

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอนุกรมเวลาอินซาร์เพื่อติดตามการเคลื่อนตัวของเขื่อนศรีนครินทร์ Application of Time-series InSAR Technology for Displacement Monitoring of the Srinakarin Dam

นันทชพร ปิยะมรัตน์^{1,*} และ อนุเฝ้า ออบแพทย์²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

*Corresponding author; E-mail address: nantouchaporn.pi@ku.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการนำข้อมูลดาวเทียมจากเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (SAR) มาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเขื่อนนั้น ประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถตรวจสอบติดตามการเคลื่อนตัวของเขื่อน ได้สะดวกและมีความแม่นยำสูง แต่การเคลื่อนตัวของเขื่อนนั้น เกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย จึงควรมีการตรวจสอบในบริเวณกว้างและสามารถดำเนินการตรวจสอบได้ตลอดเวลา โดยไม่มีข้อจำกัดในการใช้ทรัพยากรบุคคลเพื่อลงพื้นที่ตรวจสอบ งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอนุกรมเวลาของอินซาร์ (Time – series InSAR) ในการติดตามการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเขื่อน และศึกษารูปแบบการแสดงผลลัพธ์แบบสามมิติที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางวิศวกรรมในงานวิจัยได้นำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 จำนวน 24 ภาพ ตั้งแต่วันที่ 18 ตุลาคม 2560 ถึงวันที่ 22 สิงหาคม 2564 พื้นที่ศึกษาคือเขื่อนศรีนครินทร์ ซึ่งตั้งอยู่ที่บริเวณบ้านเจ้าเณร ตำบลท่ากระดาน อำเภอศรีสวัสดิ์ จังหวัดกาญจนบุรี เป็นเขื่อนหินถมแกนดินเหนียวที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย ความสูง 140 เมตร ความยาว 610 เมตร และความกว้าง 15 เมตร สามารถกักเก็บน้ำได้ 17,745 ล้านลูกบาศก์เมตร จากการวิจัยผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในแนวทิศทางดาวเทียม โดยตรวจพบการเคลื่อนตัวประมาณ -05.22 มิลลิเมตรต่อปี ไปจนถึง +07.04 มิลลิเมตรต่อปี การประยุกต์ใช้อินซาร์ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเขื่อนนั้นเป็นการระบุพื้นที่ที่เกิดการเคลื่อนตัว โดยเป็นเพียงการเตือนความปลอดภัย และแสดงให้เห็นว่าบริเวณพื้นที่ใดต้องมีการดำเนินการตรวจสอบที่แม่นยำและมีการลงพื้นที่เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยเขื่อนมากขึ้น จากการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Time-series InSAR และการแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการติดตามการเคลื่อนตัวของเขื่อนในรูปแบบสามมิติผ่านทาง Cesium The Platform for 3D Geospatial

คำสำคัญ: อินซาร์, อนุกรมเวลาอินซาร์, เขื่อนศรีนครินทร์, การติดตามการเคลื่อนตัว

Abstract

Satellite data from Synthetic Aperture Radar (SAR) has successfully been applied to monitor dam displacement.

Monitoring the dam's displacement is modern and accurate, but several factors can cause the dam's movement. Therefore, it should be inspected in a wide area and can be inspected at any time without restrictions on human resources in the field. This research applies time-series InSAR technology to monitor the displacement of dam structures and to study a 3D rendering model suitable for engineering structural analysis through the Cesium The Platform for 3D Geospatial. We process the time-series InSAR using 24 Sentinel-1 images from October 18, 2017, to August 22, 2021. The study area is the Srinakarin Dam, located in the Ban Chao Noen area, Tha Kradan Subdistrict, Si Sawat District, Kanchanaburi. Thailand's largest earth core dam is 140 meters high, 610 meters long, and 15 meters wide. Usually, it can store 17,745 million cubic meters of water. From research, the results were aligned with the satellite line of sight (LOS) with a displacement of approximately -05.22 mm/yr. to +07.04 mm/yr. The application of the InSAR time series to detect dam motion is to identify the area where the displacement occurred. It is just a safety warning showing which areas need more accurate inspections and on-site inspections to check dam safety. This research demonstrates the ability to apply Time-series InSAR technology. It presents the results obtained by tracking the dam's movement in three dimensions via the Cesium The Platform for 3D Geospatial.

Keywords: InSAR, Time-series InSAR, Srinakarin Dam, Displacement monitoring

1. บทนำ

เขื่อนเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีความสำคัญสำหรับเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก [1] เนื่องจากเขื่อนมีวัตถุประสงค์ในการบริหารจัดการน้ำเพื่อการชลประทาน การเกษตรกรรม การอุปโภค-บริโภค และการผลิตกระแสไฟฟ้า [2] เขื่อนต้องรับแรงกระทำจากสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น การเกิดอุทกภัย การเกิดแผ่นดินไหว นอกจากนี้ต้องรับแรงกระทำ

ภายใน เช่น แรงดันน้ำภายในตัวเขื่อน น้ำหนักของตัวเขื่อน เป็นต้น ซึ่งจากแรงกระทำดังกล่าวอาจทำให้เขื่อนที่ผ่านการใช้งานอาจมีสภาพไม่สมบูรณ์ [3] ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการพิบัติของเขื่อนที่อาจเป็นอันตรายต่อความปลอดภัยสาธารณะ ซึ่งส่งผลให้สูญเสียชีวิตและทรัพย์สิน [4] ดังนั้นการตรวจสอบและติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเขื่อนและสภาพแวดล้อมที่มีความถูกต้องแม่นยำ เพื่อวิเคราะห์ความปลอดภัยของตัวเขื่อนและดำเนินการแก้ไขหรือป้องกันนั้น จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง [5]

การตรวจสอบสภาพเขื่อนนั้น โดยปกติจะมีการตรวจสอบ 2 วิธี คือการตรวจสอบเขื่อนด้วยสายตา (Visual Inspection) และการตรวจสอบสภาพเขื่อนด้วยเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน (Dam Instrumentation) [6] โดยการตรวจสอบเขื่อนด้วยสายตาและการตรวจสอบโดยใช้เครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน จะต้องอาศัยการลงพื้นที่เพื่อดำเนินการสำรวจตรวจสอบ แม้ว่าในปัจจุบันการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเขื่อนนั้น มีการตรวจสอบที่ทันสมัยและมีความแม่นยำสูง แต่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเขื่อนนั้นมีปัจจัยหลายด้านเช่น การตรวจสอบพื้นที่โดยรอบของเขื่อน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวเขื่อนที่อาจเกิดขึ้นตลอดเวลา [7] ดังนั้นการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเขื่อนในปัจจุบัน จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบที่ครอบคลุมพื้นที่โดยรอบของตัวเขื่อน สามารถครอบคลุมพื้นที่ในบริเวณที่กว้างขึ้นและสามารถตรวจสอบได้ตลอดเวลา โดยไม่จำเป็นต้องลงพื้นที่หรือติดตั้งสถานีตรวจสอบเพื่อตรวจสอบความปลอดภัยเขื่อน

เทคโนโลยีอินซาร์ (InSAR) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ผลต่างระหว่างเฟสของภาพที่ได้จากเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (Phase Differential) ร่วมกับเทคโนโลยีการแทรกสอดของภาพ การวิเคราะห์ความแตกต่างจากภาพที่ถูกบันทึกตำแหน่งเดียวกัน อาจจะเป็นบันทึกในระยะเวลาเดียวกันหรือต่างช่วงเวลา ซึ่งจะแสดงความแตกต่างเนื่องจากการเคลื่อนที่ ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างสองภาพ [8] ซึ่งผลต่างเฟสนี้สามารถนำมาวิเคราะห์และศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในลักษณะต่าง ๆ การติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเขื่อนโดยใช้เทคโนโลยีอินซาร์สามารถตรวจสอบได้ครอบคลุมพื้นที่ที่พื้นที่บริเวณกว้าง มีค่าความละเอียดในการตรวจสอบถึงระดับมิลลิเมตรและยังสามารถตรวจสอบได้ตลอดเวลา [7] ปัจจุบันได้มีการวิจัยจำนวนมากที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถของการนำเทคโนโลยีอินซาร์มาใช้ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเขื่อนและประเมินเสถียรภาพความปลอดภัยของเขื่อนกันน้ำ เช่น ติดตามการเปลี่ยนแปลงของเขื่อน Plover Cove ในเขตบริหารพิเศษฮ่องกงแห่งสาธารณรัฐประชาชนจีน [9] การวิเคราะห์ตรวจสอบเสถียรภาพของเขื่อน Three Gorges ในสาธารณรัฐประชาชนจีน [7] และตรวจสอบเสถียรภาพของโครงสร้างเขื่อนโดยใช้อินซาร์ [10]

ในงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอนุกรมเวลาอินซาร์ ในการประมวลผลภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-1 ในช่วงวันที่ 18 ตุลาคม 2560 ถึง 22 สิงหาคม 2564 เพื่อตรวจสอบติดตามการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเขื่อนศรีนครินทร์ จังหวัดกาญจนบุรี โดยในการตรวจสอบติดตามการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเขื่อนศรีนครินทร์นั้น จะแสดงผลลัพธ์แบบสามมิติในรูปแบบเว็บเบราว์เซอร์ของ Cesium The Platform for 3D Geospatial เป็น

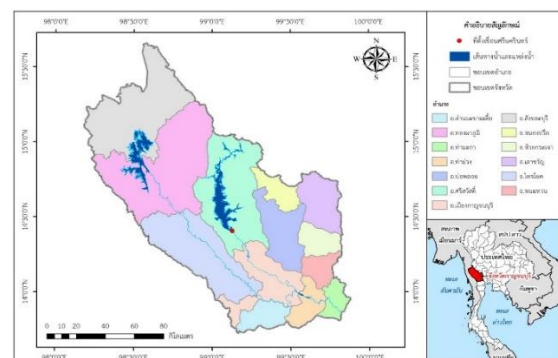
การสร้างแบบจำลองที่สะดวกรวดเร็วและสามารถเข้าถึงได้ง่าย [11] ทำให้มีความเหมาะสมในการนำมาแสดงผลเพื่อให้สามารถเห็นภาพผลลัพธ์ที่ชัดเจนและนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกับการตรวจสอบเสถียรภาพของเขื่อนโดยการสำรวจทั่วไปหรือการตรวจสอบร่วมกับเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางวิศวกรรม การวิเคราะห์สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเขื่อน และการวิเคราะห์ความปลอดภัยเขื่อนต่อไป

