



## เทคโนโลยีการตรวจสอบภัยพิบัติหลุมยุบ

ศิวโรดม์ ศิริลักษณ์\*

สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0592 1444 ต่อ 2230 อีเมล: siwarot@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.11.002

รับเมื่อ 15 เมษายน 2563 แก้ไขเมื่อ 29 มิถุนายน 2563 ตอรับเมื่อ 30 กรกฎาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 2 พฤศจิกายน 2563

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

หลุมยุบเป็นภัยพิบัติที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดสร้างความเสียหายได้มหาศาล เทคโนโลยีในการตรวจสอบติดตามการดำเนินการของหลุมยุบในประเทศและต่างประเทศที่ได้นำมาแสดง คือ กรณีศึกษาการตรวจวัดด้วยวิธีสำรวจวัดสภาพด้านทานไฟฟ้าในจังหวัดสกลนคร การรับคลื่นไหวสะเทือนสะท้อนในจังหวัดนครศรีธรรมราช การรับคลื่นไหวสะเทือนภายในหลุมลึกที่เจาะลงดินในอิสราเอล การระบบการนำร่องด้วยคลื่นไหวสะเทือนในรัสเซีย การวัดสัญญาณสะท้อนกลับจากตัวนำไฟฟ้าด้วยขอบเขตของเวลาในรัฐโอไอวา การวัดสัญญาณสะท้อนกลับด้วยขอบเขตของเวลาจากเส้นใยนำแสงในจีน การตรวจวัดขอบการแทรกแซงระหว่างคลื่นวิทยุที่รวมตัวกันจากการสะท้อนที่ระยะทางแตกต่างกันผ่านเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ในสเปน การกวาดสัญญาณเลเซอร์ผ่านทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับในอิสราเอล การวัดระดับด้วยกล้องความแม่นยำสูงในเยอรมนี และการวัดในระบบมาตรเอียงในรัฐหลุยเซียนา ข้อดี-ข้อด้อยในแต่ละเทคโนโลยีได้ถูกนำเสนอ แนวคิดเพื่อการแก้ปัญหาหลุมยุบที่บริเวณถนนวิฑูในกรุงเทพฯ ควรใช้วิธีการวัดมาตรเอียงร่วมกับวิธีการตรวจวัดขอบการแทรกแซงระหว่างคลื่นวิทยุที่รวมตัวกันจากการสะท้อนที่ระยะทางแตกต่างกันผ่านเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ พร้อมระบบการรายงานผลเปิดเผยให้ประชาชนสามารถติดตามได้ ประโยชน์เมื่อติดตั้งจะสามารถทำนายเวลาเกิด ป้องกัน ออกมาตรการ วางงบประมาณซ่อมแซมล่วงหน้า เทคโนโลยีการตรวจสอบหลุมยุบสามารถช่วยชีวิตและทรัพย์สินให้ปลอดภัยได้

**คำสำคัญ:** หลุมยุบ ธรณีวิทยา ภัยพิบัติ การตรวจสอบทางธรณี



## Sinkhole Monitoring Technology

Siwarote Siriluck\*

School of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 0592 1444 Ext. 2230, E-mail: siwarote@hotmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.11.002

Received 15 April 2020; Revised 29 June 2020; Accepted 30 July 2020; Published online: 2 November 2020

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

Sinkhole disaster in a minute has inflicted huge damage. The monitoring technologies of sinkhole progression in Thailand and others countries have studied. The case studies are presented as the electrical resistivity survey in Sakon Nakhon, the reflection seimology in Nakorn Sri Thammarat, the nanoseismic with geophones inside boreholes at depth in Israel, the seismic navigation system in Russia, the time domain reflectometry system in Iowa, the Brillouin optical time domain reflectometry system in China, the differential interferometric synthetic aperture radar technology in Spain, the airborne laser scanning from drone in Israel, the high precision levelling in Germany and the tilts meter in Louisiana. The strength and weak points in any technologies are reported. The idea for the sinkhole monitoring at the radio road, Bangkok should use the integrated method of the tilts meter and the differential interferometric synthetic aperture radar technology with the online public report. The advantage of this technology can help in prediction, protection and the estimated advance restoration budget. Finally, The sinkhole monitoring technology can help the life and assets to the safety.

**Keywords:** Sinkhole, Geology, Disaster, Geomonitoring

## 1. บทนำ

หลุมยุบ (Sinkhole) คือ พื้นผิวเดิมที่ได้พังทลายทรุดตัวลง เกิดเป็นหลุมได้หลายขนาดและหลายรูปร่าง สร้างความเสียหายได้อย่างรุนแรงแก่ทรัพย์สินและสิ่งมีชีวิตได้ การเกิดโดยธรรมชาติและปัจจัยเร่งจากกิจกรรมของมนุษย์ มีผลต่อการเกิด สถานที่เกิด พบได้ทั้ง ในเมือง ป่า ภูเขาหินปูน ชายหาดหินปูน ในทะเลสาบน้ำจืด บริเวณเหนือโดมเกลือ ในมหาสมุทร และเหมืองแร่เก่า ซึ่งเงื่อนไขในการเกิดจะแตกต่างกันไปตามปัจจัยที่เกี่ยวข้อง [1], [2]

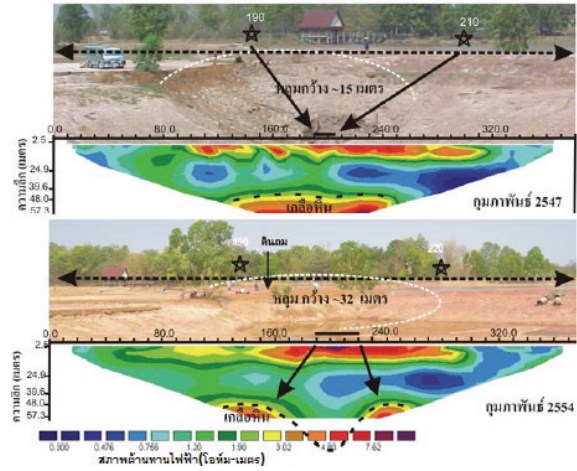
การเกิดโดยมากจะเริ่มจากการกัดกร่อนจากการละลาย การเคลื่อนย้าย อนุภาคที่เป็นโครงสร้างรองรับน้ำหนักด้านล่าง พื้นผิวอย่างค่อยเป็นค่อยไป จากนั้นเมื่อถึงจุดวิบัติ (Buckling Point) มักจะเกิดในทันทีทันใด [3] สาเหตุของการเกิด ปัจจัยที่มีผลกระทบ การประเมินความเสียหาย การวัดขนาดของหลุมยุบ การแก้ไข และการเยียวยาหลังการเกิดหลุมยุบจะไม่กล่าวถึงในบทความนี้ เป้าหมายของบทความนี้จะเน้นไปยังเทคโนโลยีในการติดตาม ประเมิน วัตถุประสงค์ก่อนการเกิดจุดวิบัติของกรณีหลุมยุบจากต่างประเทศ เพื่อจะเป็นแนวทางในการประยุกต์เทคโนโลยีเหล่านั้นมาใช้กับประเทศไทยดังกรณีต่างๆ ที่มีความเหมาะสมแตกต่างกันไป [4]

## 2. กรณีศึกษาการใช้เทคโนโลยีในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของหลุมยุบในประเทศไทย

หลุมยุบในประเทศไทย สามารถแบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้คือ หลุมยุบเกิดจากการละลายของเกลือใต้ดินแถบภาคอีสาน [5] หลุมยุบที่เกิดจากหินใต้ดินที่มีการละลายน้ำได้ เช่น หินคาร์บอเนต-หินฟอสเฟตแถบภาคใต้ [6] และหลุมยุบที่เกิดจากการบริเวณน้ำบาดาลมากกว่าการซึมเข้าในแถบภาคกลาง [7] ดังเช่น

### 2.1 กรณีติดตามหลุมยุบที่จังหวัดสกลนคร ด้วยเทคนิคการสำรวจวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity Survey)

