตัวที่คล้ายกัน เพราะฉะนั้นในการประมวลผลประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องประมวลผลเฉพาะจุดภาพที่เป็นโครงสร้างเมือง ซอฟต์แวร์ที่ให้บริการประมวลผลด้วยวิธี Small Baseline เช่น LiCSBAS [17], MintPy เป็นต้น

2.4 ระบบภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1

การประมวลผลภาพอินซาร์ในวิจัยนี้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 ที่ให้บริการโดย European Space Agency (ESA) ที่บันทึกภาพในย่านความถี่ C-band ช่วงความถี่ 5.045 กิกะเฮิรตซ์ โคจรรอบโลกในวงโคจรใกล้ขั้วโลก (Near-orbit satellite) มีระบบบันทึกภาพแบบแนวฝั่งขวาของดาวเทียม (Right-looking) ดาวเทียม Sentinel-1 มีรูปแบบการบันทึกข้อมูล 4 ลักษณะ ได้แก่ Strip Map Mode (SM), Interferometric Wide Swath Mode (IW), Extra Wide Swath Mode (EM), Wave Mode (WV) [14] ประกอบด้วย Sentinel-1A และ Sentinel-1B ใช้ระบบการโคจรเดียวกัน

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมข้อมูลสำหรับการประมวลผลและขั้นตอนการประมวลผล

3.1 การเตรียมข้อมูลก่อนการประมวลผล

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้บริการทางอินเทอร์เน็ตของ ASF (Alaska SAR Facility) และเป็นภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-1 โดยจะต้องมีการลงทะเบียนเข้าสู่ระบบ NASA EARTHDATA จากนั้นส่งประมวลผลโดยต้องระบุเงื่อนไข แล้วทำการเลือกคู่ภาพตามเงื่อนไขวันที่บันทึกภาพ Perpendicular Baseline และ Temporal Baseline จึงสามารถดาวน์โหลดชุดภาพ Interferogram ซึ่งในงานวิจัยเลือกใช้ภาพบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล วงโคจรขาขึ้นจำนวน 169 ภาพ จับคู่ภาพได้ทั้งหมด 711 คู่ และชุดภาพในวงโคจรขาลง 219 ภาพ จับคู่ภาพได้ 1778 คู่ ใช้ในการประมวลผลหาการทรุดตัวของแผ่นดินรูปแบบอนุกรมเวลา

3.2 การประมวลผล

ซอฟต์แวร์สำหรับใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ คือ The Miami INsar Time-series software in PYTHON (MintPy) [8, 9] เป็นซอฟต์แวร์ที่ไม่มีค่าใช้จ่าย โดยมีจุดประสงค์เฉพาะเพื่อใช้ในการประมวลผลอนุกรมเวลาของข้อมูลชุดภาพ Interferogram (Time-series InSAR analysis) โดยซอฟต์แวร์ถูกพัฒนาขึ้นโดยอ้างอิงกับภาษาไพทอน (Python) เป็นหลัก การประมวลผลของซอฟต์แวร์ MintPy ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน [18] ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล Unwrapped Interferograms จะเป็นการดาวน์โหลด

โพลิติคข้อมูลทางลักษณะต่างๆ เช่น มุมตกกระทบ ระยะห่างการถ่ายภาพ ค่า Coherence ข้อมูลทางตำแหน่ง เป็นต้น เพื่อเตรียมใช้สำหรับการประมวลผลในขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนการคำนวณหาการทรุดตัวแบบอนุกรมเวลา ซึ่งจะประกอบไปด้วยการตรวจสอบและประเมินคุณภาพของโครงข่าย Interferogram การเลือกจุดอ้างอิง (Reference point) ที่กำหนดให้ค่าการทรุดตัว ณ ตำแหน่งนั้นๆ เท่ากับศูนย์ รวมไปถึงมีการตัดจุดภาพที่มีปัญหาจากนั้นคำนวณหาค่าการทรุดตัวแบบอนุกรมเวลาแต่ค่าการทรุดตัวที่ได้จะยังคงมีค่าคลาดเคลื่อนปะปนอยู่จึงจำเป็นต้องขจัดออกในขั้นตอนถัดไป

ขั้นตอนการจัดความคลาดเคลื่อนจากแหล่งที่มาต่างๆ เช่น ค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากวงโคจรดาวเทียม ค่าคลาดเคลื่อนจากลักษณะภูมิประเทศ เป็นต้น แล้วได้ผลลัพธ์สุดท้ายเป็นค่าอัตราการทรุดตัวแบบอนุกรมเวลาและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในหน่วยเซนติเมตรต่อปี