1.1 ขอบเขตการวิจัย

1.1.1 พื้นที่ศึกษา

จังหวัดกาญจนบุรี เป็นศูนย์กลางทางเศรษฐกิจ และการท่องเที่ยวของภาคตะวันตกของประเทศ ผลิตภัณฑ์มวลรวมจังหวัด (GPP) ของจังหวัดกาญจนบุรี ระหว่างปี พ.ศ. 2545 ถึง 2552 โดยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในปีพ.ศ. 2552 GPP ของจังหวัดกาญจนบุรี 72,954 ล้านบาท และรายได้ต่อหัว 92,923 บาท [12] จังหวัดกาญจนบุรีได้รับผลกระทบจากภัยธรรมชาติ เช่น การเกิดภัยแล้งและการเกิดอุทกภัย ซึ่งภัยพิบัติที่เกิดขึ้นเหล่านี้ ส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคมของจังหวัดกาญจนบุรี เขื่อนหลายแห่งที่ตั้งอยู่ในจังหวัดกาญจนบุรี จึงมีบทบาทสำคัญในการป้องกันและบรรเทาปัญหาการเกิดอุทกภัย ดังนั้นเขื่อนศรีนครินทร์ที่ตั้งอยู่ในจังหวัดกาญจนบุรี จึงมีบทบาทสำคัญในการป้องกันและบรรเทาปัญหาการเกิดอุทกภัย เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาภัยพิบัติจึงต้องมีการดำเนินการตรวจสอบความปลอดภัยเขื่อนเพื่อให้เขื่อนมีความปลอดภัยและพร้อมใช้งานตลอดเวลา

เขื่อนศรีนครินทร์ ตั้งอยู่ที่ตำบลท่ากระดาน อำเภอศรีสวัสดิ์ จังหวัดกาญจนบุรี พิกัด ละติจูด 14.4068965 ลองจิจูด 99.1264817 รูปที่ 1 เป็นเขื่อนนอกประสงค์แห่งแรกของโครงการพัฒนาลุ่มน้ำแม่กลอง สร้างขึ้นบนแม่น้ำแควใหญ่ กั้นแม่น้ำแควใหญ่ เป็นเขื่อนประเภทหินถมแกนดินเหนียวที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย บริเวณลาดเขื่อนด้านท้ายน้ำจะมีหินถมอยู่มีความสูงจากฐานราก 140 เมตร สันเขื่อนยาว 610 เมตร กว้าง 15 เมตร พื้นที่อ่างเก็บน้ำ 419 ตารางกิโลเมตร มีความจุ 17,745 ล้านลูกบาศก์เมตร เริ่มก่อสร้างเริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2516 และใช้งานครั้งแรกในปี พ.ศ. 2520 เขื่อนประกอบด้วย 5 โซน โซนแรกเป็นแกนกลางที่ทำจากทรายดินเหนียว โซนที่สองเป็นวัสดุกรองได้มาจากลุ่มแม่น้ำ โซนที่สามเป็นโซนเปลี่ยนแปลงได้มาจากการขุดรากฐาน โซนที่สี่วัสดุหินถมเป็นหินปูนชนิดแข็ง ทนทาน ขนาดสูงสุด 0.70 เมตร (ขนาดเล็ก) และโซนสุดท้ายวัสดุหินถมเป็นหินปูนชนิดแข็ง ทนทาน ขนาดสูงสุด 1.50 เมตร (ขนาดใหญ่) [13]



รูปที่ 1 พื้นที่ศึกษา เขื่อนศรีนครินทร์ จังหวัดกาญจนบุรี

1.1.2 เขื่อนหินถม (Rock-Fill Dams)

เขื่อนเป็นโครงสร้างป้องกันน้ำขนาดใหญ่ โดยเป็นอาคารที่ก่อสร้างขึ้นปิดกั้นทางน้ำ เพื่อใช้ประโยชน์ในการกักเก็บน้ำ และบริหารจัดการน้ำเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่าง ๆ ทั้งด้านเกษตรกรรม อุตสาหกรรมการประปา การคมนาคม การอนุรักษ์ดินและน้ำ รวมถึงการผลิตกระแสไฟฟ้าอีกด้วย [6] เขื่อนหินถม (Rock-Fill Dams) เป็นเขื่อนที่ใช้วัสดุประเภทหินนำมาเป็นวัสดุในการถม โครงสร้างเขื่อนซึ่ง International Commission on Large Dams (ICOLD) ได้ให้คำนิยามเขื่อนหินถมว่าเป็นเขื่อนประเภทม ซึ่งอาศัยหินในการสร้างเสถียรภาพให้กับโครงสร้างเขื่อน แต่เนื่องจากวัสดุประเภทหินไม่มีความสามารถในการกันน้ำได้ จึงต้องอาศัยวัสดุที่มีความทึบน้ำ [14] ดังนั้นเขื่อนหินถมจะมีลักษณะคล้ายกับเขื่อนดินถมคือสร้างขึ้นจากการนำวัสดุประเภทดินมาถมอัดให้แน่นด้วยเครื่องจักรกล หรือแรงคนโดยมีแกนกลางเป็นดินทึบน้ำ หรือดินที่น้ำสามารถซึมผ่านตัวเขื่อนได้ยาก โดยเขื่อนหินถมจะมีการนำวัสดุประเภทหินมาถมหุ้มแกนดินทึบน้ำ ซึ่งอาศัยหินในการสร้างความมั่นคงของเขื่อน เขื่อนหินถมแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ เขื่อนหินถมแกนดินเหนียว (Rock-Fill with Clay Core) และเขื่อนหินถมดาดหน้าด้วยคอนกรีต (Concrete Faced Rock-Fill) ซึ่งเขื่อนศรีนครินทร์เป็นเขื่อนประเภทหินถมแกนดินเหนียว

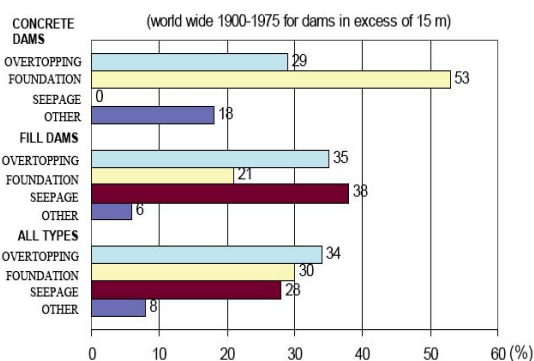
1.1.3 ระยะเวลาดำเนินการ

ในการศึกษาจะใช้ภาพ Sentinel-1 ตั้งแต่วันที่ 18 ตุลาคม 2560 ถึง 22 สิงหาคม 2564 เป็นข้อมูลการวิเคราะห์โดยใช้ระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar, SAR) ซึ่งได้จากดาวเทียม Sentinel-1 และใช้เทคโนโลยีอนุกรมเวลาของอินซาร์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ภาพ SAR แบบหลายช่วงเวลาช่วยให้ตรวจสอบการเสียรูปได้อย่างแม่นยำในระดับมิลลิเมตร [7]

2. หลักการและทฤษฎี

2.1 การพิบัติของเขื่อน

การพิบัติของเขื่อนดินถมและหินถมส่วนมากเกิดจากการรั่วซึม น้ำล้นสันเขื่อน และฐานรากเขื่อน รูปที่ 2 ซึ่งอนุกรมการวิชาการเขื่อนใหญ่ของสหรัฐอเมริกา (USCOLD) ได้สรุปการพิบัติของเขื่อน 6 รูปแบบ ซึ่งในแต่ละรูปแบบสามารถเกิดจากสาเหตุที่แตกต่างกัน รูปที่ 3



รูปที่ 2 สถิติการพิบัติของเขื่อน [34]

2.1.1 การพิบัติของเขื่อนจากการน้ำล้นสันเขื่อน

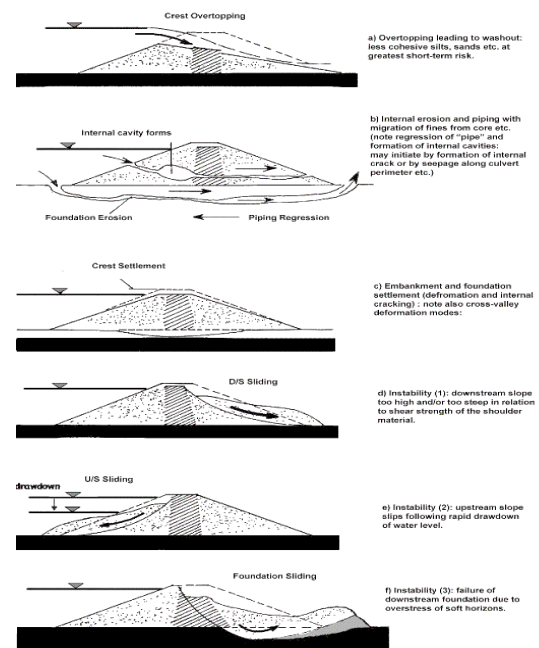
น้ำล้นสันเขื่อนเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการพิบัติในอันดับต้น ๆ ดังรูปที่ 2 ซึ่งการที่น้ำล้นสันเขื่อนนั้นทำให้กระแสน้ำพัดพาวัสดุของเขื่อนไป เกิดการกัดเซาะและกัดกร่อนทำให้เขื่อนเกิดการพิบัติได้ เขื่อนอาจมีความสามารถในการทนต่อการเกิดน้ำล้นสันเขื่อนได้หากความสูงสันเขื่อนอยู่ในระดับที่เหมาะสม ความลาดชันของเขื่อนสม่ำเสมอ และไม่มึคลื่นด้านเหนือน้ำ โดยเกิดการน้ำล้นสันเขื่อนนั้นอาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุเช่น การคาดการณ์ทางอุทกวิทยาที่ไม่เหมาะสม การบริหารจัดการน้ำที่ไม่มีประสิทธิภาพ การถล่มของดินในอ่างเก็บน้ำที่ก่อให้เกิดคลื่นขนาดใหญ่ และการชำระของบานระบายน้ำ [33] เป็นต้น