การติดตามหลุมยุบผิวดิน และโพรงใต้ดิน ในพื้นที่บริเวณบ้านบ่อแดง อำเภอบ้านม่วง จังหวัดสกลนคร ตลอด

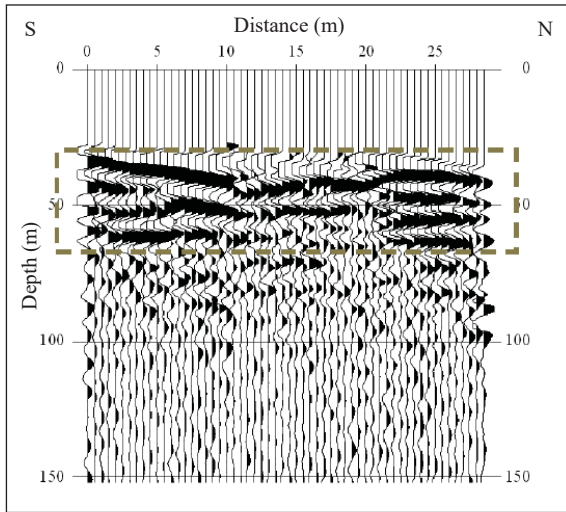


รูปที่ 1 หลุมยุบ และภาพตัดขวางใต้ผิวดิน ที่บ้านบ่อแดง ที่แปลความหมายจากข้อมูลการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ของเดือนกุมภาพันธ์ 2547 (คูบน) และเดือนกุมภาพันธ์ 2554 (คูล่าง) [5]

ช่วงปี 2544-2554 ด้วยวิธีใช้การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลุมยุบ ร่วมกับการใช้ข้อมูลสภาพต้านทานไฟฟ้าจากผิวดิน ถึงความลึกประมาณ 60 เมตรใต้ผิวดิน ผลการทดลองพบว่า หลุมยุบที่ผิวดินมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพบว่า มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ระหว่างความกว้างของหลุมยุบและระยะเวลา การแปลผลของสภาพต้านทานทางไฟฟ้าจากการเปลี่ยนแปลงชั้นโพรงใต้ดินพบว่า เกิดการละลายออกไปของเกลือหินที่ผิวดินขยายตัวต่อเนื่อง ดังรูปที่ 1 พบการเว้าลึกเป็นรูปร่างของเกลือหินทั้งแนวตั้งและแนวนอน จากข้อมูลในการศึกษาแก้ไขโดยใช้ดินมาถมซึ่งไม่ใช่การแก้ที่ต้นเหตุ เพราะบริเวณพื้นที่นี้มีการประกอบอาชีพการทำนาเกลือสินเธาว์ โดยกระบวนการคือ สูบน้ำเกลือจากใต้ดินขึ้นมาทำการระเหยเอาเกลือสินเธาว์ [5] เทคโนโลยีนี้เหมาะกับการทำนายขนาดของหลุมยุบพื้นผิวและโพรงที่ไม่ลึกเกินไป แต่ยังไม่สามารถติดตามได้แบบเวลาจริง (Realtime)

### 2.2 กรณีติดตามหลุมยุบที่จังหวัดนครศรีธรรมราช ด้วยวิธีคลื่นไหวสะเทือนสะท้อน (Reflection Seismology)

หินซัลเฟตที่โดนละลายจนกระทั่งเกิดหลุมยุบที่ ตำบล



รูปที่ 2 ตัวอย่างคลื่นสะท้อนที่พบว่าที่ความลึก 32, 50 และ 60 เมตร ซึ่งมีความหนา 25 ถึง 30 เมตร นั้นเป็นพื้นที่หลุมยุบ [6]

ท่ายาง อำเภอทุ่งใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช การใช้ข้อมูลของสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยมีวิธีคลื่นไหวสะเทือนสะท้อนแล้วแสดงผลแบบกราฟดังรูปที่ 2 เพื่อทำการตรวจวัดพื้นที่หลุมยุบในระนาบ 2 มิติ ที่เกิดจากการละลายของแคลเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต ที่มีการเทเยียงตามสภาพทางธรรมชาติในชั้นใต้ดิน ร่วมกับวิธีวัดดัชนีการอิ่มตัวของน้ำใต้ดินพบว่า การกัดเซาะหินซัลเฟตใต้ดินยังคงดำเนินไป พร้อมทั้งน้ำใต้ดินที่ถูกซักตัวอย่างมานั้นยังมีสารละลายหินซัลเฟตไม่อิ่มตัว ดังนั้นน้ำใต้ดินยังมีความสามารถในการละลายหินได้ ข้อมูลจากผลการวิจัยนี้ได้ถูกนำมาใช้เพื่อชาวบ้านที่อาศัยในบริเวณใต้ การใช้วิธีคลื่นไหวสะเทือนสะท้อนควรใช้ควบคู่กับวิธีอื่นด้วยเพื่อช่วยในการแปลผล เช่น เทคนิคการสำรวจวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า การวัดความอิ่มตัวของน้ำใต้ดิน วิธีนี้ยังไม่สามารถติดตามได้แบบเวลาจริงเช่นกัน

### 3. กรณีศึกษาในการใช้เทคโนโลยีในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของหลุมยุบในต่างประเทศ

การป้องกันหลุมยุบไม่ให้เกิดอาจจะไม่สามารถทำได้ แม้แต่ในประเทศกลุ่ม G8 ความพยายามที่จะใช้เทคโนโลยีเพื่อ

ติดตามตรวจสอบข้อมูลการดำเนินของหลุมยุบที่กำลังดำเนินไปอย่างช้าๆ นั้น มีหลักการเพื่อสามารถใช้ข้อมูลเหล่านั้นตัดสินใจในการใช้มาตรการใหม่ๆ กับพื้นที่ที่คาดว่าจะเกิดหลุมยุบ [8] หลีกเลี่ยงการใช้ ลดความถี่การใช้งานพื้นที่เดิม ดำเนินการเสาะหาพื้นที่ใหม่ และเพิ่มปริมาณการผลิตที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศจากพื้นที่ใหม่และลดกำลังการผลิตของพื้นที่เดิมจากปัญหาหลุมยุบ [9] พยากรณ์การเกิดในช่วงเวลาที่แคบลงได้อย่างถูกต้อง [2] วางแผนและเตรียมงบประมาณเพื่อซ่อมแซม ซ่อมบำรุง คำนวณถึงปริมาณการยุบพื้นที่การยุบ ความลึกของหลุมยุบได้ [10] ป้องกันและลดความสูญเสียด้านเศรษฐกิจ และการสูญเสียของเวลาในภาพรวม (Total Downtime Reducing) [10] จากประโยชน์ข้างต้นหากมีการใช้เทคโนโลยีในการติดตามหลุมยุบ เมื่อเหตุการณ์หลุมยุบจำเป็นต้องเกิดขึ้นจริงในช่วงเวลาที่อยู่ในการทำนายจะสามารถเพิ่มความปลอดภัย ลดความสูญเสียทางเศรษฐกิจได้ และสามารถติดตามการเกิดได้แบบเวลาจริง