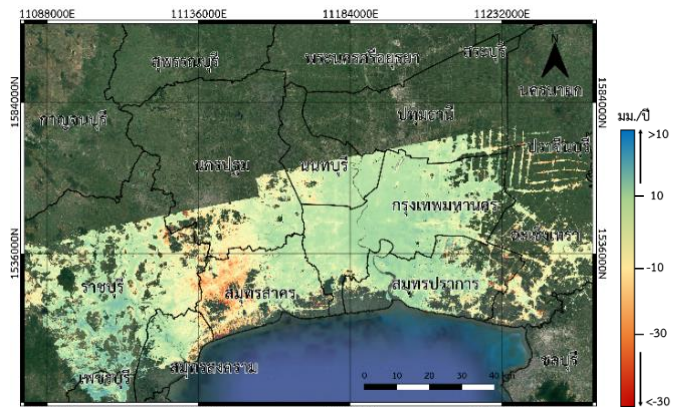
4. ผลลัพธ์

4.1 ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล

ผลลัพธ์ค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินที่ได้จากการประมวลผลด้วยวิธี Small Baseline บริเวณพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลจัดแสดงผลลัพธ์ผ่านทางโปรแกรม QGIS บนแผนที่หลัก Google Satellite ในชุดภาพวงโคจรขาขึ้น ระยะเวลาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2017 - 2022 ดังในรูปที่ 4 และในชุดภาพวงโคจรขาลง ระหว่างปี ค.ศ. 2018 - 2022 ดังรูปที่ 5 ในภาพรวมผลลัพธ์ค่อนข้างคงที่ แต่มีในบางพื้นที่ที่พบค่าอัตราการทรุดตัวมากกว่า 30 มิลลิเมตรต่อปี โดยสีแดง หมายถึงลักษณะของแผ่นดินที่เคลื่อนที่ห่างจากดาวเทียมซึ่งในบริเวณพื้นที่ศึกษาสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่ามาจากการทรุดตัว ไหลระดับไปจนถึงสิ้นน้ำเงิน หมายถึงลักษณะของแผ่นดินที่เคลื่อนที่เข้าใกล้ดาวเทียมหรือหมายถึงบริเวณที่มีการทรุดตัวเล็กน้อย ในขั้นตอนการประมวลผลทั้งสองชุดข้อมูลขาขึ้นและขาลง กำหนดจุดอ้างอิงที่สถานี CUSV ละติจูด $13^{\circ} 44' 9.2898''$ ลองจิจูด $100^{\circ} 32' 2.1228''$ ตั้งอยู่บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หรือหมายถึงการกำหนดให้พื้นที่บริเวณนั้นมีค่าการทรุดตัวเท่ากับศูนย์ จากผลลัพธ์จากข้อมูลทั้งสองชุดภาพที่มีการบันทึกภาพและประมวลผลเป็นอิสระต่อกัน จะสังเกตได้ว่าชุดข้อมูลทั้งสองมีความสอดคล้องและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้ค่าอัตราการทรุดตัวที่ได้มีความน่าเชื่อถือแต่มีความแตกต่างเล็กน้อยในบางพื้นที่ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากค่าคลาดเคลื่อนที่ปะปนเข้ามา, ทิศทางการมองของดาวเทียม, สภาพอากาศขณะบันทึกภาพ

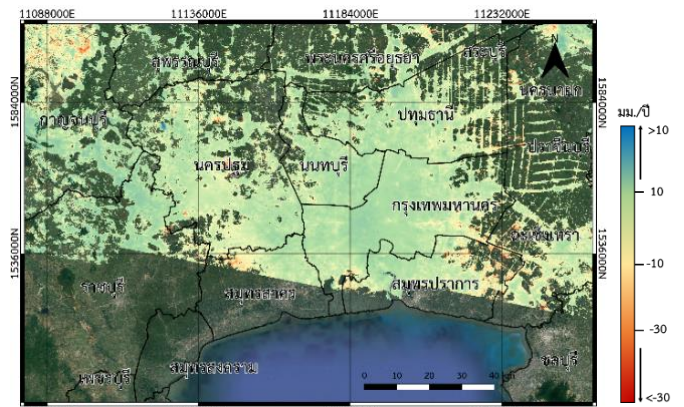
ซึ่งซอฟต์แวร์ MintPy ที่ใช้ในการประมวลผลมีการตรวจสอบคุณภาพของผลลัพธ์ซึ่งสัมพันธ์กับค่า Coherence โดยจะมีการตัดจุดภาพที่มีค่าเฉลี่ย Coherence ต่ำออก โดยผลลัพธ์แสดงจุดข้อมูลการทรุดตัวของแผ่นดิน ในวงโคจรขาขึ้นทั้งหมด 898,466 จุด และในวงโคจรขาลงทั้งหมด 2,282,084 จุด ซึ่งเมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้จะพบว่ามีความหนาแน่นของจุดข้อมูลมากในพื้นที่ที่มีความเป็นเมือง เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีค่า

Coherence สูงต่างจากพื้นที่ปริมณฑลและบริเวณโดยรอบอื่นๆ ที่มีค่า Coherence ต่ำ ทำให้พบจุดข้อมูลจำนวนน้อยกว่า



รูปที่ 4 ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินที่ประมวลผลได้จากซอฟต์แวร์

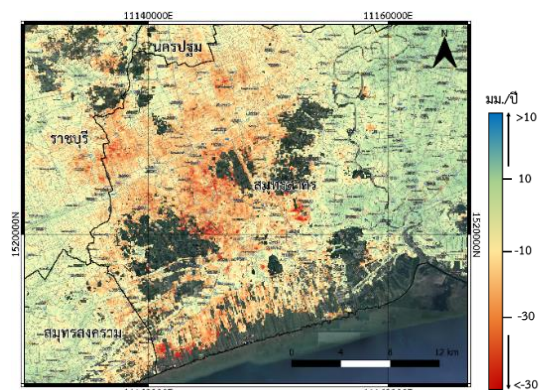
MintPy ชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น



รูปที่ 5 ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินที่ประมวลผลได้จากซอฟต์แวร์

MintPy ชุดข้อมูลวงโคจรขาลง

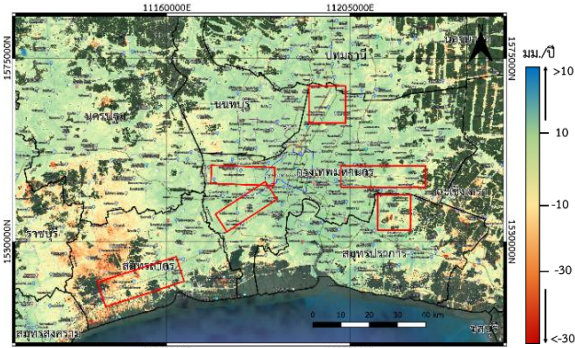
จากการติดตามผลลัพธ์การทรุดตัวพบบริเวณจังหวัดสมุทรสาคร มีแนวโน้มอัตราการทรุดตัวสูง ดังรูปที่ 6 อาจเนื่องมาจากสาเหตุที่พื้นที่เป็นนิคมอุตสาหกรรมซึ่งประกอบไปด้วยโรงงานหลายแห่ง มีการก่อสร้างทางหลวงพิเศษและเป็นพื้นที่ที่มีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น ทำให้ควรมีการติดตามและเฝ้าระวังพื้นที่บริเวณนี้อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 6 ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน จ.สมุทรสาคร ชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้น

4.2 ตัวอย่างพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินสูง

ในงานวิจัยได้มีการตรวจสอบและคัดเลือกพื้นที่ที่มีแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินสูงในบริเวณกรุงเทพมหานคร โดยแสดงข้อมูล 7 พื้นที่จากชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและวงโคจรขาลงในบริเวณเดียวกัน ได้แก่ สนามบิน 2 พื้นที่ เส้นถนน 4 พื้นที่ นิคมอุตสาหกรรมและถนน 1 พื้นที่ ดังในรูปที่ 7