2.1.2 การรั่วซึมของฐานรากและตัวเขื่อน

โดยปกติเขื่อนดินถมหรือหินถมจะถูกออกแบบให้มีการรั่วซึมน้อยที่สุดโดยการบดอัดดินเหนียวเป็นแกนเขื่อนหรือฉีดอัดน้ำปูนในฐานราก [33] โดยให้ภายในตัวเขื่อนและฐานรากสามารถให้น้ำไหลผ่านได้ แต่ต้องควบคุมการไหลให้ไหลผ่านในเส้นทางและความเร็วที่กำหนดเพื่อลดแรงดันน้ำภายในตัวเขื่อนหากไม่สามารถควบคุมให้น้ำไหลผ่านเส้นทางที่กำหนดได้ น้ำที่รั่วซึมจะค่อย ๆ กัดเซาะ เกิดรูโพรง และพังทลายในที่สุด

2.1.3 การพิบัติเนื่องจากฐานรากเขื่อน

ฐานรากของเขื่อนมีความสำคัญ หากฐานรากมีปัญหาหรือข้อบกพร่องเกิดขึ้นอาจทำให้ตัวเขื่อนเกิดการเสียหายหรือพังทลาย โดยฐานรากเขื่อนที่ดีควรมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการรับน้ำหนัก มีความทึบน้ำ และในการก่อสร้างฐานรากต้องได้รับการปรับปรุงที่ดี ลักษณะที่สามารถบ่งบอกถึงปัญหาที่เกิดกับฐานราก ได้แก่ เกิดการทรุดตัวไม่เท่ากัน ตัวเขื่อนเกิดการเลื่อนตัว มีน้ำรั่วซึมมากกว่าปกติ หรืออาจเกิดรอยแตกบริเวณตัวเขื่อน เป็นต้น [14]



รูปที่ 3 การพิบัติของเขื่อน 6 รูปแบบของ USCOLD [33]

โดยการทรุดตัวของตัวเขื่อนและฐานราก อาจเกิดจากการยุบตัวของฐานรากที่รับน้ำหนักมากเกินไป หรืออาจเกิดจากดินชั้นล่างยุบตัวลงเมื่อสัมผัสกับน้ำ ซึ่งลักษณะการยุบตัวลักษณะนี้เกิดจากฐานรากเป็นวัสดุทรายที่มีความหนาแน่นน้อย

2.2 ดาวเทียม Sentinel-1

ดาวเทียม Sentinel-1 สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์และประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย ทั้งการเฝ้าติดตามสภาพแวดล้อมบนบก เช่น พื้นที่ป่าและไฟ ความชื้นในดิน พืชผลทางการเกษตร และการสนับสนุนการทำแผนที่ระหว่างภัยธรรมชาติ และสภาพแวดล้อมทางทะเล น้ำแข็งในทะเลภูเขาน้ำแข็ง สภาพข้อมูลและข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการเตรียมแผนภูมิ น้ำแข็งที่มีความละเอียดสูง การทำนายสภาพน้ำแข็งในทะเล การตรวจสอบการรั่วไหลของน้ำมัน การตรวจสอบความผันผวนของระดับน้ำทะเล และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [15] นอกจากนี้ยังประสบความสำเร็จในการเฝ้าติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเขื่อน [17,18,19]

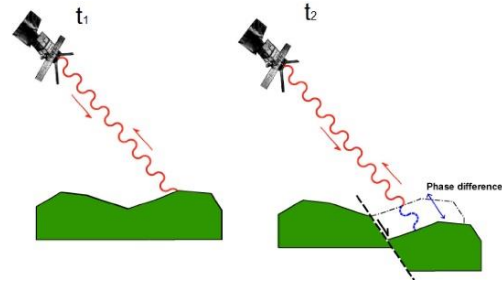
Sentinel-1 อยู่ในวงโคจรใกล้ขั้วโลก และดวงอาทิตย์ ความสูงจากแนวตั้ง 693 กิโลเมตร โดยมีรอบการโคจรทุก 12 วัน ตารางที่ 1 และรอบวงโคจร 175 รอบต่อการโคจรสำหรับดาวเทียมดวงเดียว ทั้ง Sentinel-1A และ Sentinel-1B ใช้ระนาบการโคจรเดียวกัน โดยมีความแตกต่างของเฟสการโคจร 180 องศา เมื่อดาวเทียมทั้งสองทำงานจะมีรอบการโคจรที่ 6 วัน สำหรับอินซาร์นั้น Sentinel-1 ต้องการการควบคุมวงโคจรที่เข้มงวด ตำแหน่งดาวเทียมตามวงโคจรต้องแม่นยำ โดยมีการระบุตำแหน่งและเวลาที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกันระหว่างคู่อินเตอร์เฟอโรเมตริก [32]

ตารางที่ 1 ข้อมูลวงโคจรของ Sentinel-1A และ Sentinel-1B [32]

Altitude	Inclination	Cycle	Local Time at Ascending Node
693 kilometers	98.18°	12 days	18:00 hours

2.3 Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

เทคโนโลยีอินซาร์เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมในเชิงพื้นที่ ในการตรวจสอบติดตามการเคลื่อนตัวของเขื่อน โดยหลักการการทำงานของเทคโนโลยีอินซาร์ คืออาศัยการวิเคราะห์ผลต่างเฟสของภาพเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (SAR) ตั้งแต่สองภาพขึ้นไป ซึ่งเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (SAR) เป็นระบบเรดาร์ที่สามารถสร้างภาพถ่ายที่มีความละเอียดสูง โดยภาพที่ได้จากเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (SAR) มาจากการกระเจิงของวัตถุที่คลื่นสะท้อนไปปฏิสัมพันธ์ [21] นอกจากนี้ยังสามารถบันทึกข้อมูลได้ตลอดเวลาตามที่ต้องการ [19] เทคโนโลยีอินซาร์เป็นการพัฒนาจากการนำภาพจากเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (SAR) มาใช้ร่วมกับเทคโนโลยีการแทรกสอดของภาพ ภาพทั้งสองจะถูกบันทึกในตำแหน่งต่างกับเล็กน้อย และมีการบันทึกภาพยาวนาน ซึ่งจะแสดงความแตกต่างเนื่องจากการเคลื่อนที่ ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างภาพสอง [8] รูปที่ 4 โดยผลต่างเฟสนี้สามารถศึกษาถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลง (Deformation Pattern) [22] ซึ่งอินซาร์เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการติดตามตรวจสอบการเคลื่อนที่ของภูมิประเทศ [20]



รูปที่ 4 ลักษณะการทำงานของอินซาร์ กับแทรกสอดของภาพ การเคลื่อนที่ทำให้มีการสะท้อนของคลื่นแตกต่างกัน [21]

อย่างไรก็ตามเทคนิคอินซาร์ยังมีข้อจำกัดอยู่ ข้อจำกัดของอินซาร์คือความคลาดเคลื่อนของสัญญาณอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศ ซึ่งปัญหานี้จะทำให้ค่าเฟสที่ตรวจวัดได้ผิดเพี้ยนไป ทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้อย่างแม่นยำหากพื้นที่ที่จะทำการตรวจสอบมีหิมะปกคลุมหรือมีความชื้นสูงจะทำให้เรดาร์ไม่สามารถกรองสัญญาณได้ นอกจากนี้การตรวจสอบบริเวณพื้นที่ที่มีพืชพันธุ์หนาแน่นทำให้การตรวจสอบเป็นไปได้ยาก เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนค่าการสะท้อนกลับ [19]

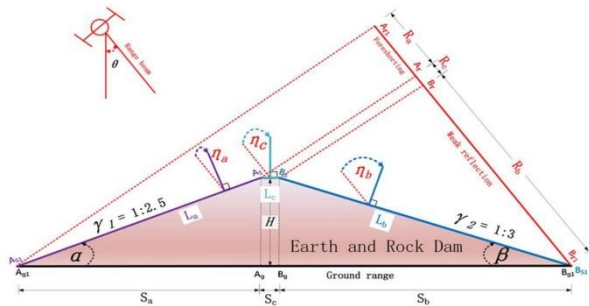
2.4 อนุกรมเวลาอินซาร์ (Time-Series InSAR)

การวิเคราะห์การเสียรูปโดยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ จะใช้ข้อมูลเฟสของภาพดาวเทียมเรดาร์ (SAR) เพื่อวิเคราะห์หาความแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาหรือในช่วงเวลาเดียวกัน โดยนำมาวิเคราะห์ร่วมกับเทคนิคการแทรกสอดของภาพ (InSAR) เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างที่เกิดขึ้น โดยอนุกรมเวลาอินซาร์อาศัยการสะท้อนกลับของสัญญาณคงที่ Permanent Scatterers (PS) ที่ส่งไปยังวัตถุที่ต้องการตรวจสอบ และการสะท้อนกลับของสัญญาณ โดยอาศัยการสร้างภาพ และวิเคราะห์ผลต่างเฟสของภาพเรดาร์ SAR ตั้งแต่สองภาพขึ้นไป [22] โดยจะใช้หลักการการแทรกสอดของภาพเปรียบเทียบกับภาพที่ได้หลาย ๆ คู่ด้วยกัน โดยคู่ภาพนี้จะถูกสร้างขึ้นมาโดยอ้างอิงจากภาพหลัก (Master) ตัวเดียวกันในการจับคู่ภาพ [22] เทคนิคนี้ให้จุดตรวจสอบหนาแน่นเพียงพอที่จะแก้ไขปัญหาจำนวนจุดตรวจสอบที่ไม่มีเพียงพอ การใช้เทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์เป็นวิธีที่ช่วยลดปัญหาดังกล่าว เพื่อให้การตรวจสอบติดตามการเคลื่อนตัวของเขื่อนศรีนครินทร์มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