#### 3.1 กรณีติดตามหลุมยุบที่ทะเลมรณะ ด้วยเทคนิคเครื่องรับคลื่นไหวสะเทือนภายในหลุมลึกที่เจาะลงดิน [11]

การชะละลายของแร่เกลือหินไฮไลต์ ตามแนวหาดของทะเลมรณะ (Dead Sea) ฝั่งประเทศอิสราเอล เกิดจากสภาพธรรมชาติและมีความต่อเนื่องมาก่อนที่จะถูกพัฒนามาเป็นแหล่งท่องเที่ยวและพื้นที่ใช้อยู่อาศัย สภาพหลุมยุบที่เกิดขึ้นเกิดทั่วบริเวณดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า พื้นผิวหน้าเป็นหน้าราบของชั้นโคลน (Mud Layer) ความหนาประมาณ 35 ถึง 40 เมตร ซึ่งแทรกปะปนด้วยหินกรวดผิวหยาบ โดยผิวของหินประเภทนี้จะเป็กรวดที่เชื่อมแน่นจากตะกอนน้ำพา รูปพัด (Cohesive Gravels from Alluvial Fan) ปัญหาเกิดจากน้ำมีการซึมลงไปทำลายชั้นเกลือด้านล่าง เมื่อเวลาผ่านไปจนกระทั่งโครงสร้างรับน้ำหนักด้านบนไม่ไหวจึงยุบลงไป ความจำเป็นที่ต้องใช้เทคโนโลยีการติดตามหลุมยุบเกิดขึ้นเมื่อพื้นที่ที่เกิดหลุมยุบขยายตัวเข้าสู่เขตของรีสอร์ทที่เป็นแหล่งท่องเที่ยว การตรวจจัดการเปลี่ยนแปลงของธรณีพิบัตินี้ได้เลือกใช้เครื่องรับคลื่นไหวสะเทือน ภายในหลุมลึกที่เจาะลงดิน (Geophones Inside Boreholes at Depth)



รูปที่ 3 หลุมยุบที่เกิดเป็นแนวของขอบพื้นที่รีสอร์ท ที่ทะเลมรณะ ฝั่งประเทศอิสราเอล [11]

คือ จะมีการเจาะพื้นผิวลงไปฝังกระบอกภายในหลุมใต้ชั้นโคลนลึกประมาณ 15 ถึง 20 เมตร แล้วบรรจุเครื่องรับคลื่นไหวสะเทือนชนิดตรวจวัดได้ 5 แกน ไว้ในนั้น ติดตั้งห่างกันประมาณ 100 ถึง 150 เมตร ทั่วพื้นที่ที่ติดตาม โดยจุดที่ใกล้รีสอร์ทจะติดตั้งถี่กว่าจุดที่ไม่มีผู้อยู่อาศัย ขอบข่ายของการรับคลื่นได้สามารถตรวจสอบได้ห่างประมาณ 1 กิโลเมตร โดยเทคนิคนี้ที่มีการฝังลงดินและบรรจุไว้ในกระบอก เพื่อลดคลื่นเสียงรบกวนที่ไม่ใช่สัญญาณจากเครื่องส่งสัญญาณการเก็บผลการเปลี่ยนแปลงโดยปกติทำทุกสองเดือนโดยจะเก็บเครื่องรับคลื่นไหวสะเทือนขึ้นมา นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์สภาพการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างธรณีในบริเวณ หากมีการวิเคราะห์พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ก็จะเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์เร็วขึ้นจากทุกสองเดือนเป็นทุกเดือน ทุกสองสัปดาห์ หรือทุกสัปดาห์

หลักการทำงานของเทคโนโลยีนี้จะมีการปล่อยคลื่นไหวสะเทือนระดับนาโน (Nanoseismic) จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ ซึ่งเป็นความถี่ที่แน่นอนและคงที่ สัญญาณจะถูกปล่อยจากจุดเดิมโดยเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นโคลนและชั้นเกลือไปแล้วเกิดการส่งผ่านคลื่นตามตัวกลาง เมื่อตัวกลางมีสภาพแตกต่างไปจากเดิมจะพบว่า สัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงการพบความผิดปกติจะนำไปสู่การประเมินถึงรอยแตก โพรงหรือการแทรกเข้าไปของอากาศในชั้นเกลือที่เพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงที่มากจะมีความสัมพันธ์กับการเกิดหลุมยุบนั่นเอง ตำแหน่งจุดฝังเครื่องรับคลื่นไหวสะเทือนที่มีวางไว้ทั่วพื้นที่นั้น จะสามารถประเมินได้ว่าพื้นที่

ระหว่างคู่ของเครื่องรับคลื่นไหวสะเทือนที่คู่หนึ่งๆ มีอัตราการเกิดโพรงในชั้นเกลือมากกว่าหรือน้อยกว่าคู่เครื่องรับคลื่นไหวสะเทือนอีกคู่หนึ่ง ความสัมพันธ์นี้จะทำให้ทราบความสัมพันธ์ของปริมาตรอากาศที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่ จากงานวิจัยนี้ทีมวิจัยพบว่า สามารถทราบล่วงหน้าของการเกิดหลุมยุบล่วงหน้าระดับปี

ข้อดีคือ ระบบนี้มีราคาแพง และต้องฝังดินในระดับที่ลึก กระบวนการเก็บผลสัญญาณและการแปลผลการวิเคราะห์แผนที่สัญญาณที่มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ที่ต้องใช้ผู้มีความเชี่ยวชาญและซอฟต์แวร์แปลผล สถานที่ที่จะเกิดหลุมยุบรู้ได้แค่เพียงจะอยู่ระหว่างบริเวณตรวจวัดของเครื่องรับคลื่นไหวสะเทือนคูใด แต่ไม่สามารถชี้เป็นจุดที่แน่นอนได้อย่างชัดเจน ถึงตำแหน่งและความลึก

### 3.2 กรณีติดตามเหมืองเบอร์เรชนิกกิ ประเทศรัสเซีย ด้วยระบบการนำร่องด้วยคลื่นไหวสะเทือน [12]

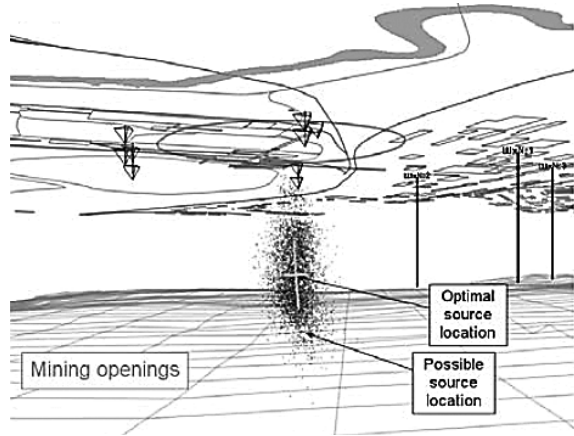
การทำเหมืองใต้ดินแบบห้องสลับลูกค้ำยัน (Room & Pillar) ที่ความลึกกว่า 100 ถึง 200 เมตร เพื่อนำเอาแร่เกลือโปแตชมาใช้ประโยชน์ เหมืองมีศักยภาพในเชิงพาณิชย์แร่เดียวกันกับที่แหล่งแร่บำเหน็จณรงค์ จังหวัดชัยภูมิ

ความเสียหายครั้งใหญ่ที่เกิดขึ้น เกิดเมื่อน้ำท่วมด้านบนที่ชั้นดิน น้ำได้มีการวิ่งเข้าสู่ชั้นหินอุ้มน้ำ (Aquifer Layer) และซึมผ่านชั้นที่กั้นน้ำใต้ลงไปละลายเสาเกลือ ดังแสดงในรูปที่ 4 การติดตามผลของหลุมยุบด้วยระบบการนำร่องด้วยคลื่นไหวสะเทือน (Seismic Navigation System; SNS) ซึ่งใช้การเก็บข้อมูลของเครื่องรับคลื่นไหวสะเทือน 6 แกน ที่ติดตั้งใต้พื้นลึกประมาณ 10 ถึง 50 เมตร โดยบรรจุในกระบอก ระบบนี้จะเก็บข้อมูลได้ และนำไปประมวลผลกับระบบคอมพิวเตอร์เพื่อการติดตามการเปลี่ยนแปลงในเวลาจริง ครอบคลุมพื้นที่ 50 ตารางกิโลเมตร พื้นที่เฉลี่ยระหว่างตัวรับข้อมูลประมาณ 1 กิโลเมตร แหล่งกำเนิดสัญญาณคลื่นไหวสะเทือน ขนาด 1 กิโลจูล ความถี่ 0.5 ถึง 100 เฮิรตซ์ ผลของสัญญาณที่ตรวจวัดได้จะทำให้ทราบตำแหน่งน้ำไหลเข้าบริเวณที่คาดว่าจะถล่มของพื้นผิวบน นำไปสู่การแจ้งเตือนล่วงหน้าและการอพยพผู้ปฏิบัติงานและเครื่องจักร รวมถึงอัตราการขยายตัวของ