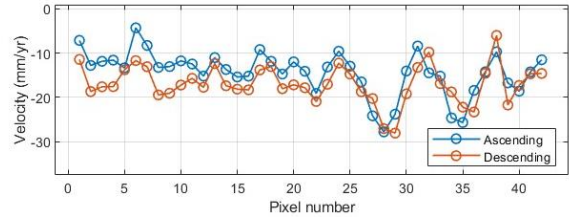
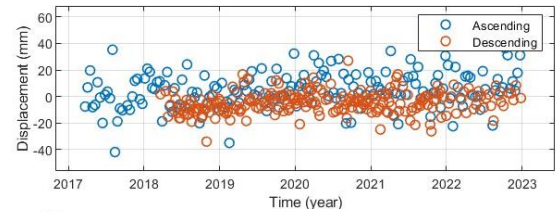
รูปที่ 7 ผลลัพธ์อัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน โดยกรอบสีแดง หมายถึงพื้นที่ตัวอย่างที่มีการทรุดตัวของแผ่นดินสูง

โดยในแต่ละพื้นที่ที่กำหนดรัศมีออกไป 300 เมตรแล้วทำการเฉลี่ยค่าจุดข้อมูล จัดแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบกราฟเพื่อให้สะดวกต่อการเข้าใจ ประกอบด้วยกราฟการทรุดตัวเฉลี่ยของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (Displacement) หน่วยมิลลิเมตร โดยแกน x หมายถึงเวลา, แกน y หมายถึงค่าการทรุดตัว, จุดสีน้ำเงิน หมายถึงผลลัพธ์จากข้อมูลวงโคจรขาขึ้น, จุดสีส้ม หมายถึงผลลัพธ์จากข้อมูลวงโคจรขาลง และกราฟเปรียบเทียบของค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดิน (Velocity) หน่วยมิลลิเมตรต่อปี โดยแกน x หมายถึงลำดับจุดภาพซึ่งเป็นจุดที่มีค่าพิกัดตำแหน่งเดียวกันทั้งในสองวงโคจร, แกน y หมายถึงค่าอัตราการทรุดตัวของแต่ละจุดภาพ, จุดสีน้ำเงิน หมายถึงผลลัพธ์จากข้อมูลวงโคจรขาขึ้น, จุดสีส้ม หมายถึงผลลัพธ์จากข้อมูลวงโคจรขาลง

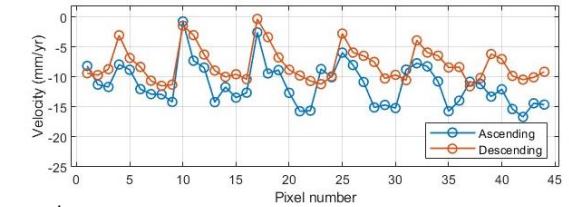
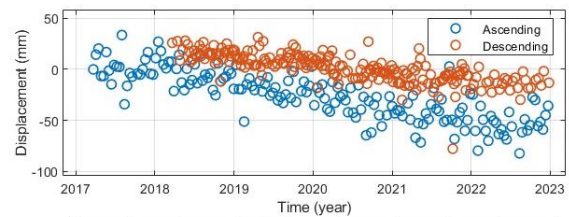
4.2.1 สนามบินสุวรรณภูมิ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ

การติดตามการทรุดตัวในอาคารผู้โดยสารของสนามบินสุวรรณภูมิ พบว่ามีการทรุดตัวที่ค่อนข้างคงที่ ในวงโคจรขาขึ้นมีการทรุดตัวของแผ่นดินอยู่ที่ประมาณ 11 มิลลิเมตรและผลลัพธ์แสดงค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1 ถึง 4 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนในวงโคจรขาลงมีการทรุดตัวอยู่ที่ประมาณ 14.5 มิลลิเมตรและค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยของแผ่นดินอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 3 มิลลิเมตรต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 8

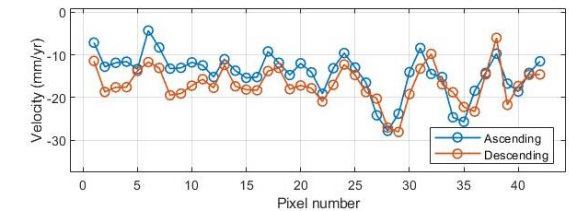
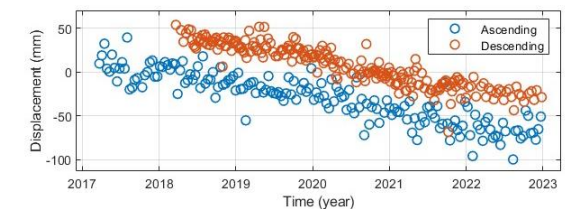
ส่วนบริเวณรันเวย์สนามบินมีแนวโน้มการทรุดตัวอย่างต่อเนื่อง ในวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินอยู่ที่ประมาณ 59 มิลลิเมตร ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0 ถึง 17 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 40 มิลลิเมตรและมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 12 มิลลิเมตรต่อปี ดังรูปที่ 9 สาเหตุที่ค่าการทรุดตัวสูงอาจเพราะบริเวณพื้นที่รันเวย์มีการบินขึ้นและบินลงของเครื่องบินอยู่ตลอดเวลา ในขณะที่บริเวณอาคารผู้โดยสารมีแนวโน้มการทรุดตัวที่น้อยกว่าเนื่องจากเป็นอาคารทำให้มีการฝังโครงสร้างในชั้นดินที่ลึก



รูปที่ 8 กราฟการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) และกราฟอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย (มม./ปี) อาคารผู้โดยสาร สนามบินสุวรรณภูมิ



รูปที่ 9 กราฟการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) และกราฟอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย (มม./ปี) รันเวย์สนามบินสุวรรณภูมิ