เทคนิค PSI เป็นวิธีที่อาศัยค่าการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟที่โดดเด่นหรือคงที่ Permanent Scatterers (PS) โดยจะสะท้อนไปยังวัตถุและสะท้อนกลับมายังจุดรับสัญญาณเกิดเป็นค่าการสะท้อนของแต่ละจุดภาพ (pixel) เมื่อเวลาผ่านไปวัตถุที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจากสาเหตุใดก็ตามล้วนแต่ส่งผลให้ค่าการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟของจุดภาพนั้นเปลี่ยนไป [22] ซึ่งวิธี PSI สามารถประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะท้อนที่เกิดขึ้น จึงอนุมานว่าเกิดจากการเคลื่อนตัวของ [26] และนำไปประยุกต์ใช้เพื่อตรวจสอบติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเขื่อนได้ โดย PSI เป็นเทคนิคที่เหมาะสมในการตรวจสอบการเสียรูปของเขื่อนที่ช่วยให้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการทรุดตัวได้

2.5 การบิดเบือนทางเรขาคณิตแบบความชัน

ภูมิศาสตร์และธรณีวิทยาของชั้นใต้ดินเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการก่อสร้างเขื่อนกันน้ำ [31] ดังนั้น เขื่อนส่วนใหญ่แม้จะมีรูปทรงเรขาคณิตก็ยังมีผลแตกต่างของโครงสร้างเรขาคณิตด้วย เขื่อนกันน้ำโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นแอ่งหรือเนินเขา โดยมีความลาดชันต้นน้ำหันหน้าไปทางน้ำและทางลงน้ำจะมีบันไดและมีการปูพื้นถนนด้านบนสำหรับการตรวจสอบ โดยทั่วไปไม่มีความชันไม่ได้ถูกออกแบบให้คงที่เนื่องจากลักษณะของดินและวัสดุหินและธรณีวิทยาชั้นใต้ดิน โดยปกติจะใช้รูปทรงสามเหลี่ยมที่มีมุมความชัน 20 องศาเป็นรูปแบบของเขื่อนดินถมหรือหินถม [31] การสะท้อนของเรดาร์และการคาดคะเนจากพื้นดิน รูปที่ 5 แสดงส่วนตัดขวางของเขื่อนขนาดกลาง มุมความชันทางซ้ายคือ α มุมความชันทางขวา คือ β มุมมองเรดาร์คือ θ ความสูงของเขื่อนคือ H อัตราความชันคือ γ_1 และ η_a , η_b และ η_c เป็นมุมการเกิดในบริเวณพื้นผิวของ L_a , L_b และ L_c ตามลำดับ โดยทั่วไปให้ผู้ให้บริการข้อมูลดาวเทียม SAR จะคำนวณ η_c สำหรับผู้ใช้ในแต่ละเฟรมของข้อมูล



รูปที่ 5 รูปตัดแนวขวางของเขื่อนดินถมและหินถมขนาดกลางและเรขาคณิตสะท้อนเรดาร์ [31]

ในด้านการออกแบบโครงสร้างเขื่อนนั้น ความลาดเอียงของเขื่อนจะใช้แทนด้วยอัตราส่วน ตัวอย่างเช่นความลาดเอียงของ L_a รูปที่ 5 อัตราส่วนความชัน γ_1 คำนวณได้จากสมการที่ 1 [31]

$$\gamma_1 = \tan(\alpha) = \frac{1}{2.5} = \frac{H}{S_a} \quad (1)$$

เมื่อ H คือความสูงของเขื่อน α คือมุมภายในของลาดเขื่อน และ S_a คือระยะทางระหว่าง A_{g1} ถึง A_g มุมตกกระทบในพื้นที่ η_a บนความชันระยะใกล้ และ η_b บนความชันระยะไกลจะแปรผันตามมุมลาดเอียง รูปที่ 5 คำนวณได้จากสมการที่ 2 [31]

$$\begin{aligned} \eta_a &= \eta_c - \alpha \\ \eta_b &= \eta_c - \beta \end{aligned} \quad (2)$$

เมื่อ η_c คือมุมตกกระทบในพื้นที่ที่ได้มาจากความสูงของเรดาร์และ θ คือมุมมองเรดาร์

เมื่อตรวจสอบโดยใช้เรดาร์ความยาวทั้งสามด้านของเขื่อน L_a , L_b และ L_c จะเกิดการบิดเบือน ซึ่งการบิดเบือนจะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบในพื้นที่ โดยด้านที่ใกล้จะสั้นลง ในขณะที่ด้านไกลจะยืดออกเมื่อเทียบกับแนวเรขาคณิตจากพื้นดิน รูปที่ 1 คำนวณได้จากสมการที่ 3 [31]

$$\begin{aligned} R_a &= L_a \times \sin(\eta_a) \\ R_b &= L_b \times \sin(\eta_b) \\ R_c &= L_c \times \sin(\eta_c) \end{aligned} \quad (3)$$

เมื่อ R_a , R_b และ R_c คือความยาวช่วงเรดาร์ของพื้นผิวเขื่อน โดย R_a สอดคล้องกับการฉายภาพของความชันระยะใกล้ L_a และ R_b สอดคล้องกับการฉายภาพของความชันระยะไกล L_b และ R_c สอดคล้องกับการฉายภาพพื้นผิวด้านบน [31]

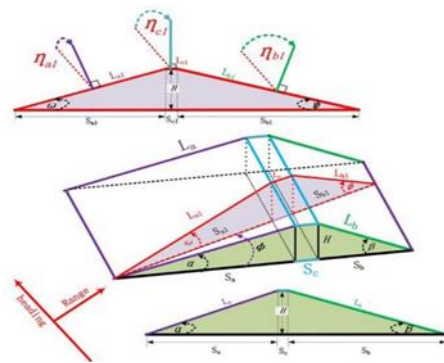
ในความเป็นจริงการวางแนวของเขื่อนอาจไม่สอดคล้องกับทิศทางเรดาร์ทั้งหมด ดังนั้นควรคำนึงถึงผลกระทบของมุมดาวเทียม เนื่องจากเขื่อนมีหน้ารับสัญญาณดาวเทียมเพียงสองด้าน จึงเกิดการบิดเบือนในพิกัดเรดาร์ รูปที่ 6 แสดงรูปทรงเรขาคณิตสำหรับการถ่ายภาพเรดาร์ของเขื่อน ϕ คือ มุมตามแนวขวางของเขื่อนและทิศทางระยะเรดาร์ α และ β คือมุมความลาดเอียงเดิมของเขื่อน ω คือมุมลาดระยะใกล้ที่ฉายไปยังช่วงเรดาร์ และ ψ คือ มุมลาดระยะใกล้ที่ฉายไปยังช่วงเรดาร์ จะได้สมการที่ 4 [31]

$$\begin{aligned} \omega &= \tan^{-1}\left(\frac{H}{S_{a1}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{H}{S_a} \times \cos \phi\right) \\ \psi &= \tan^{-1}\left(\frac{H}{S_{b1}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{H}{S_b} \times \cos \phi\right) \end{aligned} \quad (4)$$

เมื่อ S_{a1} คือความยาวแนวภาคพื้นดินของ L_{a1} ตามทิศทางของเรดาร์ และ S_{b1} คือความยาวแนวภาคพื้นดินของ L_{b1} ตามทิศทางของเรดาร์เนื่องจากการบิดเบือนไปตามทิศทางของเรดาร์ ความยาวของ L_a , L_b และ L_c จะเปลี่ยนเป็น L_{a1} , L_{b1} และ L_{c1} ตามลำดับโดยสมการที่ 5 [31]

$$\begin{aligned} L_{a1} &= L_a / \cos \phi \\ L_{b1} &= L_b / \cos \phi \\ L_{c1} &= L_c / \cos \phi \end{aligned} \quad (5)$$

ดังนั้นมุมตกกระทบในพื้นที่เขื่อนก็จะเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน ในขณะที่ทิศทางความชันแตกต่างกันตามทิศทางของช่วงเรดาร์ รูปที่ 6



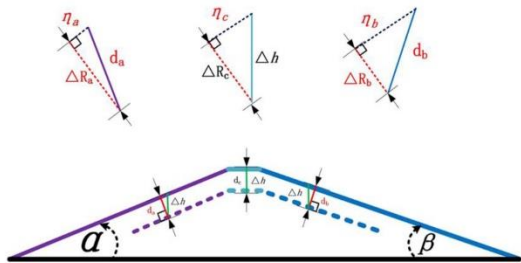
รูปที่ 6 รูปตัดตามแนวขวางของเขื่อนตามทิศทางเรดาร์ [32]

มุมตามแนวขวางของเขื่อนกับระยะเรดาร์คือ ϕ มุมตกกระทบเฉพาะพื้นผิวด้านระยะใกล้จะเปลี่ยนเป็น η_{a1} และมุมตกกระทบเฉพาะพื้นผิวด้านระยะไกลเป็น η_{b1} โดยคำนวณได้จากสมการที่ 6 [31]

$$\begin{aligned} \eta_{a1} &= \eta_c - \omega \\ \eta_{b1} &= \eta_c + \psi \end{aligned} \quad (6)$$

เมื่อ ϕ เท่ากับ 90° และ ψ จะเท่ากับ 0 ส่งผลให้มุมตกกระทบภายในพื้นที่นั้นมีค่าเท่ากัน ($a_1 = b_1 = c_1$)

การฉายภาพการเคลื่อนตัวของพื้นผิวในแนวตั้งบนทิศทางของเรดาร์นั้นการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของพื้นผิวขึ้นและการฉายภาพในทิศทางเรดาร์ รูปที่ 7 มุมตกกระทบบนพื้นผิวมีความสำคัญอย่างมากในการใช้เรดาร์หาค่าการเคลื่อนตัว



รูปที่ 7 การเปลี่ยนรูปร่างของพื้นผิวขึ้นในทิศทางช่วงเรดาร์

Δh คือการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของพื้นผิวขึ้น ΔR_a , ΔR_b และ ΔR_c คือเวกเตอร์การเคลื่อนตัวของช่วงเรดาร์ คำนวณได้จากสมการที่ 7

$$\begin{aligned} \Delta R_a &= d_a \times \cos \eta_a = \Delta h \times \cos \alpha \times \cos \eta_a \\ \Delta R_b &= d_b \times \cos \eta_b = \Delta h \times \cos \beta \times \cos \eta_b \end{aligned} \quad (7)$$