รูปที่ 4 การเกิดหลุมยุบครั้งใหญ่ในเมืองเกลือบโปแตซใน แคว้นเปิร์ม ทำให้เมืองต้องใช้กระบวนการติดตาม การเกิดหลุมยุบแบบเวลาจริง [13]



รูปที่ 5 ภาพจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์  $\nabla$  คือจุดปล่อย คลื่นสัญญาณรอบวงขอบเขตของแนวโน้มที่จะเกิด หลุมยุบ จุดกลุ่มหมอกคือบริเวณที่แสดงโอกาสของ หลุมยุบจะเกิดขึ้น [12]

พื้นที่หลุมยุบเดิมจะถูกนำมาคำนวณร่วมด้วย

หลักการทำงานคือ ในเหตุการณ์ปกติจะทำการระเบิด ของคลื่นใต้ดินสองสัปดาห์ต่อครั้งเป็นประจำ แต่ถ้ามีความเสี่ยงที่จะเกิดหลุมยุบ และต้องการความแม่นยำจากการประเมินเพิ่ม หรือหาตำแหน่งที่แน่นอน จากการบันทึก ก็ได้ทำการปล่อยคลื่นเสียงหลายครั้งต่อชั่วโมง เพื่อให้ได้ ข้อมูลที่มากขึ้นเพื่อนำไปใช้ประโยชน์การทำแบบจำลองทาง คอมพิวเตอร์เพื่อแปลผล ดังรูปที่ 5

ระบบนี้จะทำให้ทราบล่วงหน้าในการเกิดหลุมยุบล่วงหน้า แบบเวลาจริง และในเหตุการณ์ปกติจะทราบผลทั้งสอง สัปดาห์ ข้อด้อยคือ ระบบนี้มีราคาแพงมากและต้องมีทีม ผู้มีความเชี่ยวชาญแปลวิเคราะห์ผล ดูแลอย่างน้อยทุกสอง สัปดาห์

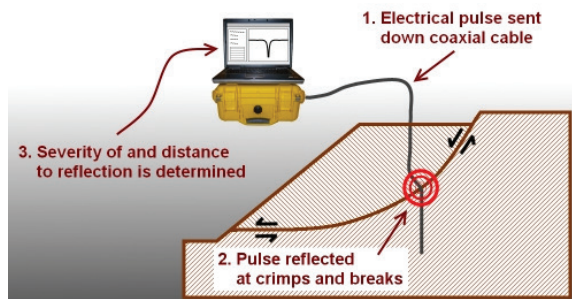
### 3.3 กรณีติดตามถนนหมายเลข US.18 ด้วยเทคนิคการวัด สัญญาณสะท้อนกลับด้วยขอบเขตของเวลาแบบเวลาจริง [14]

การเจาะทั่วบริเวณเป็นระบบตารางทั่วถึงในแถบตะวันออก เียงเหนือของรัฐโอไอโอวา ภายหลังจากเกิดหลุมยุบในปี 2004 นอกเหนือจากการซ่อมแซมแล้ว การศึกษาจากข้อมูลหลุม

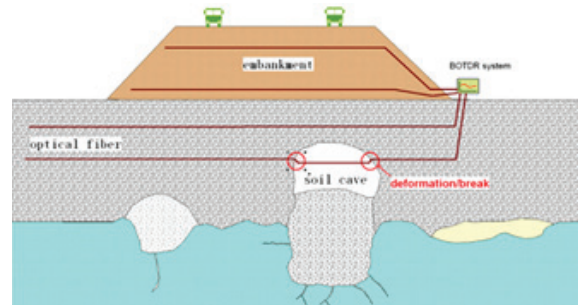
เจาะได้พบสาเหตุคือ การฝังของหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนต ที่ถูกน้ำทำลายตามปฏิกิริยาเคมี โดยหินปูนนี้อยู่ด้านล่าง ที่ระดับประมาณ 10 ถึง 15 เมตร เหนือชั้นน้ำจะเป็นหินเชลล์ ที่มีหินกรวดมนอยู่ประปราย ถัดขึ้นมาเป็นชั้นดินและชั้นบดอัด ของถนนตามมาตรฐานการสร้างถนนของอเมริกา

หินปูนถูกกัดเซาะโดยน้ำตามธรรมชาติ เมื่อเกิดโพรง จึงทรุดตัว ไม่สามารถรับน้ำหนักหินเชลล์ด้านบนจึงทรุดตาม ลงมา ท้ายที่สุดก็ทำให้ชั้นการบดอัดของการทำถนนรวมถึง คอนกรีตยุบตัวลงมา การแก้โดยการย้ายแนวถนนไม่สามารถ ทำได้เพราะภูมิภาคแถบนี้เป็นสภาพธรณีวิทยาแบบเดียวกัน การติดตามเพื่อบอกเตือนถึงการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค การวัดสัญญาณสะท้อนกลับด้วยขอบเขตของเวลา (Time Domain Reflectometry; TDR) ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยปกติ เทคนิคนี้จะใช้เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลง สภาพธรณีวิทยา การพังทลายของระนาบเอียงในงานเหมืองแร่

หลักการทำงาน คือ การวัดการสะท้อนกลับของ สัญญาณภายในสายไฟตัวนำ ค่าที่ได้จากการสะท้อนนี้จะมี ค่าที่สม่ำเสมอและจะมีการถูกดูดซับหมดที่ปลายสาย หาก มีความผิดปกติในสายตัวนำนั้นก็เกิดการเปลี่ยนแปลงใน ค่าความต้านทานเมื่อต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับ (Impedance)



รูปที่ 6 หลักการวัดสัญญาณสะท้อนกลับด้วยขอบเขตของเวลาที่ใช้ในการติดตามผนังบ่อเหมืองที่มีการวิบัติรูปโค้ง (Circular Failure) [15]



รูปที่ 7 หลักการทำงานของการทำงานวัดสัญญาณสะท้อนกลับด้วยขอบเขตของเวลาจากเส้นใยนำแสง (BOTDR) [18]

ซึ่งจะพบการสะท้อนของสัญญาณไปยังจุดกำเนิดสัญญาณ สัญญาณการสะท้อนกลับวัดได้ทั้งรูปร่างคลื่น ความสูงของคลื่นที่เข้ามา ระยะเวลาที่ส่งออกไปและรับเข้ามา รูปร่างที่ผิดเพี้ยนไป ความสม่ำเสมอของคลื่นหรือคาบของสัญญาณ ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไป คำนวณกลับเพื่อหาค่าการสูญเสียพลังงานในสายไฟตัวนำนั้นได้อีกด้วย การแปลผลจะรู้ว่าตำแหน่งที่ตัวนำไฟฟ้ามีปัญหาอยู่จุดใด เพราะจะรู้ความยาวของตัวนำไฟฟ้า เครื่องกำเนิดสัญญาณที่ใช้ส่งก็ใช้พลังงานน้อยเพราะเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่วิ่งในตัวนำ

จากหลักการนี้เอง การวางตัวนำตลอดสายได้ระดับของดินฐานถนน การปล่อยกระแสไฟฟ้าเพื่อให้อิเล็กตรอนวิ่งตลอดสายในปริมาณน้อยตลอดเวลา จะทำให้ได้ค่าการสะท้อนกลับที่ต้องการแบบเวลาจริง ตามแนวของถนนที่ฝังสายไฟตัวนำไว้ การวางชุดสายไฟตัวนำนี้ไปตลอดพื้นที่มีปัญหาประมาณ 8 กิโลเมตร ได้ทำการเดินสายทั้งสองทางไปและช่องทางกลับของถนนทั้งสองฝั่ง