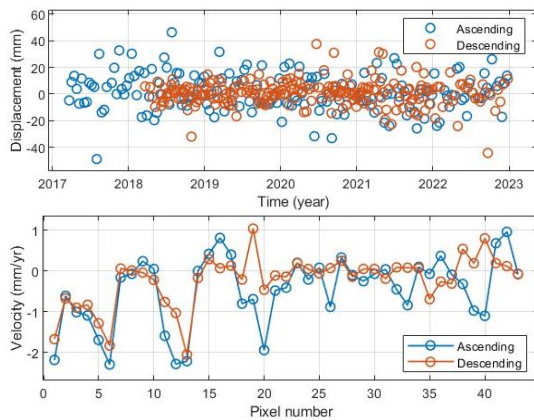


รูปที่ 10 กราฟการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) และกราฟอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย (มม./ปี) พื้นที่ภายในสนามบินสุวรรณภูมิ

นอกจากนี้ยังตรวจพบพื้นที่ที่มีค่าอัตราการทรุดตัวสูงที่สุดภายในสนามบินสุวรรณภูมิ ซึ่งมีค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 84 มิลลิเมตร และพบค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยตั้งแต่ 4 ถึง 28 มิลลิเมตรต่อปี ในวงโคจรขาขึ้น ในขณะที่วงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 82 มิลลิเมตร ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยในช่วง 6 ถึง 28 มิลลิเมตรต่อปี ดังรูป 10

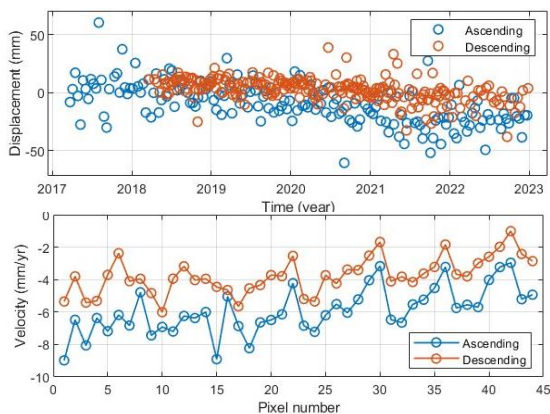
4.2.2 สนามบินดอนเมือง เขตดอนเมือง จังหวัดกรุงเทพมหานคร

พื้นที่สนามบินดอนเมืองพบข้อมูลส่วนใหญ่มีแนวโน้มการทรุดตัวไปในทิศทางเดียวกัน แต่ในจุดข้อมูลของสนามบินดอนเมืองถูกตัดออกไปจำนวนหนึ่งซึ่งมีสาเหตุจากการได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าคลาดเคลื่อนที่ปะปนเข้ามาหรือเป็นบริเวณที่มีค่า Coherence ต่ำ ทำให้ในงานวิจัยเลือกพื้นที่ที่กองบัญชาการกองทัพอากาศที่อยู่ภายในสนามบินดอนเมือง ในวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวอยู่ที่ 16 มิลลิเมตรและค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนในวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวอยู่ที่ 14 มิลลิเมตรและค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 2 มิลลิเมตรต่อปี ดังในรูปที่ 11



รูปที่ 11 กราฟการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) และกราฟอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย (มม./ปี) กองบัญชาการกองทัพอากาศ ดอนเมือง

ส่วนในพื้นที่บริเวณรันเวย์สนามบินดอนเมือง ในวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 21 มิลลิเมตร ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยตั้งแต่ 3 ถึง 9 มิลลิเมตรต่อปี และในวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 22 มิลลิเมตร มีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 1 ถึง 6 มิลลิเมตรต่อปี ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งถ้าหากเปรียบเทียบกับสนามบินสุวรรณภูมิถือว่าพบการทรุดตัวที่น้อยกว่า

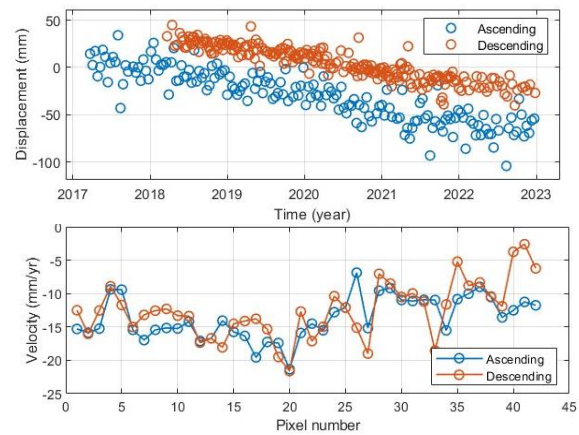


รูปที่ 12 กราฟการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) และกราฟอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย (มม./ปี) รันเวย์สนามบินดอนเมือง

4.2.3 ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า เขตสะพานสูง จังหวัด

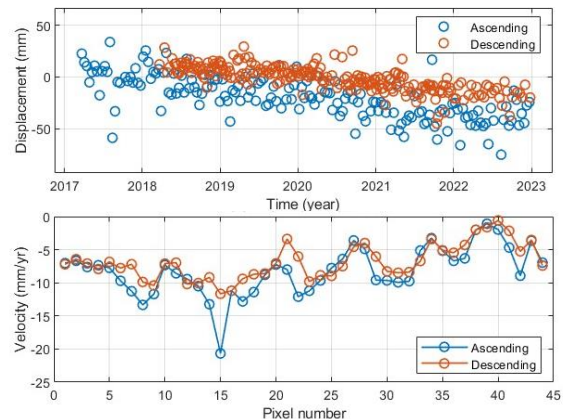
กรุงเทพมหานคร

ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า เป็นถนนในพื้นที่เขตสะพานสูง กรุงเทพมหานครฝั่งตะวันออก มีการก่อสร้างปรับปรุงและขยายถนน เปิดใช้เมื่อปี ค.ศ. 2019 ซึ่งจากผลลัพธ์ในวงขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 88 มิลลิเมตรและมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 7 ถึง 22 มิลลิเมตรต่อปี ในขณะที่วงขาลงมีค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 56 มิลลิเมตร ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยระหว่าง 2 ถึง 22 มิลลิเมตรต่อปี ดังในรูปที่ 13



รูปที่ 13 กราฟการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) และกราฟอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย (มม./ปี) ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า