เมื่อ d_a และ d_b คือการเคลื่อนตัวของพื้นผิวระยะใกล้และระยะไกลบนทิศทางที่ฉายภาพปกติตามลำดับ

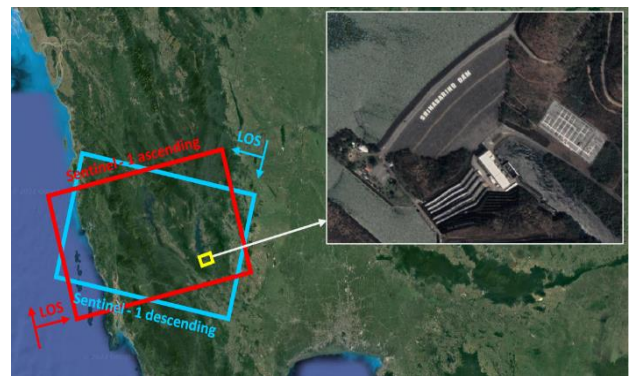
2.6 Cesium the Platform for 3D Geospatial

ปัจจุบันการสร้างดิจิทัลแพลตฟอร์มสำหรับแบ่งปันข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลที่ให้บริการออนไลน์ผ่านทางเว็บเบราว์เซอร์ส่วนใหญ่มุ่งเน้นการใช้งานด้านเทคนิค ในขณะที่การวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายดาวเทียมยังอยู่ในช่วงเริ่มต้น Cesium The Platform for 3D Geospatial เป็นการพัฒนาการเว็บเบราว์เซอร์ในรูปแบบแผนที่สามมิติ ในการแสดงภาพข้อมูลขนาดใหญ่แบบใหม่ พร้อมด้วยฟังก์ชันการแสดงผลข้อมูลสตรีมมิ่งแบบเรียลไทม์ผ่านแพลตฟอร์ม โดยสามารถทำได้อย่างรวดเร็วบนเบราว์เซอร์และโทรศัพท์มือถือ โดยมีความสวยงาม สะดวกรวดเร็วและง่ายต่อการใช้งาน [23] Cesium เป็นแพลตฟอร์มพื้นฐานสำหรับระบบนิเวศเชิงพื้นที่ ที่ทำงานร่วมกันได้ด้วยการผสมผสานระหว่างซอฟต์แวร์ที่เปิดเผย (open source software) และซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ (commercially available software) เป็นชุดเครื่องมือสำหรับการสร้างแอปพลิเคชันภูมิสารสนเทศ 3 มิติทุกประเภท โดยมีการนำเสนอรูปแบบการสร้างแบบจำลอง 3 มิติที่หลากหลาย Cesium รองรับทั้งรูปแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ สามารถแสดงผลข้ามแพลตฟอร์ม สามารถขยายแผนที่ และสามารถแสดงข้อมูลแบบไดนามิกตามโทรมไลน์ทำให้สามารถแสดงภาพข้อมูลได้เป็นอย่างดี [24] โดยในการใช้งาน Cesium นั้น มีรูปแบบเหมือนลูกโลกโดยเป็นแพลตฟอร์มสำหรับฝั่งเนื้อหา 3 มิติ ที่กำหนดเองเข้าไปที่ cesium platform [25] Cesium จึงเป็นแพลตฟอร์มที่ใช้ในการวิจัย พัฒนาข้อมูลภูมิสารสนเทศ เพื่อสร้างแบบจำลองอย่างรวดเร็วและง่ายต่อการใช้งาน

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

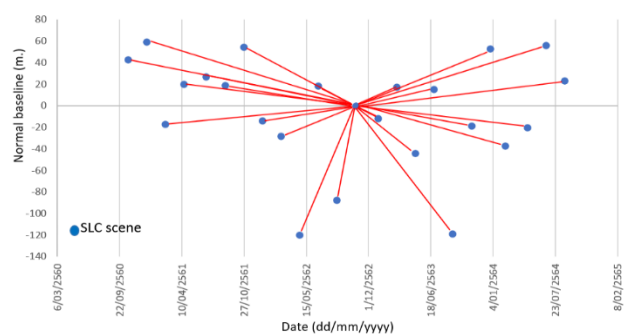
3.1 การเตรียมการและอินเทอร์เฟอโรเมตรีแบบกระจายถาวร (PSI)

ในการศึกษานี้ใช้เทคนิคคอนทราสต์เวลาอินซาร์ที่เรียกว่า PSI ในการประมวลผลภาพ Sentinel-1A เพื่อวัดรูปแบบการเสียรูปของเขื่อนศรีนครินทร์ PSI เป็นวิธีการที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งเชื่อถือได้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโลกเมื่อเวลาผ่านไป โดยใช้ภาพ SAR หลายภาพที่ได้รับจากพื้นที่เดียวกัน [26] เป็นการดึงข้อมูลจากพิกเซลของฉาก SAR ที่สม่ำเสมอในระยะเวลาที่ยาวนาน [27] การประมวลผลโดยใช้เทคนิคคอนทราสต์เวลาอินซาร์ที่เรียกว่า PSI จะใช้ข้อมูลของเฟสที่มีความแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาหรือในช่วงเวลาเดียวกันจากภาพถ่ายดาวเทียมเรดาร์มาวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างที่เกิดขึ้น ซึ่งในการวิจัยการดาวินโพลจะเลือกภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-1 จำนวน 24 ภาพ ตั้งแต่วันที่ 18 ตุลาคม 2560 ถึง 22 สิงหาคม 2564 บริเวณที่ตั้งของเขื่อนศรีนครินทร์ จังหวัดกาญจนบุรี รูปที่ 8



รูปที่ 8 การเลือกขอบเขตดาวเทียม Sentinel-1

โดยใช้เทคนิคการประมวลผลอินเทอร์เฟอโรเมตรีแบบหลายช่วงเวลาเพื่อคำนวณภาพ SLC ที่ VV โพลาริเซชันในการติดตามการเคลื่อนตัวของเขื่อนศรีนครินทร์ในวันที่ 18 ตุลาคม 2560 ถึง 22 สิงหาคม 2564 รูปที่ 9 ข้อมูลที่ได้รับเมื่อวันที่ 20 ตุลาคม 2562 คือภาพหลัก (Master) ใช้อ้างอิงในการจับคู่ภาพ โดยในการจับคู่ภาพใช้ภาพถ่ายดาวเทียมเรดาร์ (SAR) ที่ได้จากดาวเทียม Sentinel-1A จำนวน 24 ภาพ ในการวิเคราะห์คอนทราสต์เวลาอินซาร์โดยวิธี PSI จะอ้างอิงจากภาพหลัก (Master) และภาพรอง (slave) เพื่อทำการวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวเขื่อนศรีนครินทร์ โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าการสะท้อนที่เกิดขึ้น จะอนุมานว่าเกิดจากการเคลื่อนตัว [26]



รูปที่ 9 การกระจัดของ PS แกน Y คือ Base line และ แกน X คือวันที่

3.2 การแสดงข้อมูลบนแผนที่และการจัดกลุ่ม

การนำข้อมูลการเคลื่อนตัวมาแสดงผลทาง QGIS โดยจะนำข้อมูลผลลัพธ์ค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการประยุกต์ใช้อินเตอร์เวลอินซาร์ ตรวจสอบติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเขื่อนศรีนครินทร์ตั้งแต่วันที่ 18 ตุลาคม 2560 ถึง 22 สิงหาคม 2564 มาแสดงลงบนแผนที่ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการประยุกต์ใช้อินเตอร์เวลอินซาร์ ในการตรวจสอบติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเขื่อนจะได้ข้อมูลพิกัดตำแหน่งละติจูด ลองจิจูด และค่าการเคลื่อนตัวหน่วยมิลลิเมตรต่อปี ดังตารางที่ 2 โดยนำข้อมูลค่าการเคลื่อนตัวมาแสดงผลในรูปแบบแผนที่โดย QGIS นั้นจะทำการนำเข้าข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้ลงใน QGIS เพื่อทำการสร้างชั้นข้อมูล (layer) และทำการพล็อตจุดค่าการเคลื่อนตัวตามพิกัดละติจูด ลองจิจูด เพื่อแสดงผลลงในแผนที่ให้เห็นภาพชัดเจนยิ่งขึ้น จะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 10

ตารางที่ 2 พิกัดทางภูมิศาสตร์และค่าการเคลื่อนตัว

longitude	latitude	Deformation (mm./y.)
99.16238	14.45198	-5.22082
99.08904	14.34657	7.04236



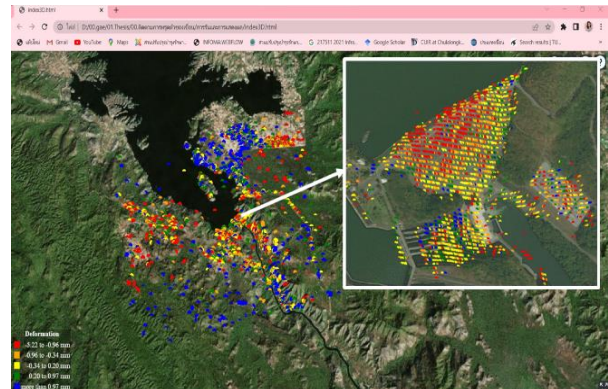
รูปที่ 10 การแสดงผลโดยใช้ QGIS

3.3 การแสดงผลแบบสามมิติ

ในงานวิจัยนี้จะใช้การแสดงผลสามมิติโดย Cesium The Platform for 3D Geospatial ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มที่พัฒนาการท่องเว็บบราวเซอร์ในรูปแบบแผนที่สามมิติ และการแสดงภาพข้อมูลขนาดใหญ่แบบใหม่ โดยในการใช้งานจะทำการฝังเนื้อหาสามมิติที่ต้องการแสดงผลเข้าไปใน Cesium The Platform และทำการเขียนโค้ดโดย visual studio code