ข้อดีของวิธีนี้คือ ทราบตำแหน่งของจุดความผิดปกติของธรณีวิทยาภาพ แต่ไม่ทราบขนาดของจุด ไม่ทราบพื้นที่จุด ไม่ทราบปริมาณจริงของหินปูนที่โดนกัดเซาะด้านล่าง ไม่ทราบความลึกของโพรง และเมื่อเกิดความผิดปกติในสายไฟตัวนำต้องทำการมาตรวจสอบและซ่อมบำรุงทันที หากเพิกเฉยต่อจุดที่ผิดปกติ บริเวณที่ต้องการตรวจวัดหลังความยาวที่เกิดความผิดปกติแล้วนั้น จะเกิดสัญญาณผิดปกติเพราะสัญญาณที่สะท้อนกลับมาถูกรบกวน [16]

3.4 กรณีติดตามถนนกัญหลิน-หยางโจว ประเทศจีน ด้วยการวัดสัญญาณสะท้อนกลับด้วยขอบเขตของเวลาจากเส้นใยนำแสงแบบเวลาจริง [17]

งานซ่อมบำรุงและพัฒนาถนนความยาว 66 กิโลเมตรของภูเขาหินปูนพบว่า อุบัติเหตุของหลุมยุบในปี 2004 เกิดขึ้นหลายๆ จุด การศึกษาเพื่อมุ่งไปยังการติดตามและการตรวจวัดเป็นหลัก เพื่อการซ่อมบำรุงถนนก่อนการถึงจุดวิบัติการติดตาม เพื่อบอกเตือนถึงการเปลี่ยนแปลงด้วยการวัดสัญญาณสะท้อนกลับด้วยขอบเขตของเวลาจากเส้นใยนำแสง (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry; BOTDR) ดังรูปที่ 7

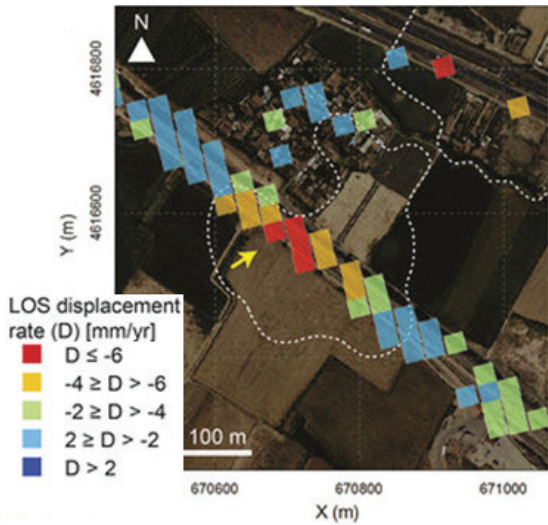
เทคนิคนี้คือ การวัดสัญญาณสะท้อนกลับด้วยขอบเขตของเวลาที่ไม่ใช่ตัวนำไฟฟ้า แต่จะใช้สัญญาณเลเซอร์ส่งผ่านไปตามเส้นสายใยนำแสง ตามหลักการกระเจิงแสงของ Brillouin (Brillouin Scattering) ซึ่งจะแสดงสัญญาณจากปฏิกริยาระหว่างคลื่นแสงและคลื่นเสียง ดังนั้นถ้ามีความผิดปกติของบริเวณจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณการแปลผลสัญญาณก็จะสามารถแปลผลได้กับจำนวนเส้นใยนำแสง ระดับความลึก ระยะห่าง โดยการวางเส้นใยนำแสงได้ถูกวางทั้งในชั้นดินฐานถนน และชั้นหินปูน การปล่อยสัญญาณตลอดเวลา จะทำให้ได้ค่าการสะท้อนกลับที่ต้องการแบบเวลาจริงตามแนวของถนน การวางหลายระนาบ ด้วยระนาบละมากเส้นจะสามารถสร้างโมเดลประมาณการขนาดหลุม ความลึก ปริมาตร ตำแหน่ง ได้อย่างแม่นยำกว่าการวาง

เพียงชุดสายใยนำแสงเดียว

ข้อดีของวิธีนี้ คือหลักการกระเจิงแสงจะมีความอ่อนไหวและการรบกวนของสภาวะที่มีผลจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป การสั่นสะเทือนจากการจราจร และหากใช้ระนาบน้อยเส้นจะมีการคาดการณ์ได้ผิดพลาดจากปัจจัยของธรณีวิทยาภาพถ่าย [19]

### 3.5 กรณีติดตามหุบเขาอีโบรวกับการตรวจวัดขอบการแทรกแซงระหว่างคลื่นวิทยุที่รวมตัวกัน จากการสะท้อนที่ระยะทางแตกต่างกันผ่านเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ [20]

บริเวณพื้นที่หุบเขาอีโบรวในสเปนได้เกิดหลุมยุบไปแล้ว ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายอย่างร้ายแรงต่ออาคารบ้านเรือนและโครงสร้างคมนาคม พื้นที่บริเวณนี้ถูกรองรับด้วยรอยเลื่อนตะเข็บของแร่เกลือหินที่ระเหยได้อยู่ตลอดเวลา จากการศึกษาพบว่า มีหลุมยุบเกิดขึ้น 48 จุด ครอบคลุมพื้นที่ 40.8 ตารางกิโลเมตร ขนาดความเสียหายที่ร้ายแรงยังคงมีการดำเนินไปอยู่ การยุบตัวที่พบได้ตลอด จึงได้นำเทคนิคของการตรวจวัดขอบการแทรกแซงระหว่างคลื่นวิทยุที่รวมตัวกันจากการสะท้อนที่ระยะทางแตกต่างกันผ่านเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar; DInSAR) ที่ใช้หลักการของคลื่นวิทยุส่งแล้วรับการสะท้อน เพื่อนำไปสร้างภาพพื้นผิวที่มีความแม่นยำในระดับ 2 ถึง 3 เซนติเมตร พื้นผิวที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะถูกนำไปเทียบกับข้อมูลเดิมในช่วงเวลาต่างๆ ในกรณีนี้ ดาวเทียมสามตัวเหนือพื้นที่ของสเปน คือ ERS, ENVISAT ASAR และ ALOS PALSAR ได้ทำการยิงคลื่นวิทยุและรับสัญญาณสะท้อนแล้วสร้างภาพในช่วงเวลา 1150 ถึง 2695 วัน โดยความละเอียดของหน่วยแสดงภาพ (Pixel Unit) หมายถึงภาพที่มีความกว้างยาว ประมาณ 25 ถึง 90 เมตร ดังรูปที่ 8 ขนาดของหน่วยแสดงภาพที่มีความถี่กว่าจะเป็นพื้นที่ที่มีความสำคัญแผนภาพระดับความสูงทั่วบริเวณแสดงการประเมินเพื่อการติดตาม จากนั้นข้อมูลเหล่านั้นก็จะถูกส่งไปใช้ในกระบวนการทางงานมหาตไทยแบบวันต่อวัน จุดที่เสี่ยงจุดใดที่ต้องการความแม่นยำที่สูงมากขึ้นก็จะใช้ดาวเทียมอีกสองดวงคือ TerraSAR-X และ COSMOSkyMed ที่ใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ



รูปที่ 8 พื้นที่ที่มีอัตราการยุบตัวในหน่วยมิลลิเมตรต่อปีแทนที่ด้วยระดับสีที่แตกต่างกัน [20]

มาร่วมช่วยในการให้ภาพจริงแบบเวลาจริง

ข้อดี คือ การขาดข้อมูลเฉพาะที่สำคัญจริงๆ เกี่ยวกับหลุมยุบ การที่ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อหาค่าที่ใช้จากจุดทับซ้อนจะไม่มีความแน่นอน การได้ภาพของต้นไม้ พืชที่ปกคลุมจะไม่ได้ระดับของพื้นผิวจริง การรอคอยเส้นทางพาดผ่านของดาวเทียมที่เคลื่อนผ่านสัมพันธ์กับความหยابของข้อมูล ข้อมูลจะถูกรายงานเพียงหลุมยุบที่มีพื้นที่มากกว่า 2,500 ตารางเมตร และการตรวจวัดของอัตราการทรุดตัวที่หยาบคือ 2 ถึง 17 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งข้อมูลตรงนี้อาจไม่ทันทั่วทั้ง