นอกจากนี้พบบริเวณที่มีแนวโน้มการทรุดตัวสูงที่สุดโดยในข้อมูลวงโคจรขาขึ้นมีค่าการทรุดตัวของแผ่นดินอยู่ที่ประมาณ 67 มิลลิเมตร ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยของแผ่นดินประมาณ 1 ถึง 21 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนในข้อมูลวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินอยู่ที่ประมาณ 38 มิลลิเมตร ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยตั้งแต่ 1 ถึง 12 มิลลิเมตรต่อปี ดังรูปที่ 14 เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่ตั้งอยู่ใกล้กับนิคมอุตสาหกรรมลาดกระบังรวมถึงมีโครงการบ้านจัดสรรเป็นจำนวนมากในพื้นที่นี้ซึ่งอาจส่งผลให้มีแนวโน้มการทรุดตัวสูง

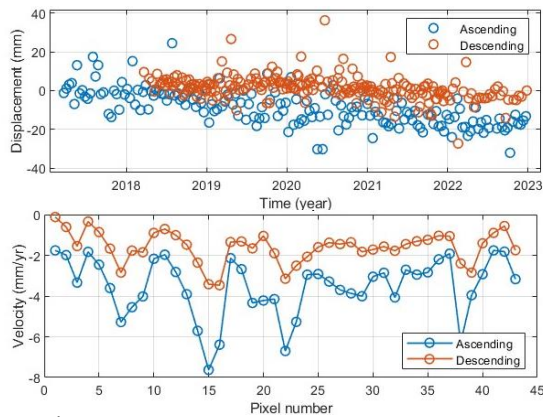


รูปที่ 14 กราฟการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) และกราฟอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย (มม./ปี) พื้นที่การทรุดตัวสูงถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า

4.2.4 ถนนกัลปพฤกษ์ เขตจอมทองและเขตบางแค จังหวัด

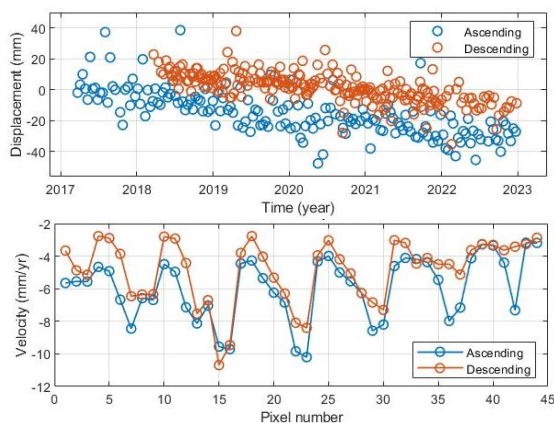
กรุงเทพมหานคร

ถนนกัลปพฤกษ์ตั้งอยู่บริเวณฝั่งธนบุรี เชื่อมโยงผ่านหลายเขตในพื้นที่ กรุงเทพมหานคร จากการพิจารณาพบว่าการทรุดตัวของถนนกัลปพฤกษ์ที่น่าสนใจส่วนใหญ่อยู่ในเขตจอมทองและเขตบางแค โดยจากผลลัพธ์ดังรูปที่ 15 ในวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวประมาณ 20 มิลลิเมตร ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 2 ถึง 8 มิลลิเมตรต่อปี ในวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวประมาณ 15 มิลลิเมตร ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0 ถึง 4 มิลลิเมตรต่อปี



รูปที่ 15 กราฟการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) และกราฟอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย (มม./ปี) ถนนกัลปพฤกษ์

นอกจากนี้ยังพบแนวโน้มการทรุดตัวสูงในบริเวณจุดเชื่อมต่อตัดกับถนนกาญจนาภิเษก ในวงโคจรขาขึ้นตรวจพบค่าการทรุดตัวประมาณ 37 มิลลิเมตร ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยระหว่าง 3 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนในวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 32 มิลลิเมตร ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3 ถึง 11 มิลลิเมตรต่อปี ดังในรูปที่ 16

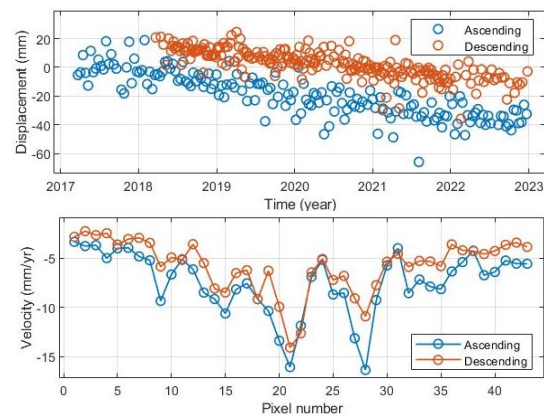


รูปที่ 16 กราฟการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) และกราฟอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย (มม./ปี) จุดเชื่อมต่อตัดกับถนนกาญจนาภิเษก

4.2.5 ถนนพราณนก-พุทธมณฑลสาย 4 เขตตลิ่งชันและเขตทวีวัฒนา

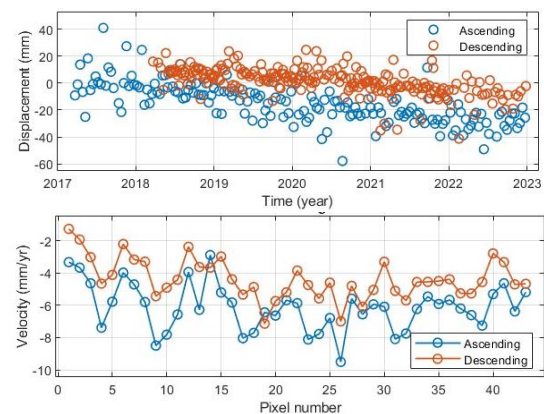
จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ถนนพราณนก-พุทธมณฑลสาย 4 ตั้งอยู่ระหว่างเขตตลิ่งชันและเขตทวีวัฒนา เป็นถนนตัดใหม่ในพื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดนครปฐม โดยต่อขยายจากถนนพราณนก พื้นที่ที่มีการทรุดตัวสูงสุดตรวจพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 25 มิลลิเมตร ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3 ถึง 16 มิลลิเมตรต่อปี ในวงโคจรขาขึ้น และพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 28 มิลลิเมตร ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2 ถึง 14 มิลลิเมตรต่อปี ในวงโคจรขาลง จากรูปที่ 17 จะเห็นได้ว่ายังมีแนวโน้มการทรุดตัวอย่างต่อเนื่องซึ่งส่วนใหญ่เป็นพื้นที่โครงการที่อยู่อาศัยร้านค้าและพื้นที่สำหรับเกษตรกรรม



รูปที่ 17 กราฟการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) และกราฟอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย (มม./ปี) ถนนพราณนก-พุทธมณฑลสาย 4

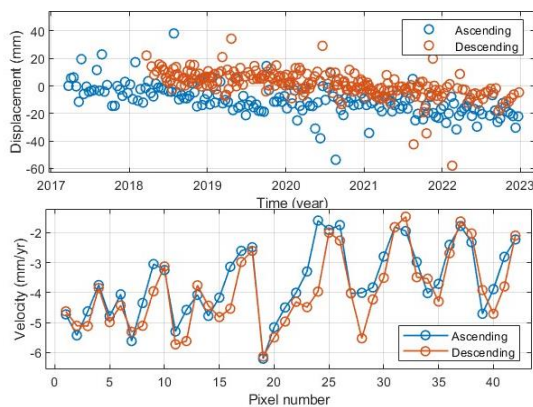
ส่วนบริเวณทางแยกยกระดับตัดกับถนนบรมราชชนนี ข้อมูลวงโคจรขาขึ้นตรวจพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินประมาณ 29 มิลลิเมตร ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ประมาณ 3 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนข้อมูลวงโคจรขาลงพบค่าการทรุดตัวประมาณ 31 มิลลิเมตรและค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 7 มิลลิเมตรต่อปี เนื่องจากเป็นถนนที่มีโครงการหมู่บ้านจัดสรรตลอดทั้งสองฝั่งถนนและมีรถสัญจรอยู่ตลอดเวลาจึงควรมีการติดตามและเฝ้าระวังโครงสร้างถนนสายนี้ ดังแสดงในรูปที่ 18



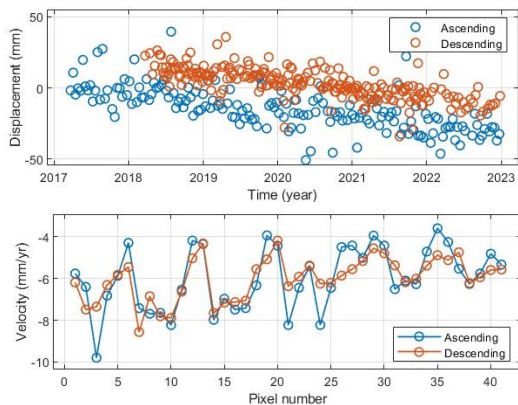
รูปที่ 18 กราฟการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) และกราฟอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย (มม./ปี) ทางแยกยกระดับถนนพราณนก-พุทธมณฑลสาย 4

4.2.6 ย่านศูนย์การค้าและถนนพระราม 2 เขตบางขุนเทียน จังหวัด กรุงเทพมหานคร

อีกพื้นที่ที่ควรมีการติดตามคือ เขตบางขุนเทียน จังหวัด กรุงเทพมหานครติดกับจังหวัดสมุทรสาครเพราะเป็นพื้นที่ติดชายฝั่งทะเล ย่านศูนย์การค้าพระราม 2 ดังรูปที่ 19 ข้อมูลวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวประมาณ 22 มิลลิเมตร ค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2 ถึง 6 มิลลิเมตรต่อปี และข้อมูลวงโคจรขาหลงตรวจพบค่าการทรุดตัวของแผ่นดินอยู่ที่ 20 มิลลิเมตร มีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยประมาณ 2 ถึง 6 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งเมื่อพิจารณากราฟการทรุดตัวจะเห็นว่ามีความโน้มการทรุดตัวอย่างช้าๆ เนื่องจากเป็นโครงสร้างอาคารขนาดใหญ่ทำให้มีการวางฐานรากที่มั่นคง



รูปที่ 19 กราฟการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) และกราฟอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย (มม./ปี) ถนนพระราม 2



รูปที่ 20 กราฟการทรุดตัวของแผ่นดินแบบอนุกรมเวลา (มม.) และกราฟอัตราการทรุดตัวเฉลี่ย (มม./ปี) ถนนพระราม 2

นอกจากนี้ บริเวณถนนพระราม 2 แยกทางต่างระดับบางขุนเทียน ข้อมูลวงโคจรขาขึ้นพบค่าการทรุดตัวที่ประมาณ 35 มิลลิเมตรและมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ 4 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อปี ข้อมูลวงโคจรขาหลงมีค่าการทรุดตัวอยู่ที่ประมาณ 30 มิลลิเมตรและมีค่าอัตราการทรุดตัวเฉลี่ยอยู่ประมาณ 3 ถึง 9 มิลลิเมตรต่อปี ดังรูปที่ 20 เมื่อดูภาพรวมในกราฟค่าการทรุดตัวจะเห็นว่ามีความถี่ของการทรุดตัวมากขึ้นและยังคงมีทิศทางการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการสัญจรของ

รถบรรทุกขนาดใหญ่ รวมไปถึงเป็นตัวเมืองที่มีโครงการหมู่บ้าน ร้านค้าอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงควรมีการติดตามและเฝ้าระวังการทรุดตัว

4.3 การหาความสัมพันธ์ของข้อมูลการทรุดตัวของแผ่นดินที่ได้จากเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา

เนื่องจากข้อมูลการทรุดตัวของแผ่นดินที่ได้จากการประมวลผลเป็นข้อมูลเชิงปริมาณรวมไปถึงเป็นข้อมูลชนิดต่อเนื่องกล่าวคือเกิดจากการรังวัดและมีความถี่ที่มีจุดทศนิยม ทำให้การหาระดับความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลในวงโคจรขาขึ้นและข้อมูลวงโคจรขาหลงโดยที่ชุดข้อมูลทั้งสองมีความเป็นอิสระต่อกันด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ดังสมการที่ (1) โดยผลลัพธ์จากการคำนวณจะถูกนำมาใช้อธิบายทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร มีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง +1

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (1)$$

โดยที่ r หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์, x คือค่าอัตราการทรุดตัวของข้อมูลวงโคจรขาขึ้น, $\bar{x}$ คือค่าเฉลี่ยของค่าอัตราการทรุดตัวของข้อมูลวงโคจรขาขึ้น, y คือค่าอัตราการทรุดตัวของข้อมูลวงโคจรขาหลง และ $\bar{y}$ คือค่าเฉลี่ยของค่าอัตราการทรุดตัวของข้อมูลวงโคจรขาหลง

ผลลัพธ์จากการคำนวณหาความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลในบริเวณพื้นที่ที่มีความโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินสูงทั้งหมด 13 จุด ดังตารางที่ 2 และเมื่อพิจารณาภาพรวมพบว่าค่าสหสัมพันธ์อยู่ในช่วงระหว่าง 0.60 – 0.90 ซึ่งหมายความว่าข้อมูลค่าอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินของทั้งสองชุดข้อมูลมีความสอดคล้องกันจึงสนับสนุนได้ว่ามีการทรุดตัวเกิดขึ้นจริง แต่ในบางพื้นที่ที่ผลลัพธ์ไม่สอดคล้องกันอาจมีสาเหตุจากมุมมองดาวเทียมหรือค่าคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศเนื่องจากทั้งสองชุดข้อมูลเก็บคนละช่วงเวลากัน โดยพื้นที่ที่มีความสัมพันธ์กันของข้อมูลมากที่สุดคือบริเวณถนนพหลโยธิน-กาญจนภิเษก มีค่าเท่ากับ 0.9154 รองลงมาคือถนนกัลปพฤกษ์ มีค่าเท่ากับ 0.8861

ตารางที่ 2 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างชุดข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและชุดข้อมูลวงโคจรขาหลง (r) บริเวณพื้นที่ที่มีความโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินสูง

ลำดับ	พื้นที่ที่มีความโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินสูง	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างวงโคจรขาขึ้นและวงโคจรขาหลง (r)	n
1	สนามบินสุวรรณภูมิ 1	0.8459	45
2	สนามบินสุวรรณภูมิ 2	0.7252	44
3	สนามบินสุวรรณภูมิ 3	0.7695	42
4	สนามบินดอนเมือง 1	0.6746	43
5	สนามบินดอนเมือง 2	0.7878	44
6	ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า 1	0.6086	42
7	ถนนศรีนครินทร์-ร่มเกล้า 2	0.8214	44
8	ถนนกัลปพฤกษ์ 1	0.8861	43
9	ถนนกัลปพฤกษ์ 2	0.8619	44
10	ถนนพหลโยธิน-กาญจนภิเษก 1	0.9154	43
11	ถนนพหลโยธิน-กาญจนภิเษก 2	0.7633	43
12	ย่านศูนย์การค้า พระราม 2	0.8712	42
13	ถนนพระราม 2	0.8149	42

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลจากการประมวลผลข้อมูลด้วยเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลา วิธี Small Baseline ประกอบด้วยชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในวงโคจรขาขึ้น (Ascending) จำนวน 169 ภาพ ในช่วงระยะเวลา 23 มีนาคม 2017 ถึง 22 ธันวาคม 2022 และชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในวงโคจรขาลง (Descending) จำนวน 219 ภาพ ช่วงระหว่าง 22 มีนาคม 2018 ถึง 28 สิงหาคม 2022 โดยใช้ซอฟต์แวร์ MintPy ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดในเรื่องของความซับซ้อนของขั้นตอนการประมวลผล ลดเวลาการทำงานและลดทรัพยากรในการจัดเก็บข้อมูล นอกจากนี้ภาพถ่ายดาวเทียมเรดาร์ที่ใช้ในการประมวลผลยังให้บริการแบบไม่มีค่าใช้จ่ายและดาวเทียมมีการโคจรมาบันทึกภาพ ณ บริเวณตำแหน่งเดิมที่เป็นระบบและดาวเทียมเรดาร์ยังมีแผนการทำงานในอนาคตอย่างต่อเนื่อง รวมไปถึงการประมวลผลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ขั้นตอนไม่ซับซ้อน ใช้เวลาประมวลผลไม่นาน ทำให้ขั้นตอนการปฏิบัติงานในงานวิจัยนี้เป็นหนึ่งในทางเลือกเพื่อใช้ในการตรวจสอบการทรุดตัวของประเทศไทยอย่างเป็นระบบในอนาคต

ผลการศึกษาพบจุดข้อมูลทั้งหมด 898,466 จุด ในชุดภาพวงโคจรขาขึ้น และ 2,282,084 จุด ในชุดภาพวงโคจรขาลง ในภาพรวมผลลัพธ์ค่อนข้างคงที่ แต่ในบางพื้นที่ที่พบค่าอัตราการทรุดตัวมากกว่า 30 มิลลิเมตรต่อปี จากภาพรวมผลลัพธ์จะเห็นว่ามีความแม่นยำและรูปแบบที่สอดคล้องกันแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล เมื่อพิจารณาพร้อมกับงานวิจัยก่อนหน้าในพื้นที่ศึกษาเดียวกันพบว่าค่าอัตราการทรุดตัวใกล้เคียงกันแต่ในบางพื้นที่พบค่าอัตราการทรุดตัวลดลง นอกจากนี้ยังตรวจพบพื้นที่ที่มีอัตราการทรุดตัวสูงและมีแนวโน้มการทรุดตัวอย่างต่อเนื่อง อย่างเช่น สนามบินสุวรรณภูมิ จังหวัดสมุทรปราการ, นิคมอุตสาหกรรมสมุทรสาครและถนนพระราม 2 จังหวัดสมุทรสาคร เป็นต้น ดังนั้นจึงควรมีการเฝ้าระวัง ติดตามโครงสร้างทั้งอาคารและถนน เพื่อเตรียมตัวรับมือเหตุการณ์ในอนาคตที่อาจเกิดขึ้นได้

จากผลจากการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลการทรุดตัวที่ได้จากเทคนิคอินซาร์แบบอนุกรมเวลาสามารถอธิบายได้ว่าชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในวงโคจรขาขึ้นมีความสอดคล้องกับชุดข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในวงโคจรขาลงจึงสามารถสนับสนุนว่ามีการทรุดตัวเกิดขึ้นจริง แต่ในบางพื้นที่ อย่างเช่น พื้นที่ที่ไม่ใช่เมือง (Rural Area) ยังพบการขาดหายของข้อมูลการทรุดตัวซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากค่าคลาดเคลื่อนที่ปะปนเข้ามา, มุมมองการถ่ายภาพดาวเทียม, สภาพอากาศขณะทำการบันทึกภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

การประมวลผลข้อมูลอินซาร์ในงานวิจัยใช้ความละเอียด 80 เมตร ทำให้รูปแบบผลลัพธ์ที่ได้เป็นในเชิงพื้นที่ เหมาะแก่การใช้ติดตามและเฝ้าระวังการทรุดตัวของแผ่นดิน ซึ่งในงานวิจัยเป็นการตรวจสอบและติดตามค่าการทรุดตัวของแผ่นดินโดยการพิจารณาจากผลลัพธ์เพียง 2 ชุดข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลวงโคจรขาขึ้นและข้อมูลวงโคจรขาลง แต่ถ้าหากนำผลลัพธ์ที่ได้มา

พิจารณาร่วมกับข้อมูลทางภูมิศาสตร์อื่นๆ อาจสามารถระบุสาเหตุและแนวโน้มการทรุดตัวของแผ่นดินอย่างละเอียดได้ เช่น ข้อมูลความหนาแน่นประชากร ข้อมูลจุดอ่อนน้ำท่วม ข้อมูลธรณีวิทยา ข้อมูลธรณีสัณฐาน เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณองค์การอวกาศยุโรป (European Space Agency, ESA) สำหรับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2017 – 2022 ดาวินโหลต ข้อมูลเมื่อวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2023 และขอขอบคุณ Zhang Yunjun สำหรับซอฟต์แวร์ MintPy เพื่อการประมวลผลอินซาร์แบบอนุกรมเวลา เทคนิค Small Baseline

เอกสารอ้างอิง

- [1] Aroonsrimorakot, S., *COASTAL LAND SUBSIDING AND EROSION OF UPPER GULF OF THAILAND*. Suthiparithat, 2020, pp. 153–167.
- [2] สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎรและปฏิบัติหน้าที่สำนักงานเลขาธิการสภาปฏิรูปแห่งชาติ, วาระปฏิรูปที่ ๒๗ : การปฏิรูปเพื่อรับมือวิกฤตการณ์น้ำทะเลขึ้นสูงและแผ่นดินทรุดพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล. ISBN : 978-616-399-006-8, 2558. 25.
- [3] Cigna, F., R. Esquivel Ramirez, and D. Tapete, *Accuracy of Sentinel-1 PSI and SBAS InSAR Displacement Velocities against GNSS and Geodetic Leveling Monitoring Data*. Remote Sensing, 2021. 13(23).
- [4] สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) (2563). *โครงข่ายสถานีอ้างอิง ค่าพิทัก ค่าระดับและเวลามาตรฐานประเทศไทย แบบปรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องถาวร เพื่อประเมินความเสียหายในพื้นที่เสี่ยงภัย (GNSS CORS NETWORK)*.
- [5] Devin L. Galloway, D.R.J., S. E. Ingebritsen, *Measuring Land Subsidence from Space*, in *Fact Sheet*. 2000.
- [6] Hooper, A., et al., *Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation*. Tectonophysics, 2012, pp. 1-13.
- [7] Berardino, P., et al., *A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, pp. 2375-2383.
- [8] Yunjun, Z., H. Fattahi, and F. Amelung, *Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction*. Computers & Geosciences, 2019. 133.

- [9] *MintPy: Miami InSAR Time-Series Software in Python*.
20 February 2023 Available from:
<https://github.com/insarlab/MintPy>.
- [10] คณะกรรมการบูรณาการนโยบายพัฒนาภาค, แผนพัฒนาภาค
กลางและพื้นที่กรุงเทพมหานคร พ.ศ. ๒๕๖๐ – ๒๕๖๕ ฉบับ
ทบทวน. ๒๕๖๒.
- [11] Aobpaet, A., *Insar time series analysis for land
subsidence monitoring in Bangkok and its vicinity area*,
in *Faculty of Engineering*. 2012, Chulalongkorn
University: Chulalongkorn University.
- [12] ปวัน ภิรมย์ทอง. (2558). การตรวจหาอัตราการทรุดตัวของ
แผ่นดินในช่วง ปี ค. ศ. 1996-2000 และแนวโน้มการทรุดตัว
บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลด้วยเทคนิคอนุกรมเวลา
อินซาร์, (วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย).
- [13] *SAR Imagery*. 20 February 2023 Available from:
<https://site.tre-altamira.com/insar/>.
- [14] Agency, E.S., *Sentinel-1 : ESA's Radar Observatory
Mission for GMES Operational Services*. 2012.
- [15] กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2563). โครงการระบบติดตามเฝ้า
ระวังระดับน้ำบาดาลและคุณภาพน้ำบาดาลทั่วประเทศ
งบประมาณรายจ่ายประจำปี พ.ศ.2563.
- [16] Hooper, A., P. Segall, and H. Zebker, *Persistent
scatterer interferometric synthetic aperture radar for
crustal deformation analysis, with application to
Volcán Alcedo, Galápagos*. *Journal of Geophysical
Research*, 2007. 112(B7).
- [17] Morishita, Y., *Nationwide urban ground deformation
monitoring in Japan using Sentinel-1 LiCSAR products
and LiCSBAS*. *Progress in Earth and Planetary Science*,
2021. 8(1).
- [18] Karamvasis, K. and V. Karathanassi, *Performance
Analysis of Open Source Time Series InSAR Methods
for Deformation Monitoring over a Broader Mining
Region*. *Remote Sensing*, 2020. 12(9).