โดยการตรวจสอบติดตามการเคลื่อนตัวของเขื่อนศรีนครินทร์ในงานวิจัยนี้เป็นการตรวจสอบโดยการประยุกต์ใช้อินเตอร์เวลอินซาร์ ซึ่งในการศึกษาจะนำข้อมูลค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเขื่อนโดยใช้อินเตอร์เวลอินซาร์มาอัปโหลดลงบนเว็บไซต์ Cesium The Platform for 3D Geospatial ทำการเลือกรูปแบบที่เราต้องการ นำโค้ดของรูปแบบที่ได้ทำการเลือกจากเว็บไซต์ Cesium The Platform มาทำการเขียนโค้ดลงใน visual studio code จะได้การแสดงผลบนเว็บบราวเซอร์เป็นรูปแบบสามมิติ ซึ่งจากการวิจัยการแสดงผลโดย Cesium The Platform รูปที่ 11 มีความสะดวกและง่ายต่อการนำข้อมูลไปใช้ในการตรวจสอบภาพเขื่อนด้วยการ

ลงพื้นที่ ทำให้มีความเหมาะสมในการนำโระยุคที่ใช้ร่วมกับการตรวจสอบเสถียรภาพของเขื่อนโดยการสำรวจทั่วไปหรือการตรวจสอบร่วมกับเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างทางวิศวกรรม การวิเคราะห์สาเหตุของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเขื่อน และการวิเคราะห์ความปลอดภัยเขื่อนต่อไป

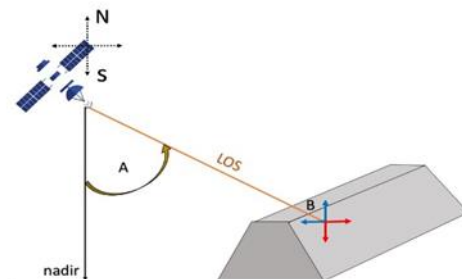


รูปที่ 11 การแสดงผลค่าการเคลื่อนตัวบนแผนที่สามมิติ ในรูปแบบเว็บบราวเซอร์ผ่านทาง Cesium The Platform for 3D Geospatial

4. ผลลัพธ์

4.1 การกำหนดลักษณะ PSI

จากการติดตามตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเขื่อนศรีนครินทร์โดยการประมวลผลอินเตอร์เวลอินซาร์ วิเคราะห์การเสียรูปโดยใช้ข้อมูลของเฟสที่มีความแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาหรือในช่วงเวลาเดียวกันจากภาพดาวเทียมเรดาร์ ในงานวิจัยนี้ใช้ภาพ Sentinel-1 จำนวน 24 ภาพ ตั้งแต่วันที่ 18 ตุลาคม 2560 ถึง 22 สิงหาคม 2564 ขอบเขตดาวเทียม Sentinel-1 บริเวณเขื่อนศรีนครินทร์ ตำแหน่งพิกัด AOI ละติจูด 14.3595 ลองจิจูด 99.0596 และละติจูด 14.4493 ลองจิจูด 99.1738 จากการศึกษาค่าการเคลื่อนตัวของเขื่อนผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในแนวทิศทางดาวเทียม โดยมีค่าการเคลื่อนตัวหน่วยมิลลิเมตรต่อปี จำนวน 11,347 จุดจะเห็นได้ว่าบริเวณที่เป็นสีแดงเกิดจากการเคลื่อนที่ออกจากเซ็นเซอร์ SAR (การทรุดตัว) และจุดที่เป็นสีฟ้าเคลื่อนที่เข้าหาเซ็นเซอร์ SAR (การยกตัวขึ้น)

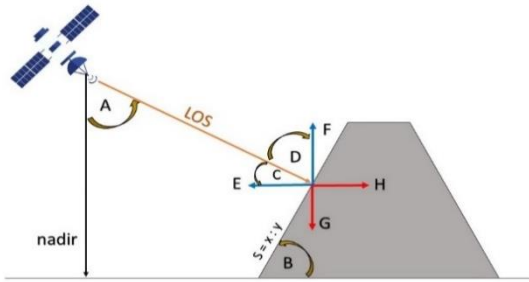


รูปที่ 12 การวางแนวของเขื่อนกับทิศทางดาวเทียม

โดยการวางแนวของเขื่อนศรีนครินทร์กับทิศทางดาวเทียม รูปที่ 12 A คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของดาวเทียม B คือ คลื่นระดับสยดา หรือคลื่นที่เดินทางระหว่างต้นทางไปยังปลายทางโดยปราศจากสิ่งกีดขวาง

A คือมุมสำหรับแนวอินเตอร์เฟอโรเมตริก ซึ่งในการวิจัยนี้จะได้มุม A เท่ากับ 38° [36]

การวางแผนของเซ็นเซอร์ครินทรินั้น อาจไม่สอดคล้องกับทิศทางดาวเทียม ดังนั้นต้องคำนึงถึงผลกระทบของมุมดาวเทียม ในการคิดผลกระทบของมุมดาวเทียมเนื่องจากตำแหน่งของตัวเซ็นเซอร์ไม่สอดคล้องกับทิศทางดาวเทียมนั้น จะต้องนำค่าการเคลื่อนตัวของดาวเทียมมาทำการปรับแก้ การสะท้อนของคลื่นเรดาร์กับการเคลื่อนที่ของพื้นผิว รูปที่ 13 A คือมุมจาก nadir ไปยังแนวคลื่นระดับสายตา ซึ่งจากรูปที่ 12 มุม A เท่ากับ 38° B คือมุมภายในของลาดเขื่อน D คือมุมจากคลื่นระดับสายตาที่กระทบตัวเซ็นเซอร์เปลี่ยนเป็นแนวตั้ง C คือ มุมจากคลื่นระดับสายตาที่กระทบตัวเซ็นเซอร์เปลี่ยนเป็นแนวราบ การนำค่าการเคลื่อนตัวของดาวเทียมมาทำการปรับแก้ นั้น จากสมการที่ 1 จะได้มุม B เท่ากับ 29.06° มุม D จะเท่ากับ 38° เช่นเดียวกับมุม A และมุม C เท่ากับ 8.94° นำมุมที่ได้มาปรับแก้ค่าการเคลื่อนตัวของดาวเทียมเพื่อให้ค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการวิจัยสอดคล้องกับตำแหน่งของตัวเซ็นเซอร์



รูปที่ 13 การสะท้อนของคลื่นเรดาร์กับการเคลื่อนที่ของพื้นผิว

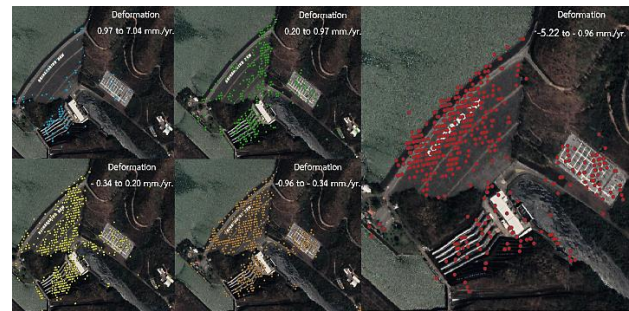
ค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจสอบติดตามการเคลื่อนตัวของเซ็นเซอร์ครินทรินั้น โดยใช้อินเตอร์เฟอโรแกรมโดยค่าการเคลื่อนตัวที่ได้นั้น สามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าที่ติดลบมาจากการที่สัญญาณเรดาร์ที่ส่งไปยังตัวเซ็นเซอร์นั้น สะท้อนการเคลื่อนที่ของพื้นผิวที่เคลื่อนที่ออกจากเซ็นเซอร์ SAR (การทรุดตัว) ขณะที่ค่าบวกแสดงถึงการเคลื่อนที่ของพื้นผิวเข้าหาเซ็นเซอร์ SAR (การยกตัว) การไล่ระดับสีจากสีแดงเป็นสีน้ำเงินนั้น แสดงถึงอัตราการทรุดตัวที่ลดลงในขณะที่การไล่ระดับสีของสีน้ำเงินแสดงถึงอัตราการยกตัวที่เพิ่มขึ้น โดยจากการติดตามตรวจสอบพบว่าการเคลื่อนตัวของดาวเทียมอยู่ที่ประมาณ -5.22 มิลลิเมตรต่อปีไปจนถึง 7.04 มิลลิเมตรต่อปี

4.2 การติดตามตรวจสอบการเคลื่อนตัว

จากการประยุกต์ใช้อินเตอร์เฟอโรแกรมเวลาอินซาร์ทำให้เห็นถึงค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นโดยเกิดจากการสะท้อนของสัญญาณเรดาร์ที่ส่งไปยังวัตถุที่ต้องการตรวจสอบ และอาศัยการสะท้อนกลับของสัญญาณเรดาร์ โดยอาศัยการสร้างภาพ และวิเคราะห์ผลต่างเฟสของภาพเรดาร์ SAR ตั้งแต่สองภาพขึ้นไปโดยเมื่อเมื่อเวลาผ่านไปวัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ค่าการ

สะท้อนคลื่นไมโครเวฟของจุดภาพนั้นเปลี่ยนไป [22] ทำให้ทราบค่าการเคลื่อนตัวที่ตัวเซ็นเซอร์ครินทรินั้น

รูปที่ 14 จะเห็นได้จากการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเซ็นเซอร์บริเวณที่แสดงจุดสีแดงมีการตรวจพบเป็นค่าลบ เนื่องจากการสะท้อนการเคลื่อนที่ของพื้นผิวที่เคลื่อนที่ออกจากเซ็นเซอร์ SAR (การทรุดตัว) สามารถวิเคราะห์ได้ว่าบริเวณที่แสดงผลเป็นสีแดงเป็นบริเวณกึ่งกลางตัวเขื่อน ซึ่งอาจมีการทรุดตัวเกิดขึ้นบริเวณนั้น หากนำข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ไปตรวจสอบด้วยการลงพื้นที่หรือการตรวจสอบโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์พฤติกรรมเขื่อนต่อไปนั้น บริเวณที่ตรวจพบจุดสีแดง (การทรุดตัว) เป็นบริเวณที่ควรให้ความสนใจในเรื่องความปลอดภัยเขื่อนเป็นพิเศษ