### 3.6 กรณีติดตามของ 4 หลุมยุบ ในอิสราเอล ด้วยการกวาดสัญญาณเลเซอร์ผ่านทางอากาศ จากเทคนิคจากอากาศยานไร้คนขับ [21]

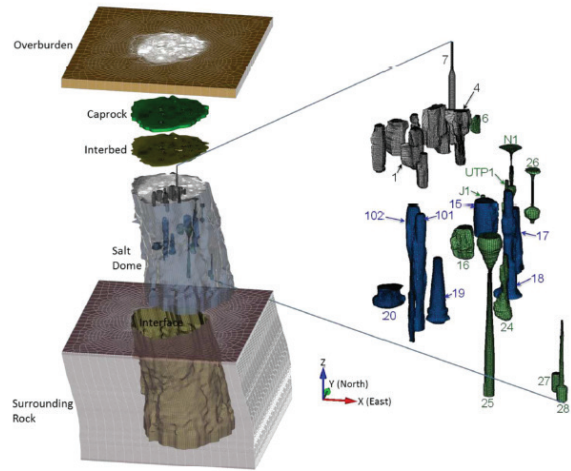
การติดตามที่ละเอียดมากขึ้นที่ทะเลทราย จะใช้เทคนิคของการใช้แสงเลเซอร์ที่ติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับส่งคลื่นแสงกวาดลงไปทั่วและรับสัญญาณคลื่นที่กระทบพื้นแล้วกลับมา ระบบจะบันทึกค่าที่กลับนั้นไว้ (Light Detection and Ranging; LiDAR) การเคลื่อนที่ไปกลับต่อหนึ่งพื้นที่จะทำให้ได้ข้อมูลต่อพื้นที่มากขึ้น ข้อมูลทุกจุดจะนำไปสร้าง



ความสัมพันธ์กับพิกัดตำแหน่งบนพื้นโลกจากข้อมูลดาวเทียม ข้อมูลจะนำไปเปรียบเทียบกับเมื่อมีข้อมูลซ้อนทับ และสามารถสร้างความสัมพันธ์กับข้อมูลข้างเคียงได้ดีขึ้น การเก็บข้อมูลนั้น ใช้โดรนบินเหนือพื้นที่ระดับความสูงประมาณ 500 เมตร ข้อมูลจะถูกเก็บที่ 4 จุดต่อตารางเมตร ระดับความสูงที่เก็บข้อมูลนั้นมีความคลาดเคลื่อน  $\pm 10$  เซนติเมตร ข้อมูลจำนวน 250 จุด สามารถสร้างภาพจากพื้นที่ของ หลุมยุบที่ขนาดมากกว่า 1 เมตร และลึก 25 เซนติเมตร ได้ แต่พื้นที่ที่ละเอียดกว่านั้น ยังไม่สามารถเก็บรายละเอียดได้ดี รายละเอียดของชั้นดินที่เปลี่ยนไป มีความชัดเจนเปรียบเทียบ ได้ถึงก่อนและหลังการถล่มได้ แต่ว่าการทำในพื้นที่ใหญ่ ยังเป็นปัญหาเมื่อใช้ความละเอียดที่สูง ข้อด้อยคือ การจะ ประเมินพื้นที่หลุมยุบที่ถูกปกคลุมด้วยหญ้า ต้นไม้ที่แผ่ กิ่งก้านสาขาจะเป็นไปได้ยาก ราคาแพงเมื่อเทียบกับความ แม่นยำและค่าจ้างของผู้บินโดรนที่มีความสามารถก็เป็นอีก ปัจจัยหนึ่ง

### 3.7 กรณีติดตามหลุมยุบ 5 จุด ในแฟรงเกนเฮาเซน เยอรมนี โดยกล้องระดับความแม่นยำสูง [22]

งานติดตามหลุมยุบ 5 หลุม ในพื้นที่รอยต่อของ หินปูนใต้ดินที่ถูกน้ำเซาะ (Karst) การวัดระดับด้วยระบบ อิเล็กทรอนิกส์จากไม้ระดับที่ติดตั้งที่คอมพิวเตอร์ สามารถอ่านได้ เครื่องอ่านอิเล็กทรอนิกส์จะให้ค่าที่แม่นยำ บริเวณหลุมยุบนี้อยู่ในสภาพที่ได้เกิดการยุบไปแล้ว โดยใน ปัจจุบันยังมีการดำเนินไปของการยุบตัวอยู่ การสำรวจนั้นมีความแม่นยำจากการศึกษาผลพบว่า ได้ค่ายุบตัวสูงสุดเป็น 26.1 เซนติเมตรต่อปี และค่ายุบตัวสูงสุดเฉลี่ยตามแนวแกนตั้ง ทัวบริเวณศึกษาเป็น 11.8 เซนติเมตรต่อปี โดยข้อมูลการศึกษา จาก 120 ตัว จากหมุดวัด ซึ่งทำการวัด 4 ครั้งต่อปี โดยไม่ย้าย หมุดออกบริเวณทั่วพื้นที่ศึกษา ผลของการศึกษาใช้คำนวณ หาปริมาตรของการชะละลายเกลือใต้ดินพบว่า ที่หลุมยุบที่มี ขนาดใหญ่มีอัตราการละลายของเกลือที่ 10,900 ลูกบาศก์ เมตรต่อปี แต่พบวิเคราะห์ที่ซับซ้อนพบว่า วิธีนี้การคำนวณ ของอัตราการละลายของเกลือจะให้ค่าที่ผิดพลาดเพราะ การยุบตัวที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากชั้นดิน หรือชั้นหินปูนก็มี



รูปที่ 9 แบบจำลองเป็นส่วนๆที่มีขอบเขตจำกัด จากชุด ข้อมูล ที่แยกชั้นเกลือ ชั้นหินข้างเคียง ชั้นหินบนชั้น เกลือเปลือกดิน และส่วนชั้นหินปิดด้านบน (Cap Rock) ที่พื้นที่ Bayou Choctaw [23]

ความเป็นไปได้

### 3.8 กรณีศึกษาแหล่งปิโตรเลียมที่ยุติการผลิต ที่รัฐหลุยเซียนา ด้วยวิธีการวัดมาตรเอียง [23]

การถล่มของบริเวณที่ศึกษานี้ เกิดหลุมยุบและมีน้ำ เข้าไปซึ่งจนกลายเป็นทะเลสาบที่ไม่ได้เกิดจากธรรมชาติคือ ทะเลสาบแคเวียร์น การถล่มของโดมเกลือที่ถูกชะละลายใต้ดิน และการดึงเอาน้ำมันดิบและแก๊สในชั้นที่ต่ำกว่าโดมเกลือ ดังรูปที่ 9 เมื่อบริษัทผลิตปิโตรเลียมยุติการผลิตในพื้นที่ต่อมา จึงเกิดการทรุดตัว โดยครั้งแรกที่บันทึกได้คือปี 1954 จาก การเก็บข้อมูลพบว่า พื้นที่ยุบนี้ประกอบไปด้วยหลุมที่ดู เหมือนหลุมยุบเดี่ยวแต่ทว่ามี 7 หลุมยุบด้วยกัน แต่ว่า น้ำท่วมหมดแล้วจนเห็นเป็นแต่ทะเลสาบ การติดตามควบคุม จึงใช้เทคนิคการวัดมาตรเอียงด้วยวิธีการวัดมาตรเอียง ซึ่งแสดงในรูปแบบตัวเลข (Digital Tilts Meter) ซึ่งมีความ ละเอียดระดับ 1/3600 องศา การตั้งหมุดเก็บข้อมูลใช้ รอบ ทะเลสาบ โดยจะมีเซนเซอร์สะท้อนสัญญาณแสงไปที่จุดรับ สัญญาณ เมื่อเซนเซอร์นี้ยุบตัวไปตามระยะเวลาก็จะสามารถ คำนวณได้จากระยะทางของจุดที่วัดและมุมที่เปลี่ยนไป โดย



จะทำการปรับแก้ค่าของความเร็วแสงที่เดินทางในตัวกลางอากาศ ณ อุณหภูมิแตกต่างกันด้วย ระบบนี้ถูกนำมาติดตั้งในปี 2013 การตั้งค่าง่ายแสงสัญญาณ ยิ่งทุกชั่วโมง และเมื่อมีการหลุดตัวลงมากกว่าค่าขั้นต่ำจะทำให้มีการตั้งสัญญาณเตือนให้ผู้เก็บข้อมูลท้องถิ่นรับรู้ด้วย จุฬรอบทะเลสาบนี้ทำการอ้างอิงตามพิกัดตำแหน่งบนพื้นโลกจากข้อมูลดาวเทียมเป็นการดำเนินการโดยภาครัฐ ซึ่งขณะนี้ก็ยังดำเนินการเก็บข้อมูลอยู่ จะเห็นได้ว่าการเกิดหลุมยุบที่เกิดขึ้นแล้วและดำเนินไปสามารถติดตาม ตรวจสอบ รายงานผลประจำปี ประจำสองเดือน หรือแบบเวลาจริง การที่จะนำเทคโนโลยีการติดตามหลุมยุบมาประยุกต์ใช้ในรูปแบบต่างๆ เพียงอย่างเดียวอาจจะไม่สามารถให้ข้อมูลได้อย่างชัดเจน การนำเทคนิคที่หลากหลายมาใช้พร้อมกันต้องมีการประเมินความเป็นไปได้ของแต่ละพื้นที่ซึ่งควรเป็นเรื่องที่ต้องศึกษาต่อไป ทั้งงบประมาณ บุคลากรที่ใช้ระบบ บำรุงรักษา ซ่อมแซมระบบได้งบประมาณที่นำเข้าสู่ระบบ การพึ่งพาตนเองได้ในระยะยาว เป็นต้น

#### 4. ตัวอย่างกรณีหลุมยุบในกรุงเทพมหานคร

19 มีนาคม พ.ศ. 2555 จุดใกล้กับ ถนนวิฑูร์ กับ ถนนพระราม 4 ลุมพินีขนาดกว้าง 2 เมตร ลึก 2 เมตร เกิดจากตะกอนทรายโดนน้ำใต้ดินชะล้างออกไป จากนั้นเมื่อมีการจราจรด้านบนของถนนจึงเกิดแรงกระทำแล้วเกิดหลุมยุบทันทีทันใดโดยไม่เกิดอันตรายแก่ผู้ใช้รถ หลังเหตุเกิดมีการแจ้งทางสำนักงานเขตฯ จากนั้นจึงให้สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีภัยพิบัติ (ทช.) เข้าตรวจสอบโดยการลงพื้นที่ ผลการแนะนำจากเจ้าหน้าที่ยืนยันว่าหลุมยุบดังกล่าวจะไม่ขยายตัวไปในบริเวณใกล้เคียง จากนั้นทำการซ่อมแซมแล้วใช้งานปกติ [24]

ต่อมา 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เกิดหลุมยุบ กว้าง 0.7 เมตร ยาว 1.3 เมตร ลึก 1.8 เมตร ที่ถนนวิฑูร์ ตรงข้ามโรงแรมพลาซ่าแอทธินี ลุมพินี จากนั้น ศูนย์ก่อสร้างและบูรณะถนน 2 จึงแจ้งสำนักงานโยธาฯ ซ่อม จากนั้นเปิดใช้งานได้ปกติ ไม่มีผู้สัญจรในขณะยุบตัว [25]

จากนั้น 2 เมษายน พ.ศ. 2563 เกิดหลุมยุบ กว้างประมาณ 1 เมตร ยาว 1.5 เมตร ลึก 1 เมตร ที่ถนนเพชรบุรี

(ใกล้แยกด่วนเพชร ก่อนถึงแยกตัดถนนวิฑูร์) ทำให้รถยนต์ตกลงไปในหลุม จากนั้นเจ้าหน้าที่ฝ่ายจราจรไปตรวจสอบพร้อมประสานสำนักงานเขตราชเทวี หลังจากเจ้าหน้าที่ช่วยเหลือนารถขึ้นมาจากหลุมได้ จึงนำกรวยมาตั้งล้อมบริเวณหลุม จากนั้นจึงแจ้งสำนักงานโยธาฯซ่อม [4]

จากกรณีที่เกิดขึ้นทั้งในปี 2555, 2559 และ 2563 คือ บริเวณถนนวิฑูร์ ความปลอดภัยของประชาชน สามารถทำได้ในการระวัง ทว่าในส่วนของการติดตามการดำเนินการของการยุบ สัญญาณเฝ้าระวังแบบสีเขียว ส้ม เหลือง และแดง ให้เฝ้าระวังก็ยังไม่สามารถทำได้ ที่ผ่านมาระยะใช้วิธีการจัดการคือ เมื่อเกิดเหตุแล้วแจ้งเจ้าหน้าที่ นักข่าวเข้าพื้นที่ เชิญผู้เชี่ยวชาญมาให้สัมภาษณ์แสดงความคิดเห็นว่าตึกขนาดใหญ่ในกรุงเทพมหานคร ไม่ได้รับผลกระทบเพราะเสาเข็มฝังไว้มาก จากนั้นจึงให้สำนักงานเขตฯ ฝ่ายโยธาฯซ่อม

#### 5. สรุป

ปัญหาหลุมยุบ หากมองในเชิงรุกควรมีการติดตามผลอย่างมีประสิทธิภาพ เพราะจะสามารถกั้นบริเวณเพื่อทำการฉีด เติมปริมาตรส่วนยุบ วางแผน จัดเตรียมงบประมาณ และไม่ต้องดำเนินการกิจกรรมทางสังคมบนพื้นที่เสี่ยง จนเป็นเหตุให้อาจมีผู้ประสบเหตุสาหัส หรือบาดเจ็บเล็กน้อย หรือความเสียหายจากถนนเสียหาย เสียโอกาสทางธุรกิจและเวลา

การติดตั้งระบบติดตามแบบเวลาจริง ควรจะนำมาติดตั้งในที่ดินที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจและประชากรหนาแน่น เมื่อพบความเร่งของการยุบตัวก็ต้องทำการปิดพื้นที่ และเข้าทำการซ่อมบำรุงพื้นผิวก่อนเหตุเกิด ในที่ดินที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจที่ต่ำกว่าและมีประชากรเบาบาง ก็สามารถใช้เทคนิคการติดตามแบบเดือนละครั้ง ทำให้ทราบอัตราการเปลี่ยนแปลง หรืออัตราเร่งของการยุบตัวพื้นผิว หากมีปัจจัยเสี่ยงเพิ่ม เช่น การไหลของน้ำที่มากขึ้น การสูญเสียน้ำในชั้นอุ้มน้ำ เช่น การใช้น้ำบาดาลใหม่ในพื้นที่ที่ควรที่จะเพิ่มการเก็บข้อมูลของพื้นที่เป็นเดือนละสองครั้งได้ ในส่วนที่เป็นทุ่งนา สวน หรือในภูเขาที่ห่างไกลผู้คนใช้งานก็เหมาะสมที่จะรอให้เกิดก่อน แล้วให้ผู้พบเจอรายงานตามลำดับภาคส่วน จากนั้นก็เข้าซ่อมแซม