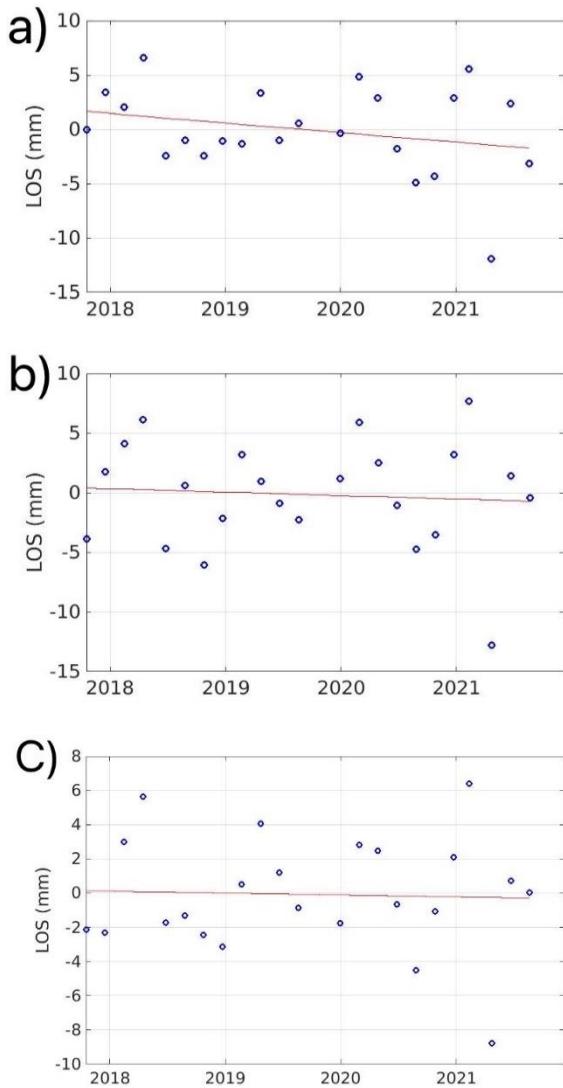
รูปที่ 14 ค่าการเคลื่อนตัวที่ได้จากการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเซ็นเซอร์ครินทรินั้น โดยจำแนกค่าการเคลื่อนตัวเป็นสีตามช่วงการเคลื่อนตัว

ผลลัพธ์ที่ได้จากการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอนุกรมเวลาอินซาร์ในการตรวจสอบติดตามการเคลื่อนตัวของเซ็นเซอร์ครินทรินั้น ยังไม่สามารถบอกได้แน่ชัดว่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นอาจเป็นการพิบัติของเขื่อนในรูปแบบใดหรือการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากสาเหตุใด หากเป็นการพิบัติของเขื่อนในรูปแบบน้ำล้นสันเขื่อน การรั่วซึมของฐานรากและตัวเขื่อน หรือการพิบัติของเขื่อนในรูปแบบอื่น ๆ นั้น ต้องวิเคราะห์เพิ่มเติมในเรื่องของปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำ การคาดการณ์ทางอุทกวิทยา ข้อมูลการบริหารจัดการน้ำ สภาพความพร้อมใช้งานของเขื่อน และข้อมูลจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน [33] เพิ่มเติม เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากอินซาร์นั้น บ่งบอกถึงการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นกับตัวเขื่อน หากต้องการศึกษาสาเหตุของการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นศึกษารูปแบบการพิบัติของเขื่อน และศึกษาความปลอดภัยเขื่อนนั้นต้องใช้ข้อมูลในการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลการเคลื่อนตัวที่ได้จากอนุกรมเวลาอินซาร์ต่อไป เช่น การตรวจสอบเขื่อน Plover Cove โดยอินซาร์ร่วมกับข้อมูลระดับน้ำในอ่างเก็บน้ำ [9] และการตรวจสอบการเปลี่ยนรูปร่างของเขื่อนโดยอินซาร์ร่วมกับข้อมูลดั้งวัดการเคลื่อนตัว [35] เป็นต้น

4.3 การตรวจสอบอนุกรมเวลา PSI

ผลลัพธ์ที่ได้ 11,347 จุด โดย PSI นั้นอยู่ไกลจากการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของทางลาดที่ชัดเจน จากรูปที่ 15 จะแสดงกราฟค่าการเคลื่อนตัวสะสมของแต่ละวัน โดยแกน X แสดงวันที่ได้มาของข้อมูล ตั้งแต่วันที่ 18 ตุลาคม 2560 ถึง 22 สิงหาคม 2564 และแกน Y แทนค่าการเคลื่อนตัวสะสมในหน่วยมิลลิเมตร โดยกราฟนี้จะแสดงให้เห็นรายละเอียดอนุกรมเวลาของ

การวัดการเปลี่ยนแปลงรูป PSI ทำให้เห็นถึงรูปแบบการทรุดตัวที่ชัดเจนในช่วงระยะเวลา 4 ปี ที่ได้ทำการตรวจสอบติดตามการเคลื่อนตัวของเขื่อนศรีนครินทร์

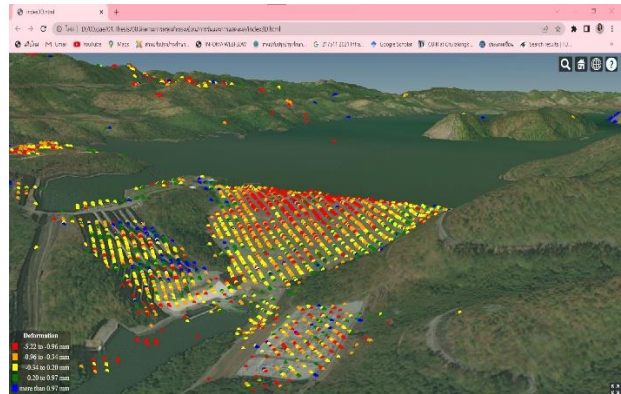


รูปที่ 15 การเคลื่อนตัวสะสมที่เกิดขึ้นในช่วงปี พ.ศ.2560 ถึง พ.ศ. 2564 ในรัศมี 50 เมตร โดย a) บริเวณด้านบนของตัวเขื่อน ตำแหน่งละติจูด 14.4089 ลองจิจูด 99.1293 b) บริเวณกลางตัวเขื่อนตำแหน่งละติจูด 14.4071 ลองจิจูด 99.1293 และ c) บริเวณด้านล่างของตัวเขื่อนตำแหน่งละติจูด 14.4048 ลองจิจูด 99.1282

4.4 ผลการแสดงผลลัพธ์แบบสามมิติ

จากการศึกษา ยังแสดงให้เห็นความสามารถ และความเป็นไปได้ในการพัฒนาการแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบสามมิติของการตรวจสอบติดตามการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเขื่อน เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปประเมินร่วมกับการตรวจสอบความปลอดภัยเขื่อนโดยวิธีอื่น โดยการแสดงผลสามมิติผ่านทาง Cesium The Platform for 3D Geospatial การแสดงผลจะแสดงค่าการเคลื่อนตัวบนแผนที่สามมิติ ในรูปแบบเว็บเบราว์เซอร์ นอกจากนี้สามารถเลือกพิจารณาเพียงจุดที่ต้องการได้ โดยการเลือกจุดที่ต้องการ เมื่อเลือกจุด

ที่ต้องการจะมีหน้าต่างแสดงข้อมูล ซึ่งแสดงตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ และแสดงค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นที่จุดนั้น ๆ รูปที่ 16



รูปที่ 16 การแสดงผลลัพธ์โดย Cesium The Platform for 3D Geospatial

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอนุกรมเวลาอินซาร์เพื่อติดตามการเคลื่อนตัวของเขื่อนศรีนครินทร์ จังหวัดกาญจนบุรี เป็นการศึกษที่จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการศึกษาและติดตามอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการเคลื่อนตัวของเขื่อนนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยในช่วงเวลาต่าง ๆ ซึ่งการติดตามการเคลื่อนตัวของเขื่อนอย่างต่อเนื่องจะทำให้สามารถรับมือกับการพิบัติของเขื่อนที่อาจเกิดขึ้นได้

เทคโนโลยีอนุกรมเวลาอินซาร์เป็นวิธีที่สามารถตรวจสอบติดตามการเคลื่อนตัวของเขื่อนได้ โดยข้อดีของการใช้เรดาร์ในการตรวจสอบติดตามการเคลื่อนของเขื่อนคือ ไม่ต้องใช้บุคลากรในการลงพื้นที่เพื่อทำการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเขื่อนและผลลัพธ์ค่าการทรุดตัวที่ได้มีการกระจายตัวเพียงพอต่อการวิเคราะห์ ซึ่งจากการวิจัยในช่วงระยะเวลาตั้งแต่วันที่ 18 ตุลาคม 2560 ถึง 22 สิงหาคม 2564 ได้ใช้ภาพในการตรวจสอบทั้งหมด จำนวน 24 ภาพ โดยเป็น Single Look Complex (SLC) จาก Sentinel-1A จากการวิจัยจะได้ผลลัพธ์จุดการเคลื่อนตัวจำนวน 11,347 จุด แสดงค่าการเคลื่อนตัวอยู่ที่ -5.22 มิลลิเมตรต่อปีถึง 7.04 มิลลิเมตรต่อปี โดยสัญญาณที่สะท้อนการเคลื่อนที่ของพื้นผิวที่เคลื่อนที่ออกจากเซ็นเซอร์ SAR เป็นค่าลบ (การทรุดตัว) ขณะที่ค่าบวกแสดงถึงการเคลื่อนที่ของพื้นผิวเข้าหาเซ็นเซอร์ SAR เป็นค่าบวก (การยกขึ้น) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จในการประยุกต์ใช้อนุกรมเวลาอินซาร์ในการติดตามตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเขื่อนศรีนครินทร์

นอกจากนี้จากการวิจัยในครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบสามมิติ ผ่านทาง Cesium The Platform ซึ่งสามารถดูการแสดงผลลัพธ์ได้อย่างสะดวกเนื่องจากเป็นแพลตฟอร์ม open source สามารถเข้าถึงได้ง่าย รองรับทั้งรูปแบบสองมิติ และสามมิติ สามารถแสดงผลข้ามแพลตฟอร์มได้ และง่ายต่อการนำข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อในด้านการศึกษาตรวจสอบสภาพเขื่อนด้วยการลงพื้นที่ ทำให้มีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ร่วมกับการตรวจสอบเสถียรภาพของเขื่อนโดยการสำรวจทั่วไปหรือการตรวจสอบร่วมกับเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อนต่อไป