จากการศึกษาข้อมูลในเบื้องต้น มีแนวคิดที่ควรติดตั้งหมุดที่มีเซนเซอร์สัญญาณสะท้อนแสง ไร่ทุกๆ 25 เมตร ทั้งบริเวณเกาะกลาง และริมถนนวิฑู จากนั้นติดตั้งระบบวิธีการวัดมาตรเอียงซึ่งแสดงในรูปแบบตัวเลขที่ตีพิมพ์ขนาดใหญ่ที่สามารถรับสัญญาณได้ แล้วตรวจสอบระดับความสูงที่เปลี่ยนแปลงตลอด การรายงานผลควรแจ้งเปิดเผยทางเว็บไซต์ที่ประชาชนสามารถติดตามได้ และใช้การแจ้งเตือนแบบสัญญาณไฟกระพริบสีต่างๆ

ส่วนที่พิกขนาดเล็ก หรือตึกแถว อาคารพาณิชย์ ที่มีอัตราการทรุดตัวสามารถติดต่อขอทำการติดตั้งหมุดสัญญาณที่ลาดฟ้า เพื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการตรวจวัดขอบการแทรกแซงระหว่างคลื่นวิทยุที่รวมตัวกัน จากการสะท้อนที่ระยะทางแตกต่างกันผ่านเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ และนำข้อมูลที่ได้แสดงเป็นหน่วยแสดงภาพที่สัมพันธ์กับภาพถ่ายจากดาวเทียม

ในท้ายที่สุดนี้หากในเมืองหลวงและหัวเมืองใหญ่ได้ทำการติดตั้งระบบติดตามหลุมยุบ และมีการถ่ายทอดเทคโนโลยี พัฒนาเทคโนโลยีด้านนี้เป็นของตัวเองแล้วจะสามารถขยายพื้นที่ทำในพื้นที่ต่างจังหวัดได้ ทั้งยังประยุกต์ใช้ในงานเสถียรภาพความลาดเอียงของทางหลวงในต่างจังหวัดที่เสี่ยงต่อการพังทลายความลาดเอียงใกล้แนวถนนตามเวลาจริง ซึ่งสามารถลดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินได้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Xu, J. He, and L. Zhang, "Collapse prediction of karst sinkhole via distributed Brillouin optical fiber sensor," *Measurement*, vol. 100, pp. 68–71, 2017.
- [2] P. Strzałkowski, "Sinkhole formation hazard assessment," *Environmental Earth Sciences*, vol. 78, pp. 1–9, 2019.
- [3] E. Bruno, M. Parise, M. Pepe, and A. Basso, "Morphometric analysis of sinkholes in a karst coastal area of southern Apulia (Italy)," *Environmental Earth Sciences*, vol. 70, no. 6, pp. 2545–2559, 2013.
- [4] K. company. (2019, August). Excited! The road collapsed in the middle of the city, a wide hole. In the middle of Petchaburi Road, the pickup truck falls off, the car is stuck. Matichon Public Co.,Ltd. Bangkok, Thailand. [Online] (in Thai). Available [https://www.khaosod.co.th/breaking-news/news\\_2776953](https://www.khaosod.co.th/breaking-news/news_2776953)
- [5] P. Satarugsa and S. Sangchumpoo, "Comparison of rates for expansion of surface and subsurface sinkholes: A case study at Ban Bo Deang Amphoe Ban Muang Changwat Sakon Nakhon," *KKU Research Journal*, vol. 16, no. 8, pp. 992–1001, 2011 (in Thai).
- [6] A. Mayamae, "An integrated geoscientific study of sulfate dissolution related sinkhole occurrence," M.Sc. thesis, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Thailand, 2011 (in Thai).
- [7] R. Julsom, "Groundwater potential assessment using spatial index and regression models: Bothong Chon Buri," M.Sc. thesis, Faculty of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon ratchasima, 2007 (in Thai).
- [8] M. Ezersky and F. Amos, "Fault dissolution front relations and the Dead Sea sinkhole problem," *Geomorphology*, vol. 201, no. 1, pp. 35–44, 2013.
- [9] S. Vinay, P. Modi, and V. Chaudhri, "Detecting sinkhole attack in wireless sensor network," *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, vol. 2, no. 2, pp. 29–32, 2013.
- [10] Y. Gao, W. Luo, X. Jiang, M. Lei, and J. Dai, "Investigations of large scale sinkhole collapses,



- Laibin, Guangxi, China,” presented at the 13th Sinkhole Conference, Carlsbad, New Mexico, USA, May 6–10, 2013.
- [11] P. Cameron, T. McGinnis, and S. Aucoin, “2013 Operations, maintenance, and monitoring report,” Coastal Protection and Restoration Authority of Louisiana (CPRA), State of Louisiana, 2013.
- [12] D. A. Malovichko, R. A. Dyagile, S. Y. Denis, P. G. Butyrin, and S. V. Glebov, “Seismic monitoring of large-scale karst processes in a potash mine,” presented at the RaSiM 7(2009): Controlling seismic hazard and sustainable development of deep mines, Dalian, China, 2009.
- [13] V. Basov. (2014, December). *More insane pictures of Russian potash mining destruction*. [Online]. Available: <https://www.mining.com/more-insane-pictures-of-russian-potash-mine-disaster-43899/>
- [14] K. O'Connor and M. Trainum, “Monitoring the threat of sinkhole formation under a portion of US 18 in Cerro Gordo County, Iowa using TDR measurements,” presented at the 11th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Tallahassee, Florida, USA, 2008.
- [15] KANE GeoTech. (2015). *Instrumentation*. KANE GeoTech, Inc. [Online]. Available: <https://kanegeotech.com/instrumentation/>
- [16] Z. L. Xu and C. E. Pierce, “TDR-based shear deformation measuring system for slope failure modeling,” *Advanced Materials Research*, vol. 639, pp. 1155–1161, 2013.
- [17] M. Lei, Y. Li, Y. Gao, and M. Yan, “Detection and treatment of sinkholes and subsurface voids along Guilin-Yangshuo highway, Guangxi, China,” presented at the 11th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Tallahassee, Florida, USA, 2008.
- [18] X. Jiang, Y. Gao, Y. Wu, and M. Lei, “Use of Brillouin optical time domain reflectometry to monitor soil-cave and sinkhole formation,” *Environmental Earth Sciences*, vol. 75, no. 3, pp. 225, 2016.
- [19] Z. Guan, “Study on monitoring and early warning of karst collapse based on BOTDR technique,” in *Proceedings National Cave and Karst Research Institute Symposium 5*, 2015, pp. 407–414.
- [20] J. P. Galve, F. Gutiérrez, J. Remondo, P. Lucha, J. Bonachea, and A. Cendrero, “Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the Ebro Valley evaporite karst (NE Spain),” *Geomorphology*, vol. 111, no. 3–4, pp. 160–172, 2009.
- [21] S. Filin, A. Baruch, Y. Avni, and S. Marco, “Sinkhole characterization in the Dead Sea area using airborne laser scanning,” *Natural Hazards*, vol. 58, no. 3, pp. 1135–1154, 2011.
- [22] G. Desir, F. Gutiérrez, J. Merino, D. Carbonel, A. Bentino-Calvo, J. Guerrero, and I. Fabregat, “Rapid subsidence in damaging sinkholes: Measurement by high-precision leveling and the role of salt dissolution,” *Geomorphology*, vol. 303, pp. 393–409, 2018.
- [23] B. L. Roberts, D. L. Lord, A. S. Lord, G. Bettin, B. Park, D. K., L. L. Rudeen, K. W. Eldredge, D. Checkai, G. Osborne, and D. Moore, “2015 Strategic petroleum reserve Bayou Choctaw





- Well Integrity Grading Report,” presented at the Sandia National Laboratories, California, 2015.
- [24] Thairath Online. (2012, March). Pit collapsed in Bangkok. Department of Property points out Does not affect tall buildings. Thairath. Bangkok, Thailand. [Online] (in Thai). Available: <https://www.thairath.co.th/content/246629>
- [25] Matichon Online. (2016, July). Be careful! Collapsed hole at Wireless Road, opposite Plaza Athenee School, 130 cm long, 180 cm deep. Matichon. Bangkok, Thailand [Online] (in Thai). Available: [https://www.matichon.co.th/local/crime/news\\_214538](https://www.matichon.co.th/local/crime/news_214538)