5.1 ข้อจำกัดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเขื่อน ซึ่งเป็นเพียงระบบเตือนความปลอดภัยและแสดงให้เห็นว่าบริเวณพื้นที่ใดต้องมีการดำเนินการตรวจสอบที่แม่นยำ และมีการลงพื้นที่เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยเขื่อนมากขึ้น หากต้องการนำผลการเคลื่อนตัวที่ได้ไปศึกษาต่อถึงรูปแบบการพิบัติของเขื่อน สาเหตุที่เกิดการเคลื่อนตัว การวิเคราะห์เสถียรภาพและวิเคราะห์ด้านความปลอดภัยเขื่อนต่อไปนั้น ควรนำข้อมูลที่ได้จากการประยุกต์ใช้อินเทอร์เน็ตไปศึกษาร่วมกับข้อมูลด้านอื่น ๆ เช่น ข้อมูลปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำ การคาดการณ์ทางอุทกวิทยา ข้อมูลการบริหารจัดการน้ำ สภาพความพร้อมใช้งานของเขื่อน และข้อมูลจากเครื่องมือวัดพฤติกรรมเขื่อน เป็นต้น

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

งานวิจัยที่ต้องใช้ข้อมูลจากดาวเทียมระบบเรดาร์ เพื่อทำการวิเคราะห์อินเทอร์เฟซของเขื่อน ต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพและกำลังประมวลผลสูง รวมถึงต้องมีพื้นที่จัดเก็บข้อมูลที่เพียงพอทั้งจากข้อมูลดั้งเดิมและข้อมูลจากการประมวลผล เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยเป็นไฟล์ขนาดใหญ่ ซึ่งการใช้จ่ายเงินค่าข้อมูลที่มีมากขึ้นมาทำการวิเคราะห์ ผลลัพธ์ที่ได้ก็จะมีค่าความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ European Space Agency (ESA) สำหรับข้อมูล Copernicus Sentinel ตั้งแต่ปี พ.ศ.2560 ถึง พ.ศ.2564 จาก ASF DAAC ดาวันโพลดข้อมูลเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2565 ถึง 1 พฤษภาคม 2565 ประมวลผลโดย ESA ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล นอกจากนี้ขอขอบคุณ Cesium The Platform for 3D Geospatial ในการแสดงผลข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

[1] Roque, D., Perissin, D., Falcão, A. P., Fonseca, A. M., Henriques, M. J., & Franco, J. (2015). Dams regional safety warning using time-series InSAR techniques. In Second International Dam World Conference, Portugal, April (pp. 21-24).

[2] ส่วนความปลอดภัย กรมชลประทาน (2558). คู่มือการตรวจสอบสภาพเขื่อน.

[3] ส่วนความปลอดภัยเขื่อน กรมชลประทาน (2558). คู่มือการบำรุงรักษาเขื่อนดินและอาคารประกอบ.

[4] Ruiz-Armenteros, A. M., Delgado-Blasco, J. M., Bakon, M., Joao Sousa, J., Lamas-Fernández, F., José Gil, A., ... & Perissin, D. (2020). Monitoring dams structural stability from space using differential SAR interferometry. In EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 21356).

[5] Roque, D., Perissin, D., Falcão, A. P., Fonseca, A. M., Henriques, M. J., & Franco, J. (2015). Dams regional safety warning using

time-series InSAR techniques. In Second International Dam World Conference, Portugal, April (pp. 21-24).

[6] ส่วนความปลอดภัยเขื่อน กรมชลประทาน (2558). คู่มือการตรวจสอบสภาพเขื่อนดิน.

[7] Wang, T., Perissin, D., Rocca, F., & Liao, M. S. (2011). Three Gorges Dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis. Science China Earth Sciences, 54(5), 720-732.

[8] Aobpaet., A. & Trisirisatayawong, I. (2012). InSAR time series analysis for land subsidence monitoring in Bangkok and its vicinity area. Chulalongkorn University: ม.ป.ท.

[9] Lazecky, M., Perissin, D., Lei, L., Qin, Y., Scaioni, M. (2013). Plover Cove dam monitoring with spaceborne InSAR technique in Hong Kong. In Proceedings of the 2nd Joint International Symposium on Deformation Monitoring, Nottingham, UK (pp. 9-11).

[10] Al-Husseinawi, Y. A. A. (2019). Spaceborne InSAR for dam stability (Doctoral dissertation, Newcastle University).

[11] Naul, B., van der Walt, S., Crellin-Quick, A., Bloom, J. S., & Pérez, F. (2016). cesium: Open-source platform for time-series inference. arXiv preprint arXiv:1609.04504.

[12] Office of the National Economic and Social Development Board. Gross Provincial Product (GPP) of Kanchanaburi province (In Thai) [Internet]. 2012 [cited 2022 Jan 5]. Available from: <http://www.nesdb.go.th>.

[13] Ongsomwang, S., & Junkaew, N. (2017). Prediction Dynamic Flooding of Dam Break Using Hydrodynamic Model and Flood Assessment from Classified THEOS Images: A Case Study of Srinagarind Dam, Kanchanaburi Province. Science & Technology Asia, 143-158.

[14] ส่วนความปลอดภัย กรมชลประทาน. เอกสารประกอบการบรรยาย เรื่อง ความปลอดภัยเขื่อน

[15] ESA Sentinel-1. Availableonline <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-1> (accessed on 14 January 2022).

[16] Milillo, P., Bürgmann, R., Lundgren, P., Salzer, J., Perissin, D., Fielding, E., ... & Milillo, G. (2016). Space geodetic monitoring of engineered structures: The ongoing destabilization of the Mosul dam, Iraq. Scientific reports, 6(1), 1-7.

[17] Roccheggiani, M., Piacentini, D., Tirincanti, E., Perissin, D., & Menichetti, M. (2019). Detection and monitoring of tunnelling induced ground movements using Sentinel-1 SAR interferometry. Remote Sensing, 11(6), 639.

- [18] Ruiz-Armenteros, A. M., Lazecky, M., Hlaváčová, I., Bakon, M., Delgado, J. M., Sousa, J. J., & Perissin, D. (2018). Deformation monitoring of dam infrastructures via spaceborne MT-InSAR. The case of La Viñuela (Málaga, southern Spain). *Procedia Computer Science*, 138, 346-353.
- [19] Oyvind et al. (2015). InSAR on Embankment Dams. Report number: ISBN 978-91-7673-212-0, Affiliation Energiforsk
- [20] Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of geophysics*, 36(4), 441-500.
- [21] ปวัน ภิรมย์ทอง. (2558). การตรวจหาอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในช่วงปี ค. ศ. 1996-2000 และแนวโน้มการทรุดตัวบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลด้วยเทคนิคอนุกรมเวลาอินซาร์ (วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย).
- [22] สรศักดิ์ ชัยทวี. (2558). การติดตามการทรุดตัวของแผ่นดินในพื้นที่ฝั่งตะวันออก ของกรุงเทพมหานคร และปริมณฑลโดยเทคนิค Time-Series InSAR (วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย).
- [23] Fu, Y., Luan, G., Cai, J., Li, Y., & Zhao, F. (2021). Construction and application research of ecological evaluation platform based on Cesium. *Water Supply*, 21(3), 983-991.
- [24] Birowosuto, M. D., Dorenbos, P., van Eijk, C. W. E., Krämer, K. W., & Güdel, H. U. (2007). Scintillation and luminescence properties of Ce³⁺ doped ternary cesium rare-earth halides. *physica status solidi (a)*, 204(3), 850-860.
- [25] Kulawiak, M., & Kulawiak, M. (2017). Application of Web-GIS for dissemination and 3D visualization of large-volume LIDAR data. In *The rise of big spatial data* (pp. 1-12). Springer, Cham.
- [26] Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N., & Crippa, B. (2016). Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78-89.
- [27] Othman, A. A., Al-Maamar, A. F., Al-Manmi, D. A. M., Liesenberg, V., Hasan, S. E., Al-Saady, Y. I., ... & Khwedim, K. (2019). Application of DInSAR-PSI technology for deformation monitoring of the Mosul dam, Iraq. *Remote Sensing*, 11(22), 2632.
- [28] Aobpaet, A., M. C. Cuenca, A. Hooper and I. Trisirisatayawong (2013) InSAR time-series analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 2969-2982.
- [29] Kim, J.-W., Z. Lu, Y. Jia and C. K. Shum (2015) Ground subsidence in Tucson, Arizona, monitored by time-series analysis using multi-sensor InSAR datasets from 1993 to 2011. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 107,126-141.
- [30] Curlander, J. C., & McDonough, R. N. (1991). *Synthetic aperture radar* (Vol. 11). Wiley, New York.
- [31] Li, T., Motagh, M., Wang, M., Zhang, W., Gong, C., Xiong, X., & Liu, J. (2019). Earth and rock-filled dam monitoring by high-resolution x-band interferometry: Gongming dam case study. *Remote sensing*, 11(3), 246.
- [32] The European space agency. Sentinel online Retrieved From <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/satellite-description/orbit>
- [33] ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีสัมพันธ์ และรศ.ดร.วรากร ไผ่เรียง. (2550). การพิบัติของเขื่อน. โครงการอบรมความปลอดภัยเขื่อนในสภาวะปกติและสภาวะอันตราย, โรงแรมมิราเคิลแกรนด์ คอนเวนชั่น, วันที่ 20-21 กันยายน 2550
- [34] Roque, D., Perissin, D., Falcão, A. P., Fonseca, A. M., Henriques, M. J., & Franco, J. (2015). Dams regional safety warning using time-series InSAR techniques. In *Second International Dam World Conference*, Portugal, April (pp. 21-24).
- [35] Qiu, Z., Jiao, M., Jiang, T., & Zhou, L. (2020). Dam structure deformation monitoring by GB-InSAR approach. *IEEE Access*, 8, 123287-123296.
- [36] The European space agency. Sentinel online Retrieved From <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath>