Chulalongkorn University
Chula Digital Collections

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

2022

การพัฒนาอุปกรณ์สำรวจชั้นดินซึ่งทำงานด้วยการตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนขนาดเล็ก

ชวกร เมธีพลกุล
คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd

Part of the Civil Engineering Commons, and the Construction Engineering and Management Commons

Recommended Citation

เมธีพลกุล, ชวกร, "การพัฒนาอุปกรณ์สำรวจชั้นดินซึ่งทำงานด้วยการตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนขนาดเล็ก" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6532.
https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6532

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact ChulaDC@car.chula.ac.th.

การพัฒนาอุปกรณ์สำรวจชั้นดินซึ่งทำงานด้วยการตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนขนาดเล็ก

นายชวกร เมธีพลกุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of a device for soil profiling based on the measurement of microtremors

Mr. Chawakorn Maetepolkun

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาอุปกรณ์สำรวจชั้นดินซึ่งทำงานด้วยการตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนขนาดเล็ก
โดย	นายชวกร เมธีพลกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ดร.วีรยุทธ โกมลวิลาศ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สยาม ยิ้มศิริ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ชวกร เมธีพลกุล : การพัฒนาอุปกรณ์สำรวจชั้นดินซึ่งทำงานด้วยการตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนขนาดเล็ก. (Development of a device for soil profiling based on the measurement of microtremors) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ฐิรวัตร บุญญะฐี

การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์นั้นเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ การสำรวจปิโตรเลียม การสำรวจแหล่งน้ำบาดาล การศึกษาทางด้านแผ่นดินไหว รวมถึงการสำรวจชั้นดินทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์สำรวจชั้นดินจากการตรวจวัดคลื่นสั่นขนาดเล็ก (microtremor) บนผิวดิน อุปกรณ์ตรวจวัดประกอบด้วยวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลแบบ 24 บิตซึ่งรับสัญญาณการสั่นสะเทือนจากจีโอโฟนแล้วส่งให้ระบบไมโครคอมพิวเตอร์ชื่อราสเบอร์รี่พาย (Raspberry Pi) เพื่อเก็บข้อมูล และประมวลผลเส้นโค้งการกระจายตัวด้วยวิธี Power of Phase (POP) ซึ่งควบคุมด้วยสมาร์ทโฟนผ่านเครือข่ายคอมพิวเตอร์สเมือนจริง (virtual network computing) โดยใช้เทคโนโลยีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) ทำนายภาพตัดความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity profile) ของชั้นดิน จากการตรวจวัดภาคสนามในกรุงเทพมหานครจำนวน 3 พื้นที่ซึ่งประกอบไปด้วยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, แลนด์ แอนด์ เฮ้าส์ โครงการมัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล และแลนด์ แอนด์ เฮ้าส์ โครงการ บางบอน 5 พบว่าเมื่อใช้โมเดลโครงข่ายประสาทเทียม และ รัศมีของการตรวจวัดที่เหมาะสม อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายความเร็วคลื่นเฉือนได้ใกล้เคียงกับความเร็วคลื่นเฉือนจากผลเจาะสำรวจชั้นดิน (Boring log) และ วิธีดาวน์โฮล (Downhole) ในช่วงระดับความลึกประสิทธิผลที่สามารถตรวจวัดได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา	ลายมือชื่อนิสิต	
ปีการศึกษา	2565	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	

6170138221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEYWORD: Geophysics, Raspberry pi, Artificial Neural Network, Microtremors, Shear wave velocity profile

Chawakorn Maetepolkun : Development of a device for soil profiling based on the measurement of microtremors. Advisor: Asst. Prof. TIRAWAT BOONYATEE

A Geophysical survey is one of the methods used in mining industries, petroleum explorations, groundwater explorations, earthquake studies, and geotechnical site investigations. In this study, an exploration device is developed to determine shear wave velocity profiles from records of small vibrations on the ground surface (Microtremors). A microcomputer (Raspberry Pi), a 24bit analog-to-digital converter and geophones are used to recording and analyzing the dispersion curves based on Power of Phase (POP) method. This device is controlled by a smartphone via virtual network computing and predict shear wave velocity profile of soil with an Artificial neural network (ANN). The prediction results in 3 areas of Bangkok consisting of Chulalongkorn university, Land & Houses Mantana Bangkhuntien-Chaitalay (MTL), and Land & Houses Bangbon 5 (BB) in effective depth range were found to be agreed with the result from Borling log and Downhole test. When measuring in a suitable radius and using an appropriate neural network model.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Civil Engineering Student's Signature ....

Academic Year: 2022 Advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

ชวกร เมธีพลกุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

.....2-ค

บทคัดย่อภาษาไทย.....2-ค

.....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง

กิตติกรรมประกาศ..... จ

สารบัญ..... ฉ

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญรูป..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 3

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา..... 3

1.4 ขอบเขตการศึกษา..... 4

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม..... 5

2.1 คลื่นผิวดิน..... 5

2.2.1 วิธีทดสอบดาวน์โฮล (Downhole seismic testing)..... 6

2.2.2 วิธีทดสอบครอสโฮล (Cross hole seismic testing)..... 7

2.2.3 วิธีวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นผิวดิน..... 8

2.2.4 วิธีวิเคราะห์คลื่นผิวดินหลายช่องสัญญาณ..... 11

2.2.4.1 การวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวจากแหล่งกำเนิดคลื่นแบบความถี่กวาด. 13

2.2.4.2 การวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวจากแหล่งกำเนิดคลื่นแบบกระตุ้น..... 14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.4.4 Power of Phase (POP) 20
2.3 การคำนวณย้อนกลับ 22
2.3.1 เทคนิคการผกผันทั่วไป 24
2.3.2 การจำลองการอบเหนียว 28
2.3.3 การค้นหาแบบทาบู 31
2.2.4 ขั้นตอนเชิงพันธุ์กรรม 33
2.3 โครงข่ายประสาทเทียม 37
2.3.1 ฟังก์ชันกระตุ้น 38
2.3.1.1 ฟังก์ชันไบนารี่สเต็ป (Binary step function) 38
2.3.1.2 ฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear function) หรือ ฟังก์ชันเอกลักษณ์ (Identity function) 39
2.3.1.3 ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid function) 40
2.3.1.4 ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ (Hyperbolic tangent function, Tanh) 42
2.2.5.5 ฟังก์ชันเส้นตรงที่ถูกปรับแก้ (Rectified Linear Unit, ReLU) 43
2.3.2 การสร้างโครงข่ายประสาทเทียม 44
2.3.3 ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกฝน 45
2.3.4 การฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม 45
2.3.5 อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม 45
2.3.5.1 การเคลื่อนลงตามความชันมาตรฐาน 46
2.3.5.2 การเคลื่อนลงตามความชันสุ่ม 46
2.3.5.3 การเคลื่อนลงตามความชันทีละชุดย่อย 46
2.3.6 อัลกอริทึมการเคลื่อนลงตามความชันส่วนเพิ่มเติม 47
2.3.6.1 โมเมนตัม (Momentum) 47
2.3.6.2 โมเมนตัมของเนสเตรอฟ (Nesterov momentum, NAG) 48

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.6.3 การปรับตัวตามความชัน (Adaptive gradient, Adagrad) 49

2.3.6.4 Adadelta 50

2.3.6.5 อดัม (Adaptive Moment Estimation, ADAM) 51

2.3.7 ฟังก์ชันความคลาดเคลื่อน (Loss function) 52

2.3.7.1 วิธีการครอส-เอนโทรปี 52

2.3.7.2 ฟังชันความคลาดเคลื่อนกำลังสอง 55

2.3.7.3 ฟังก์ชันความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยลอกการิทึม 56

2.3.7.4 ฟังชันค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสมบูรณ์ 57

บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย 59

3.1 การประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนขนาดเล็กส่วนเครื่อง 59

3.2 การประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนขนาดเล็กส่วนควบคุม 61

3.3 การพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียม 62

3.3.1 การสร้างชุดข้อมูล 62

3.3.2 การฝึกฝนโครงข่ายประสาทเทียม 64

3.3.3 การวิเคราะห์โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมหลังจากการฝึกฝน 67

3.4 การแปลงโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม 76

3.5 การตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กในพื้นที่ภาคสนาม 77

3.5.1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 77

3.5.2 โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล 78

3.5.3 แลนด์ แอนด์ เฮ้าส์ โครงการ บางบอน 5 81

3.6.1 การวิเคราะห์ผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน 84

3.6.2 การวิเคราะห์ผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโปรแกรม Dinver 85

บทที่ 4 อภิปรายผลการทดสอบ 87

4.1 เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามด้วยอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้ 87

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1.1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 87
4.1.2 แลนด์ แอนด์ เฮ้าส์ โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล 88
4.1.3 แลนด์ แอนด์ เฮ้าส์ โครงการ บางบอน 5 89
4.2 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้ 90
4.2.1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 90
4.2.2 โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล 95
4.2.2 โครงการ บางบอน 5 97
4.3 การสรุปผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน 99
4.3.1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 99
4.3.2 โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ริมทะเล และ โครงการ บางบอน 5 100
4.4 การอภิปรายผลการทดสอบ 100
4.4.1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 100
4.4.2 โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 1 101
4.4.3 โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 2 102
4.4.4 โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1 103
4.4.5 โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 104
4.5 การทดสอบคุณภาพสัญญาณคลื่นผิวดิน 105
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ 108
บทที่ 6 ภาคผนวก 111
บรรณานุกรม 137
ประวัติผู้เขียน 143

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนยีนส์แบบจุดเดียว (Single Point Crossover) 35

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการกลายพันธ์แบบบิตสตริง (Bit string mutation) 35

ตารางที่ 3.1 คลังโปรแกรมหลักสำหรับพัฒนาส่วนควบคุม 61

ตารางที่ 3.2 ขอบเขตของตัวแปรคุณสมบัติชั้นดินโมเดล A.. 63

ตารางที่ 3.3 ขอบเขตของตัวแปรคุณสมบัติชั้นดินโมเดล B.. 64

ตารางที่ 3.4 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการฝึกฝน 65

ตารางที่ 3.5 ไฮเปอร์พารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับใช้ในการฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม 65

ตารางที่ 3.6 เกณฑ์ที่ใช้สำหรับการบันทึกโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม... 66

ตารางที่ 3.7 ผลการฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมจากขอบเขตตัวแปร A 66

ตารางที่ 3.8 ผลการฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมจากขอบเขตตัวแปร B 66

ตารางที่ 3.9 เทคนิคการควอนไทซ์แบบต่างๆ 77

ตารางที่ 3.10 ขอบเขตตัวแปร A_Dinver 85

ตารางที่ 3.11 ขอบเขตตัวแปร B_Dinver 86

ตารางที่ 4.1 ตารางสรุปผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการตรวจวัดในพื้นที่จุฬาลงกรณ มหาวิทยาลัย 99

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการตรวจวัดในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ริมทะเล (MTL) และ โครงการ บางบอน 5 (BB).. 100

ตารางที่ 4.3 ผลสรุปคุณภาพของสัญญาณคลื่นผิวดินที่ตรวจวัดในพื้นที่จังหวัดโคราช.................... 105

ตารางที่ 4.4 ผลสรุปคุณภาพของสัญญาณคลื่นผิวดินที่ตรวจวัดในพื้นที่จังหวัดชลบุรี 106

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นไหวสะเทือน (Seismic wave) 6

รูปที่ 2.2 แผนผังการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะด้วยวิธีทดสอบดาวน์โฮล 7

รูปที่ 2.3 แผนผังการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะด้วยวิธีทดสอบครอสโฮล 8

รูปที่ 2.4 แผนผังวิธีวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นผิวดิน 10

รูปที่ 2.5 เส้นโค้งการกระจายจากวิธีวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นผิวดิน 10

รูปที่ 2.6 เส้นโค้งการกระจายตัวจากผลกระทบระยะห่างฝั่งใกล้ (near offset) และ ระยะห่างฝั่งไกล (far offset) จากวิธีวิเคราะห์คลื่นผิวดินหลายช่องสัญญาณ 12

รูปที่ 2.7 เส้นโค้งการกระจายตัวจากการคำนวณด้วยฟังก์ชัน slant-stacking 15

รูปที่ 2.8 แผนผังการวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวด้วยวิธีอัตสัมพันธ์เชิงระยะ 19

รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบระหว่างสัมประสิทธิ์สัมประสิทธิ์อัตสัมพันธ์เชิงระยะ และ ฟังก์ชันเบสเซลชนิดแรกอันดับที่ศูนย์ (Okada, 2003) 20

รูปที่ 2.10 ตัวอย่างพื้นผิวความคลาดเคลื่อนที่มีจุดต่ำสุดสัมพัทธ์หลายจุด 23

รูปที่ 2.11 แผนภาพออยเลอร์การจำแนกประเภทเมต้าฮิวริสติก 24

รูปที่ 2.12 แผนผังเทคนิคการผกผันทั่วไป 27

รูปที่ 2.13 แผนผังการจำลองการอบเหนียวสำหรับการคำนวณย้อนกลับของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือน 30

รูปที่ 2.14 แผนผังการค้นหาแบบทาบูสำหรับการคำนวณย้อนกลับของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือน 32

รูปที่ 2.15 แผนผังขั้นตอนเชิงพันธุ์กรรมสำหรับการคำนวณย้อนกลับของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือน 36

รูปที่ 2.16 โครงสร้างพื้นฐานของระบบประสาททางชีววิทยา และ ระบบโครงข่ายประสาทเทียม ... 38

รูปที่ 2.17 กราฟฟังก์ชันกระตุ้นไบนารี่สเตป 39

รูปที่ 2.18 กราฟฟังก์ชันกระตุ้นเชิงเส้น 40

รูปที่ 2.19 กราฟอนุพันธ์ของฟังก์ชันกระตุ้นเชิงเส้น 40
รูปที่ 2.20 กราฟฟังก์ชันกระตุ้นซิกมอยด์ 41
รูปที่ 2.21 กราฟอนุพันธ์ฟังก์ชันกระตุ้นซิกมอยด์ 41
รูปที่ 2.22 กราฟฟังก์ชันกระตุ้นไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ 42
รูปที่ 2.23 กราฟอนุพันธ์ของฟังก์ชันกระตุ้นไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ 43
รูปที่ 2.24 กราฟฟังก์ชันกระตุ้นเส้นตรงที่ถูกปรับแก้ 43
รูปที่ 2.25 กราฟอนุพันธ์ของฟังก์ชันกระตุ้นเส้นตรงที่ถูกปรับแก้ 44
รูปที่ 2.26 พื้นผิวผิดพลาดลักษณะหุบเหว 48
รูปที่ 2.27 พฤติกรรมของโมเมนตัมต่อพื้นผิวผิดพลาดลักษณะหุบเหว 48
รูปที่ 2.28 ตัวอย่างรูปภาพ และ เฉลยจากชุดข้อมูล Cifar-10 54
รูปที่ 2.29 รูปภาพ และ ผลการทำนายประเภทในหลากหลายรูปแบบ 55
รูปที่ 2.30 กราฟฟังก์ชันความผิวพลาดกำลังสอง 56
รูปที่ 2.31 กราฟฟังก์ชันความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยลอกการิทึม 57
รูปที่ 2.32 กราฟฟังก์ชันค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสมบูรณ์ 58
รูปที่ 3.1แผนภาพของราสเบอร์รีพาย 3 บี และ รายละเอียดพอร์ตอเนกประสงค์ 59
รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบภายในจีโอโฟน 60
รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนในงานวิจัยนี้ 61
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างโมเดลคุณสมบัติของชั้นดิน 62
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนจากชุดข้อมูล A 68
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนจากชุดข้อมูล B 68
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนจากชุดข้อมูล C 68
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนจากชุดข้อมูล D 69
รูปที่ 3.9 แนวโน้มความคลาดเคลื่อนของโมเดล B_2.5_4.8 จากการทำนายชุดข้อมูล A, B, C, D และ S ในแต่ละรอบการฝึกฝน 70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.10 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.5_4.8 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 102 รอบ 70

รูปที่ 3.11 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.5_4.8 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 307 รอบ 71

รูปที่ 3.12 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.5_4.8 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 352 รอบ 71

รูปที่ 3.13 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.5_4.8 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 990 รอบ 72

รูปที่ 3.14 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.5_4.8 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 72

รูปที่ 3.15 แนวโน้มความคลาดเคลื่อนของโมเดล B_2.3_3.0 จากการทำนายชุดข้อมูล A, B, C, D และ S ในแต่ละรอบการฝึกฝน 73

รูปที่ 3.16 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.3_3.0 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 100 รอบ 73

รูปที่ 3.17 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.3_3.0 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 361 รอบ 74

รูปที่ 3.18 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.3_3.0 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 607 รอบ 74

รูปที่ 3.19 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.3_3.0 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 1500 รอบ 75

รูปที่ 3.20 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.3_3.0 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 1800 รอบ 75

รูปที่ 3.21 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.3_3.0 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 6916 รอบ 76

รูปที่ 3.22 ตำแหน่งของการสำรวจคลื่นสั่นไหวขนาดเล็กในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 78

รูปที่ 3.23 ตำแหน่งของการสำรวจคลื่นสั่นไหวขนาดเล็กในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล 79

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.24 สภาพพื้นที่สำหรับการสำรวจคลื่นสั่นไหวขนาดเล็กในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 1 (MTL-1) 80

รูปที่ 3.25 สภาพพื้นที่สำหรับการสำรวจคลื่นสั่นไหวขนาดเล็กในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียบ-ชายทะเล จุดที่ 2 (MTL-2) 81

รูปที่ 3.26 ตำแหน่งของการสำรวจคลื่นสั่นไหวขนาดเล็กในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 82

รูปที่ 3.27 สภาพพื้นที่สำหรับการสำรวจคลื่นสั่นไหวขนาดเล็กในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1 (BB-1)รูปที่ 3.28 82

รูปที่ 3.29 สภาพพื้นที่สำหรับการสำรวจคลื่นสั่นไหวขนาดเล็กในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 (BB-2) 83

รูปที่ 4.1 เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เปรียบเทียบกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล 87

รูปที่ 4.2 เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามในพื้นที่โครงการ มัณฑนา 88

รูปที่ 4.3 เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามในพื้นที่โครงการ มัณฑนา 88

รูปที่ 4.4 เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามในพื้นที่โครงการบางบอน 5 จุดที่ 1 เปรียบเทียบกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากผลเจาะสำรวจชั้นดิน 89

รูปที่ 4.5 เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 เปรียบเทียบกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากผลเจาะสำรวจชั้นดิน 89

รูปที่ 4.6 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 2 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล 90

รูปที่ 4.7 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 2 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล 90

รูปที่ 4.8 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล 91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.9 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล 91

รูปที่ 4.10 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 6 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล 92

รูปที่ 4.11 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 6 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล 92

รูปที่ 4.12 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 8 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล 93

รูปที่ 4.13 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 8 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล 93

รูปที่ 4.14 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 10 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล 94

รูปที่ 4.15 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 10 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล 94

รูปที่ 4.16 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 1 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4 และ 6 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน 95

รูปที่ 4.17 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 1 โดยใช้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รัศมีการตรวจวัดที่ 4 และ 6 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน 95

รูปที่ 4.18 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ริมทะเล จุดที่ 2 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4 และ 6 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน 96

รูปที่ 4.19 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ริมทะเล จุดที่ 2 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4 และ 6 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน 96

รูปที่ 4.20 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4, 6 และ 8 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน 97

รูปที่ 4.21 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4, 6 และ 8 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน 97

รูปที่ 4.22 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4, 6 และ 8 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน 98

รูปที่ 4.23 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4, 6 และ 8 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน 98

รูปที่ 6.1 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 2 เมตร ตัวอย่างที่ 1 111

รูปที่ 6.2 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 2 เมตร ตัวอย่างที่ 2 111

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 6.3 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 2 เมตร ตัวอย่างที่ 3 111

รูปที่ 6.4 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 4 เมตร ตัวอย่างที่ 1 112

รูปที่ 6.5 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 4 เมตร ตัวอย่างที่ 2 112

รูปที่ 6.6 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 4 เมตร ตัวอย่างที่ 3 112

รูปที่ 6.7 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 6 เมตร ตัวอย่างที่ 1 113

รูปที่ 6.8 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 6 เมตร ตัวอย่างที่ 2 113

รูปที่ 6.9 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 6 เมตร ตัวอย่างที่ 3 113

รูปที่ 6.10 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 8 เมตร ตัวอย่างที่ 1 114

รูปที่ 6.11 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 8 เมตร ตัวอย่างที่ 2 114

รูปที่ 6.12 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 8 เมตร ตัวอย่างที่ 3 114

รูปที่ 6.13 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 10 เมตร ตัวอย่างที่ 1 115

รูปที่ 6.14 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 10 เมตร ตัวอย่างที่ 2 115

รูปที่ 6.15 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 10 เมตร ตัวอย่างที่ 3 115

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 6.16 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 1 (MTL-1) ด้วยรัศมี 4 เมตร 116

รูปที่ 6.17 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 1 (MTL-1) ด้วยรัศมี 6 เมตร 116

รูปที่ 6.18 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 2 (MTL-2) ด้วยรัศมี 4 เมตร 116

รูปที่ 6.19 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 2 (MTL-2) ด้วยรัศมี 6 เมตร 117

รูปที่ 6.20 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1 (BB-1) ด้วยรัศมี 4 เมตร 117

รูปที่ 6.21 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1 (BB-1) ด้วยรัศมี 6 เมตร 117

รูปที่ 6.22 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1 (BB-1) ด้วยรัศมี 8 เมตร 118

รูปที่ 6.23 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 (BB-2) ด้วยรัศมี 4 เมตร 118

รูปที่ 6.24 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 (BB-2) ด้วยรัศมี 6 เมตร 118

รูปที่ 6.25 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 (BB-2) ด้วยรัศมี 8 เมตร 119

รูปที่ 6.26 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 1 119

รูปที่ 6.27 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 2 119

รูปที่ 6.28 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 1 120

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 6.29 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 2 120

รูปที่ 6.30 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 3 ตัวอย่างที่ 1 120

รูปที่ 6.31 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 3 ตัวอย่างที่ 2 121

รูปที่ 6.32 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 1 121

รูปที่ 6.33 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 2 121

รูปที่ 6.34 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 3 122

รูปที่ 6.35 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 4 122

รูปที่ 6.36 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 5 122

รูปที่ 6.37 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 6 123

รูปที่ 6.38 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 7 123

รูปที่ 6.39 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 1 123

รูปที่ 6.40 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 2 124

รูปที่ 6.41 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 3 124

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 6.42 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 4 124

รูปที่ 6.43 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 3 ตัวอย่างที่ 1 125

รูปที่ 6.44 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 3 ตัวอย่างที่ 2 125

รูปที่ 6.45 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 3 ตัวอย่างที่ 3 125

รูปที่ 6.46 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3 ตัวอย่างที่ 1 126

รูปที่ 6.47 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3 ตัวอย่างที่ 2 126

รูปที่ 6.48 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-13 ตัวอย่างที่ 1 126

รูปที่ 6.49 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-13 ตัวอย่างที่ 2 127

รูปที่ 6.50 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-15 ตัวอย่างที่ 1 127

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 6.51 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ HUAYYOD ตัวอย่างที่ 1 127

รูปที่ 6.52 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3 ตัวอย่างที่ 1 128

รูปที่ 6.53 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3 ตัวอย่างที่ 2 128

รูปที่ 6.54 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3 ตัวอย่างที่ 3 128

รูปที่ 6.55 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3 ตัวอย่างที่ 4 129

รูปที่ 6.56 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-13 ตัวอย่างที่ 1 129

รูปที่ 6.57 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-13 ตัวอย่างที่ 2 129

รูปที่ 6.58 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-13 ตัวอย่างที่ 3 130

รูปที่ 6.59 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-15 ตัวอย่างที่ 1 130

รูปที่ 6.60 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-15 ตัวอย่างที่ 2 130

รูปที่ 6.61 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-15 ตัวอย่างที่ 3 131

รูปที่ 6.62 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-15 ตัวอย่างที่ 4 131

รูปที่ 6.63 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ HUAYYOD ตัวอย่างที่ 1 131

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 6.64 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ HUAYYOD ตัวอย่างที่ 2 132

รูปที่ 6.65 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราช จุดที่ 1 132

รูปที่ 6.66 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราช จุดที่ 2 132

รูปที่ 6.67 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราช จุดที่ 3 133

รูปที่ 6.68 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราช จุดที่ 1 133

รูปที่ 6.69 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราช จุดที่ 2 133

รูปที่ 6.70 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราช จุดที่ 3 134

รูปที่ 6.71 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3........ 134

รูปที่ 6.72 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-13 134

รูปที่ 6.73 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-15 135

รูปที่ 6.74 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ HUAYYOD 135

รูปที่ 6.75 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3 135

รูปที่ 6.76 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-13 136

รูปที่ 6.77 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-15 136

รูปที่ 6.78 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ HUAYYOD 136

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) ของชั้นดินเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญเพื่อหาคุณลักษณะชั้นดินทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิครวมถึงการวิเคราะห์ และ ศึกษาพฤติกรรมของชั้นดินอันเนื่องมาจากผลกระทบของแผ่นดินไหว โดยคลื่นเฉือน (Shear wave, S-wave) นั้นมีทิศทางแพร่กระจายทั้งในแนวราบตามพื้นผิวโลก และ ในแนวดิ่งลึกเข้าไปในเนื้อโลกจึงทำให้อัตราการลดทอนพลังงานของคลื่นเฉือนนั้นสูงกว่าคลื่นผิวดิน (Surface wave) ที่จะแพร่กระจายในแนวราบเพียงอย่างเดียวจึงทำให้คลื่นผิวดินนั้นมีความเหมาะสมสำหรับอธิบายคุณลักษณะของชั้นดินได้ดีกว่า โดยวิธีการตรวจวัดคลื่นผิวดินนั้นแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลักได้แก่ 1) การเก็บข้อมูลคลื่นผิวดินในภาคสนาม (Field observation), 2) การวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัว (Dispersion analysis) และ 3) การวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวด้วยการคำนวณย้อนกลับ (Inversion analysis)

โดยวิธีการตรวจวัดคลื่นผิวดินในสนามนั้นถูกแบ่งออกเป็น 2 วิธี ตามแหล่งกำเนิดของคลื่นที่ใช้ในการตรวจวัดได้แก่ 1) วิธีการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือน (Seismic method) หรือ วิธีแบบแอคทีฟ (Active method) อย่าง วิธีวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นผิวดิน (Spectral Analysis of Surface Waves, SASW) (Nazarian, Stokoe, & Hudson, 1983) และ วิธีการวิเคราะห์คลื่นผิวดินหลายช่องสัญญาณ (Multi-Channel Analysis of Surface Waves, MASW) (Choon B. Park, Miller, & Xia, 1999), (Miller, Xia, Park, & Ivanov, 1999), (Xia, Miller, & Park, 1999), (Choon B. Park & Miller, 2007) ที่จะตรวจวัดคลื่นที่ถูกสร้างมาจากแหล่งกำเนิดคลื่นแอคทีฟ (Active seismic source) อย่างเช่นค้อนเลื่อน (Sledgehammer), ตุ้มน้ำหนัก (Weight drop) รวมถึง เครื่องสั่นสะเทือน (Seismic vibrator) และ 2) วิธีการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็ก (Microtremor) หรือ วิธีการแบบแพสซีฟ (Passive method) อย่างวิธีอัตตสัมพันธ์เชิงระยะ (Spatial autocorrelation, SPAC) (Aki, 1957) และ วิธี Power of Phase (POP) ของ Boonyatee (2018) ที่จะตรวจวัดคลื่นผิวดินที่เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อม (Ambient noise) ทั้งจากธรรมชาติ และ ที่มนุษย์สร้างขึ้นซึ่งหลังจากการวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวแล้วต่อมาคือวิธีการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 2 วิธีได้แก่ วิธีการเชิงประสบการณ์ (empirical method) (Foti, 2002), (Foti, Lai, Rix, & Strobbia, 2014) ซึ่งจะคำนวณความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินโดยตรงจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล เส้นโค้งการกระจายตัว กับความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน และ วิธีการเชิงวิเคราะห์ (analytical method) ซึ่งจะใช้การแก้ปัญหา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เชิงตัวเลขอย่างการหาค่าที่เหมาะที่สุด (Optimization) อย่างวิธีการแบบเชิงเส้น (Linear approach) อย่างวิธีการผกผันทั่วไป (Generalize inversion technique) (Oscillations, 1972), (Ganji, Gucunski, & Nazarian, 1998) และ วิธีการแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear approach) อย่างการค้นหาแบบทาบู (Tabu search, TS) (Vinther & Mosegaard, 1996), การจำลองการอบเหนียว (Simulated annealing, SA) (Sen & Stoffa, 1990), (Martínez, Lana, Olarte, Badal, & Canas, 2000), (Beaty, Schmitt, & Sacchi, 2002) และ ขั้นตอนเชิงพันุกรรม (Genetic algorithm) (Stoffa & Sen, 1991) (Lomax & Snieder, 1995) (Sambridge & Drijkoningen, 1992) (M. Wathelet, Jongmans, & Ohrnberger, 2004) (Dal Moro, Pipan, & Gabrielli, 2007) ซึ่งโดยทั่วไปชุดอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนในเชิงพาณิชย์อย่างโมดูลจัดเก็บข้อมูล (data acquisition) นั้นไม่เหมาะสำหรับการคำนวณย้อนกลับ ดังนั้นการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนโดยทั่วไปนั้นจำเป็นที่จะต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างคอมพิวเตอร์ในการคำนวณย้อนกลับซึ่งทำให้การวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในพื้นที่ตรวจวัดนั้นมีความยุ่งยาก รวมถึงชุดอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนในเชิงพาณิชย์นั้นมีราคาที่สูง (J. L. Soler-Llorens et al., 2016)(Juan Luis Soler-Llorens, Galiana-Merino, Giner-Caturla, Rosa-Cintas, & Nassim-Benabdeloued, 2019) ทำให้หน่วยงาน หรือศูนย์วิจัยขนาดเล็กที่มีทุนสนับสนุนน้อยนั้นไม่สามารถจัดหาชุดอุปกรณ์ในเชิงพาณิชย์ได้

ในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบ และ ประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กซึ่งใช้ไมโครคอมพิวเตอร์อย่าง ราสเบอร์รี่พาย (Raspberry Pi) เป็นส่วนประมวลผลกลาง ทำงานร่วมกับเทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning, DL) อย่างโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) ซึ่งพบว่าอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยมีราคาที่สมเหตุสมผล และ สามารถทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินได้ภายในพื้นที่ตรวจวัด

1.2 วัตถุประสงค์

1) ออกแบบ และ ประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กในส่วนของเครื่องมือ (Hardware)
2) ออกแบบ และ พัฒนาระบบควบคุม (Software) สำหรับการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กให้สอดคล้องกับส่วนของเครื่องมือ
3) ออกแบบ และ พัฒนา โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน
4) ออกแบบ และ พัฒนา ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (graphical user interface, GUI)
5) ตรวจสอบความถูกต้องของความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กในงานวิจัยนี้ กับผลการทดสอบด้วยวิธีดาวน์ หรือ วิธีเจาะสำรวจดิน
6) เปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินระหว่างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ และ ชุดโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับ Dinver

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา

1) ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กที่มีราคาสมเหตุสมผล
2) ระบบควบคุมสำหรับการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กที่
3) โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน
4) ชุดข้อมูลซึ่งประกอบไปด้วยเส้นโค้งการกระจายตัวซึ่งเป็นส่วนของเนื้อหาการเรียนรู้ และความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินซึ่งเป็นส่วนของผลเฉลย สำหรับการนำไปใช้ในการพัฒนาอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสม และ โครงข่ายประสาทเทียมในอนาคต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1) ในงานวิจัยนี้ใช้ราสเบอร์รีพาย 3 บี (Raspberry Pi 3B) เป็นอุปกรณ์ประมวลผลกลาง
2) ในงานวิจัยนี้ใช้ Texas Instrument ADS1256 เป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณสำหรับการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนจากจีโอโฟนผ่านวงจรอินพุตด้านเดียว (Single Ended Input)
3) ในงานวิจัยนี้ใช้จีโอโฟน Geospace HS-1 แบบแนวดิ่งแกนเดียวซึ่งมีความถี่ธรรมชาติอยู่ในช่วง 2 ถึง 28 เฮิรตซ์ ในการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็ก
4) ในงานวิจัยนี้ใช้เครือข่ายคอมพิวเตอร์เสมือนจริง (Virtual Network Computing, VNC) ผ่านแอปพลิเคชัน RealVNC สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กที่พัฒนาในงานวิจัยนี้ และ สมาร์ทโฟน
5) ตำแหน่ง และ รัศมีของการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กในงานวิจัยนี้ขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่ทดสอบในภาคสนาม
6) ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการจัดเรียงจีโอโฟน และ การคำนวณเส้นโค้งการกระจายตัวตามวิธี Power of Phase
7) ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้ถูกจำลองด้วยโปรแกรม gpdc ซึ่งพิจารณาเฉพาะโหมดพื้นฐานเท่านั้น
8) ชุดข้อมูลที่ถูกจำลองในงานวิจัยนี้จำกัดความลึกของของชั้นดินที่ 30 เมตร ซึ่งชั้นดินที่ถูกจำลองแบ่งออกเป็น 11 ชั้นครอบคลุมถึงชั้นกึ่งปริภูมิ (half-space) โดยในแต่ละชั้นดินจะมีความหนาเท่ากับ 3 เมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
ทบทวนวรรณกรรม

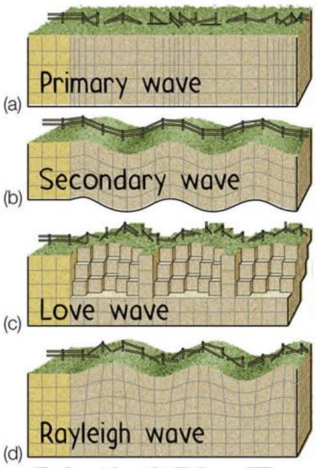
2.1 คลื่นผิวดิน

คลื่นผิวดิน (Foti et al., 2014) เป็นหนึ่งในคลื่นไหวสะเทือน (seismic wave) ซึ่งมีคุณลักษณะที่เหมาะสำหรับการอธิบายคุณสมบัติ และ ชนิดของวัสดุใต้ผิวดิน (Geomaterial) เนื่องจากคลื่นผิวดินนั้นแพร่กระจายในแนวราบซึ่งทำให้มีอัตราการลดทอนพลังงานในเชิงพื้นที่ (Geometry attenuation) ต่ำกว่าคลื่นตัวกลาง (Body wave) ที่แพร่กระจายทั้งในแนวราบ และแนวดิ่ง

จากการทดลองกำเนิดคลื่นเรลีย์ (Rayleigh wave, R-wave) ซึ่งเป็นหนึ่งในคลื่นผิวดินจากแหล่งกำเนิดแบบเส้น (line source) ที่แพร่กระจายผ่านตัวกลางที่มีลักษณะเป็นชั้นดินเดียวแบบยืดหยุ่นกึ่งปริภูมิ (homogeneous elastic half-space) ซึ่งจะสังเกตได้ว่าคลื่นเรลีย์นั้นจะไม่มีการลดทอนพลังงานเชิงพื้นที่ (spatial decay) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นเป็นแบบจุด (point source) คลื่นเรลีย์จะมีอัตราการลดทอนพลังงานเชิงพื้นที่ เป็นส่วนกลับรากที่สองของระยะทางที่คลื่นเดินทางออกจากแหล่งกำเนิด ในทางกลับกันคลื่นตัวกลาง (Body wave) จะมีอัตราการลดทอนพลังงานเชิงพื้นที่เป็นส่วนกลับกำลังสองของระยะทางที่คลื่นเดินทางออกจากแหล่งกำเนิด (Ewing et al. 1957) ซึ่งจะเห็นได้ว่าคลื่นหลักนั้นจะมีอัตราการลดทอนพลังงานเชิงพื้นที่สูงกว่าคลื่นผิวดิน โดยที่ระยะทางประมาณหนึ่ง ถึง สองเท่าของความยาวคลื่นออกไปนั้นคลื่นผิวดินจะมีอิทธิพล (dominant) เหนือคลื่นตัวกลาง ดังนั้นจะสามารถพิจารณาให้คลื่นที่ตรวจวัดได้ในระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นประมาณหนึ่ง ถึง สองเท่าของความยาวคลื่นนั้นถือเป็นคลื่นผิวดิน Lamb (1904) โดยเมื่อสังเกตุทิศทางที่ตั้งฉากกับการแพร่กระจายของคลื่นผิวดิน การเคลื่อนตัวของอนุภาคดินที่เกิดจากอิทธิพลของคลื่นผิวดินนั้นจะมีการสลายตัวในอัตราเลขชี้กำลังลึกลงไปใต้ดินจนถึงระดับความลึกสุดท้ายที่คลื่นผิวดินสามารถแพร่กระจายพลังงานลงไปได้ ซึ่งระดับความลึกนี้จะเรียกว่ากึ่งปริภูมิ (half-space) โดยที่พลังงานของคลื่นผิวดินนั้นจะสามารถแพร่กระจายในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการแพร่กระจายได้ประมาณหนึ่งความยาวคลื่นเมื่อทำการทดลองในพื้นที่ไร้ขอบเขต (free boundary) (Achenbach 1984) ดังนั้นคลื่นผิวดินที่มีความยาวคลื่นที่สั้นกว่า หรือ มีความถี่ที่สูงกว่าจะมีอิทธิพลในช่วงระดับความลึกของชั้นดินที่ตื้นกว่า ในขณะที่คลื่นผิวดินที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า หรือ มีความถี่ที่ต่ำกว่าจะมีอิทธิพลในช่วงระดับความลึกของชั้นดินที่ลึกกว่าโดยรูปแบบการแพร่กระจายของคลื่นไหวสะเทือนซึ่งประกอบไปด้วย คลื่นอัด (Compressive wave, P-wave), คลื่นเฉือน (Shear wave, S-wave),

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

คลื่นเรลีย์ (Rayleigh wave, R-wave) และ คลื่นเลิฟ (Lova wave, L-wave) แสดงดังรูปที่ 2.1 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นไหวสะเทือน (Seismic wave)



รูปที่ 2.1 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นไหวสะเทือน (Seismic wave)
[http://sdsu-physics.org]

การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์นั้นหมายถึงการสำรวจคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของชั้นดินด้วยการใช้เซนเซอร์ชนิดต่างๆในการตรวจวัด ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามวิธีการสำรวจโดยการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์นั้นมีความรวดเร็ว และ มีราคาที่ต่ำสามารถที่จะครอบคลุมพื้นที่ในการสำรวจที่กว้าง (Stone, 1979) โดยวิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์นั้นมีหลากหลายวิธี ซึ่งในแต่ละวิธีนั้นก็จะมีทั้งข้อได้เปรียบ และ ข้อเสียเปรียบแตกต่างกันออกไป การเลือกใช้วิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์นั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ วัตถุประสงค์ของการสำรวจ, ขนาดพื้นที่ของการสำรวจ, ความต้องการสำหรับการออกแบบ, สภาพทางธรณีวิทยา และ ข้อจำกัดทางด้านงบประมาณ และ ระยะเวลา

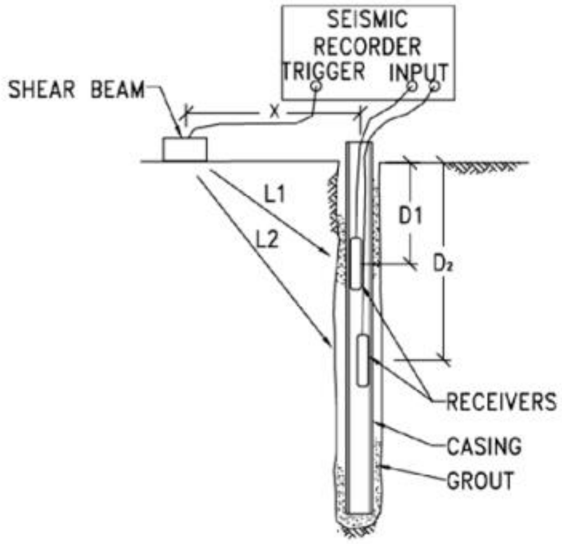
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

โดยในหัวข้อถัดไปจะอธิบายการสำรวจคลื่นไหวสะเทือน (Seismic survey) ซึ่งเป็นหนึ่งในการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ที่แบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ 1) วิธีการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบทำลาย (Invasive method) อย่างเช่น วิธีดาวน์โฮล (Downhole Seismic Test) และ วิธีครอสโฮล (Cross hole seismic test) และ 2) วิธีการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบไม่ทำลาย (Non-invasive method) อย่าง วิธีสำรวจคลื่นผิวดิน (Surface wave method)

2.2.1 วิธีทดสอบดาวน์โฮล (Downhole seismic testing)

วิธีดาวน์โฮล (D 7400-08, 2008) เป็นวิธีการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนผ่านหลุมเจาะโดยอาศัยแหล่งกำเนิดคลื่นที่ตำแหน่งไกล้หลุมเจาะ โดยแหล่งกำเนิดคลื่นจะกำเนิดขบวนคลื่น (wave train) ซึ่งสามารถตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดการไหวสะเทือนอย่างจีโอโฟน (Geophone) ที่อยู่ภายในหลุม

เจาะซึ่งตำแหน่งความลึกของจีโอโฟนจะสัมพันธ์กับความลึกของชั้นดินที่ต้องการสำรวจ วิธีดาวน์โฮลเก็บข้อมูลด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ (Data logger) ซึ่งเชื่อมต่อกับเซนเซอร์กระตุ้น (Trigger sensor) เพื่อกำหนดช่วงเวลาที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลคลื่นโดยรูปที่ 2.3 แผนผังการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะด้วยวิธีทดสอบดาวน์โฮล

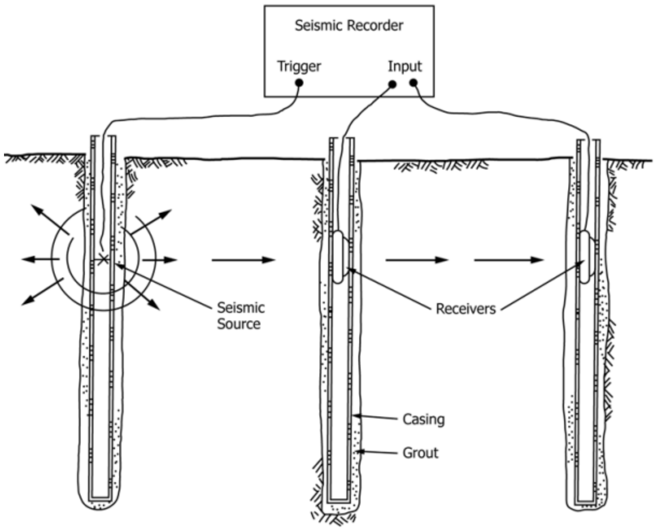


รูปที่ 2.2 แผนผังการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะด้วยวิธีทดสอบดาวน์โฮล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2.2 วิธีทดสอบครอสโฮล (Cross hole seismic testing)

วิธีทดสอบครอสโฮล (ASTM D4428/D4428M-14, 2014) เป็นวิธีการสำรวจชั้นดินโดยตรงด้วยใช้หลุมเจาะจำนวน 2 หลุมซึ่งได้แก่หลุมเจาะสำหรับกำเนิดขบวนคลื่น และ หลุมเจาะสำหรับรับสัญญาณขบวนคลื่นที่เดินทางผ่านชั้นดิน ซึ่งความเร็วของคลื่นที่เดินทางผ่านชั้นดินสามารถคำนวณได้จากระยะห่างระหว่างหลุมเจาะ และ ระยะเวลาที่คลื่นเดินทางระหว่างหลุมเจาะ โดยรูปที่ 2.3 แผนผังการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะด้วยวิธีทดสอบครอสโฮล



รูปที่ 2.3 แผนผังการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะด้วยวิธีทดสอบครอสโฮล

การสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบทำลายทั้งสองวิธีที่กล่าวมาข้างต้นนั้นมีข้อดีคือสามารถตรวจวัดคลื่นหลักซึ่งได้แก่ คลื่นอัด และ คลื่นเฉือนได้โดยตรง รวมถึงสามารถที่จะกำหนดความละเอียดของข้อมูลความเร็วคลื่นในแต่ละระดับความลึกของชั้นดินได้ จึงทำให้ผลการสำรวจชั้นดินนั้นมีความแม่นยำโดยเฉพาะวิธีครอสโฮล แต่เนื่องจากต้องทำการเจาะหลุมสำรวจ ซึ่งใช้เครื่องจักรหนักจึงทำให้ไม่สามารถที่จะสำรวจในพื้นที่ที่เข้าถึงยาก รวมถึงมีค่าใช้จ่าย และ ระยะเวลา สำหรับการเจาะหลุมสำรวจ ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะอธิบายถึงการตรวจวัดคลื่นผิวดินซึ่งเป็นการสำรวจชั้นดินแบบไม่ทำลายที่ไม่จำเป็นต้องใช้หลุมเจาะในการสำรวจ จึงทำให้ต้นทุน และ เวลาในการสำรวจต่อจุดนั้นลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.3 วิธีวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นผิวดิน

วิธีวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นผิวดินเป็นหนึ่งในวิธีการสำรวจชั้นดินด้วยการตรวจวัดคลื่นไหงสะเทือน เริ่มต้นถูกนำไปประยุกต์ใช้กับการตรวจวัดค่าโมดูลัส และ ความหนาของผิวถนน (Nazarian et al., 1983) ตรวจวัดโดยใช้จีโอโฟนจำนวน 2 ตัว ติดตั้งโดยมีระยะห่างสอดคล้องกับลักษณะของชั้นวัสดุที่ต้องการสำรวจ, ความลึกที่ต้องการสำรวจ, ช่วงความถี่ของคลื่นที่ต้องการตรวจวัด, การลดทอนพลังงานของคลื่นในวัสดุที่ต้องการสำรวจ และ ความสามารถในการตอบสนองต่อช่วงความถี่ (frequency response) ของจีโอโฟน โดยวิธีวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นผิวดินนั้นเป็นหนึ่งในวิธีแบบแอคทีฟ (Active method) ซึ่งอาศัยแหล่งกำเนิดคลื่นในการสร้างขบวนคลื่นซึ่งชนิดของแหล่งกำเนิดจะแตกต่างกันออกไปตามความลึกที่ต้องการตรวจวัดซึ่งหลังจากเสร็จสิ้นการตรวจวัดคลื่นผิวดินต่อมาคือการวิเคราะห์การกระจายตัวของคลื่นในแต่ละความถี่

โดยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นผิวดินด้วยการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transform, DFT) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ในรูปแบบจำนวนเชิงซ้อน (Complex number) ซึ่งประกอบไปด้วยแอมพลิจูด (amplitude) ซึ่งเป็นค่าสัมบูรณ์ระหว่างจำนวนจริง กับ จำนวนจินตภาพ และ มุมเฟส (Phase angle) ซึ่งเป็นส่วนกลับของแทนเจนต์ระหว่างจำนวนจริง กับ จำนวนจินตภาพ ในแต่ละความถี่ f ซึ่งความแตกต่างของมุมเฟส (Phase shift) จากจีโอโฟน 2 ตัว สามารถพิจารณาได้จากความหนาแน่นข้ามสเปกตรัม (Cross-spectral density, CSD) ซึ่งระยะเวลาที่คลื่นเรลีย์เดินทางผ่านจีโอโฟนทั้ง 2 ตัว ในแต่ละความถี่ $t(f)$ สามารถคำนวณตามสมการที่ (2.1) ซึ่งความเร็วเฟสของคลื่นเรลีย์ในแต่ละความถี่ $V_r(f)$ หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของจีโอโฟน x และระยะเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทาง $t(f)$ ดังสมการที่ (2.2)

$$t(f) = \frac{\phi(f)}{360f} \tag{2.1}$$

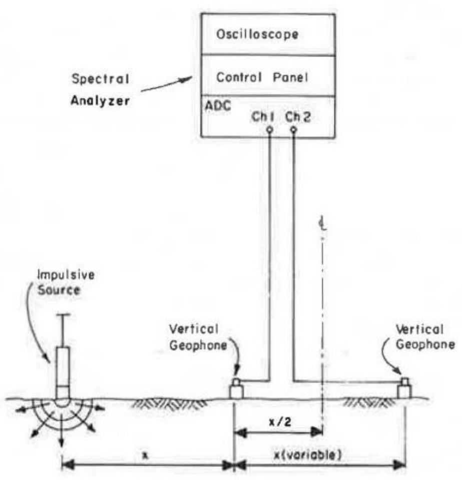
$$V_r(f) = \frac{x}{t(f)} \tag{2.2}$$

ซึ่งสมการที่ (2.2) สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของความยาวคลื่นแต่ละความถี่ $L_r(f)$ ดังสมการที่ (2.3)

$$L_r(f) = \frac{V_r(f)}{f} \tag{2.3}$$

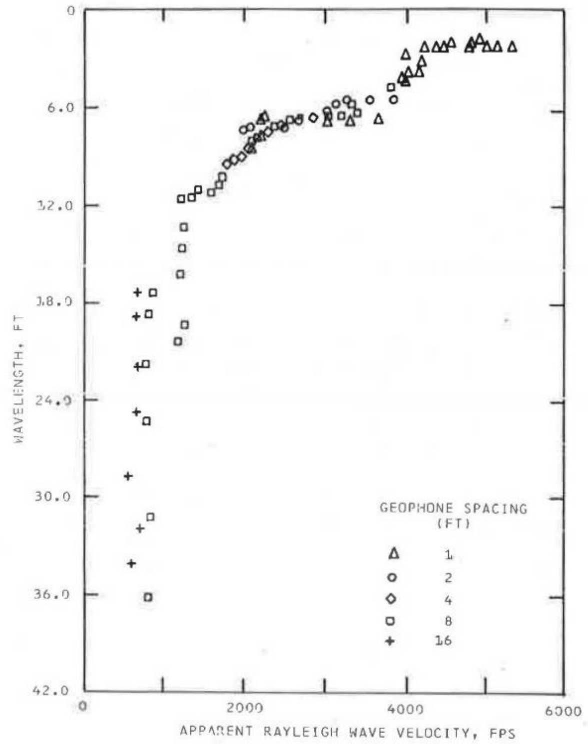
โดยความเร็วเฟสของคลื่นเรลีย์จากเส้นโค้งการกระจายตัวนี้ไม่ใช่ความเร็วจริงของชั้นดินใดชั้นดินหนึ่งแต่เป็นความเร็วปรากฏ (apparent) ซึ่งเป็นความเร็วของคลื่นเรลีย์ที่เดินทางจากผิวดินลึกลงไปถึงชั้นที่คลื่นมีอิทธิพล ดังนั้นวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Inversion) จึงจำเป็นสำหรับการหาความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินโดยแผนผังวิธีวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นผิวดิน และ ตัวอย่างเส้นโค้งการกระจายตัวจากวิธีวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นผิวดิน แสดงดัง รูปที่ 2.4 และ รูปที่ 2.5 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.4 แผนผังวิธีวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นผิวดิน

(Nazarian et al., 1983)



รูปที่ 2.5 เส้นโค้งการกระจายจากวิธีวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นผิวดิน

(Nazarian et al., 1983)

จาก รูปที่ 2.5 จะสังเกตได้ว่าระยะห่างระหว่างจีโอโฟน 2 ตัวจะมีผลต่อช่วงความยาวคลื่นที่สามารถตรวจวัดได้ โดยที่ยิ่งระยะห่างของจีโอโฟนมากสัญญาณคลื่นเรลีย์ที่สามารถตรวจวัดได้จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่มากโดยวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นผิวดินนั้นใช้จีโอโฟนเพียง 2 ตัว

ซึ่งการสำรวจชั้นดินในหลายความลึกนั้นจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจวัดในหลายระยะห่างเซนเซอร์ ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะอธิบายถึงการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนโดยใช้จีโอโฟนหลายตัว (Multi-station approaches) ซึ่งจะทำให้การสำรวจชั้นดินในหลายความลึกมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น (Foti et al., 2014) (Choon B. Park et al., 1999)

2.2.4 วิธีวิเคราะห์คลื่นผิวดินหลายช่องสัญญาณ

วิธีวิเคราะห์คลื่นผิวดินหลายช่องสัญญาณ (Choon B. Park et al., 1999) (Choon B. Park & Miller, 2007) (Xia, Miller, Park, Hunter, & Harris, 2000) เป็นวิธีการสำรวจคลื่นผิวดินแบบหลายสถานี โดยวิธีวิเคราะห์คลื่นผิวดินหลายช่องสัญญาณจะสามารถตรวจวัดคลื่นที่มีความถี่ในช่วงประมาณ 3 – 30 เฮิรตซ์ โดยใช้จีโอโฟนจำนวน 24 ตัว หรือ มากกว่าจัดเรียงตัวเป็นอาเรย์เส้นตรงซึ่งมีระยะห่างตั้งแต่ไม่กี่เมตร จนถึง หลายร้อยเมตร ซึ่งความลึกของชั้นดินที่สามารถตรวจวัดได้นั้นจะขึ้นอยู่กับ พื้นที่สำรวจคลื่นไหวสะเทือน, ชนิดของแหล่งกำเนิดคลื่น, ระยะห่างของจีโอโฟน และความสามารถในการตอบสนองต่อช่วงความถี่ของจีโอโฟน ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววิธีวิเคราะห์คลื่นผิวดินหลายช่องสัญญาณจะสามารถตรวจวัดคลื่นได้ลึกจากผิวดินประมาณ 10 ถึง 30 เมตร แต่เนื่องจากแหล่งกำเนิดคลื่นนั้นจะสร้างคลื่นทั้งที่ต้องการอย่าง คลื่นผิวดิน และ คลื่นที่ไม่ต้องการอย่างคลื่นตัวกลาง ดังนั้นระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่น และ จีโอโฟนจึงมีความสำคัญ

โดยที่ผลกระทบจากจีโอโฟนตัวที่ใกล้ที่สุด (near offset) จะถูกพิจารณาโดยที่ระยะห่างระหว่างจีโอโฟนตัวที่ใกล้ที่สุด และ แหล่งกำเนิดคลื่น x_1 ควรมีค่าไม่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นสูงสุด λ_{max} (Stokoe et al., 1994) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.4)

$$x_1 \geq 0.5\lambda_{max} \qquad (2.4)$$

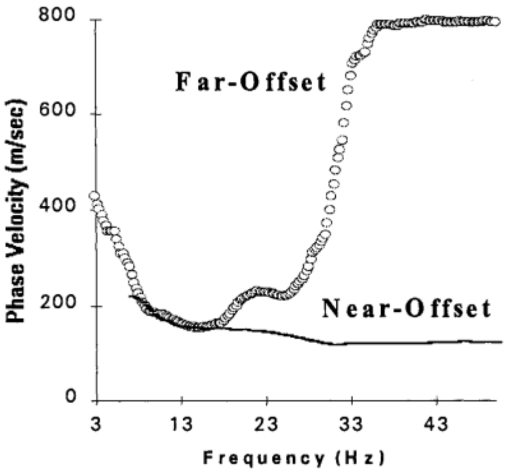
โดยที่ (Rix & Leipski, 1991) ได้เสนอให้พิจารณาระดับชั้นดินที่ลึกที่สุด z_{max} ที่ต้องการสำรวจแทนการใช้ความยาวคลื่นสูงสุดซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.5)

$$x_1 \geq z_{max} \qquad (2.5)$$

ในทางกลับกันเมื่อคลื่นผิวดินที่มีความยาวคลื่นสั้นซึ่งมีอัตราการลดทอนพลังงานที่สูงเดินทางผ่านตัวกลาง ซึ่งมีโอกาสที่จะทำให้จีโอโฟนที่อยู่ไกลจากแหล่งกำเนิดคลื่นไม่สามารถวัดคลื่นผิวดินในโหมดพื้นฐาน (fundamental mode) ได้เนื่องจากโหมดที่สูงกว่า (higher mode) มีอิทธิพลเหนือโหมดพื้นฐาน ดังนั้นระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่น และ จีโอโฟนตัวที่ไกลที่สุด (far offset) จึงเป็นตัวกำหนดความถี่สูงที่สุดที่สามารถตรวจวัดคลื่นผิวดินได้ ซึ่งสอดคล้องกับชั้นดินชั้นแรกซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นดินชั้นแรก H_1 และ ความยาวคลื่นที่สั้นที่สุด λ_{min}

โดยที่ความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดที่สามารถคำนวณได้จากความเร็วเฟส C_{min} ที่ความถี่สูงสุดที่สุดที่สามารถตรวจวัด f_{max} ได้แสดงดังสมการที่ (2.6) ซึ่งเส้นโค้งการกระจายตัวที่ได้รับผลกระทบจากระยะห่างฝั่งใกล้ และ ระยะห่างฝั่งไกล แสดงดัง รูปที่ 2.6 เส้นโค้งการกระจายตัวจากผลกระทบระยะห่างฝั่งใกล้ (near offset) และ ระยะห่างฝั่งไกล(far offset) จากวิธีวิเคราะห์คลื่นผิวดินหลายช่องสัญญาณ

$$H_1 \geq 0.5\lambda_{max} = 0.5\frac{C_{min}}{f_{max}} \qquad (2.6)$$



รูปที่ 2.6 เส้นโค้งการกระจายตัวจากผลกระทบระยะห่างฝั่งใกล้ (near offset) และ ระยะห่างฝั่งไกล (far offset) จากวิธีวิเคราะห์คลื่นผิวดินหลายช่องสัญญาณ

(Choon B. Park et al., 1999)

โดยวิธีการคำนวณตามสมการที่ (2.6) นั้นไม่สเถียร (Rix & Leipski, 1991) จึงทำให้เหมาะกับการประเมินความหนาของชั้นดินชั้นแรกแบบคร่าวๆ โดยเมื่อความหนาของชั้นดินจริงชั้นแรกตื้นเกินกว่าที่คาดการณ์ไว้ จีโอโฟนก็ควรที่จะขยับเข้าไกล้แหล่งกำเนิดคลื่นมากขึ้นด้วยการลดระยะห่างระหว่างจีโอโฟน และ/หรือ การลดระยะห่างของจีโอโฟนตัวที่ไกลที่สุดจากแหล่งกำเนิด

โดยระยะห่างระหว่างจีโอโฟนจะต้องไม่น้อยกว่าความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาความไม่ชัดเจนของข้อมูลเชิงพื้นที่ (spatial aliasing effect) ซึ่งแหล่งกำเนิดคลื่นของวิธีวิเคราะห์คลื่นผิวดินหลายช่องสัญญาณจะถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบได้แก่ 1) แหล่งกำเนิดคลื่นทางตรงอย่างเครื่องสั่น (Seismic vibrator) ซึ่งสามารถที่จะกำเนิดช่วงความถี่ที่ต้องการตรวจวัดได้ และ 2) แหล่งกำเนิดคลื่นทางอ้อมอย่างแหล่งกำเนิดคลื่นแบบกระตุ้น (Impulsive source) ที่ไม่สามารถกำหนดช่วงความถี่ของคลื่นได้ ซึ่งคลื่นที่ตรวจวัดได้จะอยู่ในขอบของเขตเวลา (time domain) โดยปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อช่วงความลึกของการสำรวจได้แก่คลื่นผิวดินความถี่ที่ต่ำที่สุด f_1 ที่สามารถตรวจวัดได้, คลื่นผิวดินความถี่สูงที่สุด f_2 ที่สามารถตรวจวัดได้ และ ความเร็วเฟสของคลื่นซึ่งระดับที่ลึกที่สุดที่สามารถตรวจวัดได้ z_{max} (Rix & Leipski, 1991) นั้นจะพิจารณาตามสมการที่ (2.7)

$$z_{max} = \frac{c_1}{2f_1} \tag{2.7}$$

โดยข้อมูลคลื่นความถี่ต่ำที่สุดมักจะถูกกำหนดด้วยความถี่ธรรมชาติของจีโอโฟน ดังนั้นเมื่อความลึกสูงสุดที่สามารถตรวจวัดได้มีความลึกที่น้อยกว่าความลึกที่ต้องการตรวจวัด จะสามารถแก้ไขได้ด้วยการเปลี่ยนจีโอโฟนที่มีช่วงความถี่ธรรมชาติต่ำลง และ/หรือ การเปลี่ยนแหล่งกำเนิดคลื่นที่สามารถสร้างคลื่นที่มีพลังงานสูงขึ้นซึ่งในหัวข้อถัดไปจะอธิบายวิธีการวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดคลื่นที่ใช้แหล่งกำเนิดคลื่นที่แตกต่างกัน

2.2.4.1 การวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวจากแหล่งกำเนิดคลื่นแบบความถี่กวาด

แหล่งกำเนิดคลื่นแบบความถี่กวาดอย่างเครื่องสั่นนั้นสามารถที่จะกำหนดความถี่ของคลื่นตามเวลาที่กำหนดได้จึงทำให้ขบวนของคลื่นที่เกิดขึ้นนั้นมีความถี่ที่ชัดเจนตามเวลาที่กำหนดซึ่งสามารถคำนวณความเร็วของเฟสในแต่ละความถี่ f ได้โดยตรงจากความชันระหว่างระยะทางของจีโอโฟนแต่ละตัว d_j กับระยะเวลาในการเดินทาง $t(f)$ ของคลื่นซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.8)

$$c(f) = \frac{d_j}{t(f)} \tag{2.8}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2.4.2 การวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวจากแหล่งกำเนิดคลื่นแบบกระตุ้น

เนื่องจากแหล่งกำเนิดคลื่นแบบกระตุ้นนั้นไม่สามารถที่จะกำหนดความถี่ของคลื่นตามเวลาที่ต้องการได้จึงจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์สเปกตรัมโดยคลื่นที่ตรวจวัดได้จะอยู่ในโดเมนเวลาในแต่ละตำแหน่งของจีโอโฟนซึ่งสามารถทำการแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูเรียเยแบบไม่ต่อเนื่องโดยผลลัพธ์ของการแปลงฟูรีเยจะอยู่ในรูปแบบคลื่นในขอบเขตของความถี่ $\bar{U}(\omega, x_j)$ ซึ่งประกอบไปด้วยแอมพลิจูด $A_j(\omega)$ และ มุมเฟสของคลื่น $\phi_j(\omega)$ ในแต่ละความถี่เชิงมุม ω ซึ่งฟังก์ชันคลื่นในขอบเขตของความถี่แสดงดังสมการที่ (2.9)

$$\bar{U}(\omega, x_j) = A_j(\omega)e^{i\phi_j(\omega)} \tag{2.9}$$

โดยที่ x_j คือระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นกระตุ้น กับ จีโอโฟนตัวที่ j ซึ่งหลังจากการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่องต่อมาคือการนำข้อมูลคลื่นมาแปลงมาตรฐาน (normalization) เพื่อลดผลกระทบของความคลาดเคลื่อนจากการลดทอนพลังงานของคลื่น และ การกระจายพลังงานของคลื่นที่ตรวจวัดได้ (Choon Byong Park, Miller, & Xia, 1998) (Choon B. Park, 2011) โดยที่การแปลงมาตรฐานแสดงดังสมการที่ (2.10) ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นเลขชี้กำลังของมุมเฟสคลื่น $e^{i\phi_j(\omega)}$ ในแต่ละคามถี่เชิงมุม

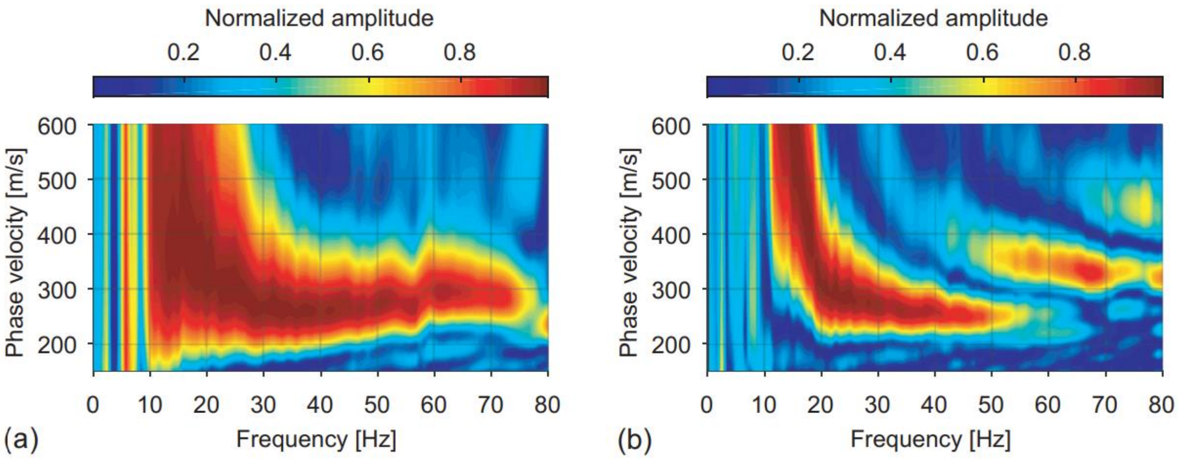
$$\bar{U}_{norm}(\omega, x_j) = \frac{\bar{U}(\omega, x_j)}{|\bar{U}(\omega, x_j)|} = \frac{A_j(\omega)e^{i\phi_j(\omega)}}{|A_j(\omega)e^{i\phi_j(\omega)}|} = e^{i\phi_j(\omega)} \tag{2.10}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยที่ความเร็วเฟสจริง $c(\omega)$ ในแต่ละความถี่จะสามารถวิเคราะห์ได้จากฟังก์ชัน slant-stacking (Yilmaz, 2008) ซึ่งเป็นการหาความสอดคล้องกันระหว่างผลลัพธ์จากการแปลงมาตรฐาน $\bar{U}_{norm}(\omega, x_j)$ เปรียบเทียบกับมุมเฟสทดสอบ $e^{i\phi_{t,1}}$ ในช่วงความถี่ที่สนใจซึ่งมุมเฟสทดสอบสามารถคำนวณได้จากความเร็วเฟสทดสอบ c_t ที่ถูกประมาณในช่วงที่กำหนดโดยฟังก์ชัน slant-stacking และ สมการมุมเฟสทดสอบแสดงดังสมการที่ (2.11) และ (2.12) ตามลำดับ โดยรูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างเส้นโค้งการกระจายตัวจากการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชัน slant-stacking

$$A_s(\omega, c_t) = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} e^{i\phi_{t,1}}\bar{U}_{norm}(\omega, x_1) + \dots + e^{i\phi_{t,N}}\bar{U}_{norm}(\omega, x_N) \tag{2.11}$$

$$\phi_{t,j} = \frac{\omega_{x,j}}{c_t} \tag{2.12}$$



รูปที่ 2.7 เส้นโค้งการกระจายตัวจากการคำนวณด้วยฟังก์ชัน slant-stacking
(Loo & Leong, 2018)

จากรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งการกระจายตัวในแต่ละความถี่ซึ่งแปรผันตามความถี่เชิงมุมจะมีแถบสีที่แตกต่างกันในแต่ละความเร็วเฟสโดยแถบสีแดงซึ่งหมายถึงผลลัพธ์ของ slant-stacking มีค่าเท่ากับ 1 นั้นเกิดจากการรวบแบบเสริมกัน (constructive superposition) จากการที่มุมเฟสจริงสอดคล้องกับมุมเฟสทดสอบ ในทางกลับกันถ้าหากผลลัพธ์ของ slant-stacking มีค่าน้อยกว่า 1 เกิดจากการรวบแบบหักล้าง (destructive superposition) ซึ่งหมายถึงมุมเฟสจริงไม่สอดคล้องกับมุมเฟสทดสอบ

โดยวิธีสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบแอคทีฟอย่าง วิธีวิเคราะห์สเปกตรัมของคลื่นผิวดิน และวิธีวิเคราะห์คลื่นผิวดินหลายช่องสัญญาณนั้นจำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดคลื่นซึ่งแตกต่างจากวิธีสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบแพสซีฟ หรือเรียกว่า วิธีสำรวจคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กที่จะอธิบายในหัวข้อถัดไปนั้นจะใช้คลื่นซึ่งเกิดขึ้นเองในสภาพแวดล้อมซึ่งมักจะประกอบไปด้วยคลื่นที่มีพลังงานในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า (Foti et al., 2014) คลื่นที่ถูกสร้างขึ้นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแบบแอคทีฟ จึงทำให้สามารถสำรวจชั้นดินในระดับที่ลึกกว่าวิธีแบบแอคทีฟ

2.2.4.3 วิธีอัตสัมพันธ์เชิงระยะ

วิธีอัตสัมพันธ์เชิงระยะ (Aki, 1957) เป็นวิธีการตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนขนาดเล็กซึ่งเริ่มต้นพัฒนาสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของแผ่นดินโดยสมมุติฐานของวิธีอัตสัมพันธ์เชิงระยะได้แก่ 1) สมมุติให้คลื่นที่มีความซับซ้อน (complex wave) เป็นคลื่นที่มีการเกิดขึ้นแบบสุ่ม (Stochastic process) ในขอบเขตของระยะทาง และ เวลา 2) ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์อัตสัมพันธ์เชิงระยะ (spatial autocorrelation coefficient) เก็บมาจากตัวรับสัญญาณซึ่งเรียงเป็นวงกลม และ

สามารถวิเคราะห์ได้เมื่อคลื่นที่เก็บมานั้นมีการกระจายตัวเหมือนคลื่นผิวดิน 3) การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์อัตสัมพันธ์เชิงพื้นที่เป็นฟังก์ชันระหว่าง ความเร็วเฟส และ ความถี่ โดยวิธีอัตสัมพันธ์เชิงระยะนั้นจะวางอาเรย์ของเซนเซอร์ในรูปแบบของวงกลมที่มีจีโอโฟนที่จุดกึ่งกลางซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างจีโอโฟนที่จุดกึ่งกลาง และ จีโอโฟนรอบวงกลมนั้นเป็นความสัมพันธ์ในรูปแบบสองมิติซึ่งสามารถแทนด้วยพิกัดตามพื้นผิวโลกในแกน x และ y ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูปแบบของพิกัดเชิงขั้วซึ่งสามารถอธิบายด้วยระยะห่างระหว่างจีโอโฟนที่จุดกึ่งกลางวงกลม กับ จีโอโฟนที่จุดรอบวงกลม r และ ตำแหน่งมุมของจีโอโฟน ϕ ซึ่งสมการรูปคลื่นที่จุดศูนย์กลางวงกลทอาเรย์ และ สมการรูปคลื่นที่จุดรอบวงอาเรย์แสดงดังสมการที่ (2.13) และ (2.14) ตามลำดับ

$$tX(t,0,0) = [A+\eta]e^{i\omega t} \tag{2.13}$$

$$X(t,r,\theta) = [A+\eta]e^{i\omega t + ikrcos(\theta-\phi)} \tag{2.14}$$

โดยที่ A คือแอมพลิจูดของคลื่นผิวดิน, η คือสัญญาณรบกวนในหน่วยของแอมพลิจูด, ω ความถี่เชิงมุม, k จำนวนคลื่นซึ่งเดินทางเข้าหาจุดศูนย์กลางวงกลมอาเรย์ในทิศทางมุม θ ซึ่งเปรียบเทียบกับทิศตะวันออกซึ่งหลังจากการวิเคราะห์สปกตรัมของคลื่นแล้วต่อมาคือการเปรียบเทียบความต่างของเฟสระหว่างข้อมูลคลื่นที่จุดศูนย์กลางอาเรย์ และ ข้อมูลคลื่นที่จุดรอบวงอาเรย์ด้วยฟังก์ชันอัตสัมพันธ์เชิงระยะ (Spac function) ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.15)

$$\rho(f,r,\theta) = \frac{S_{cx}(f,r,\theta)}{\sqrt{S_c(f,0,0)S_x(f,r,\theta)}} \tag{2.15}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยที่ฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัม (Power spectral density, PSD) ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง $S_c(f,0,0)$, ฟังก์ชันความหนาแน่นสเปกตรัมที่ตำแหน่ง x $S_x(f,r,\theta)$ และ ฟังก์ชันความหนาแน่นข้ามสเปกตรัม (Cross spectral density, CSD) ระหว่างจุดศูนย์กลาง และ ที่ตำแหน่ง x $S_{cx}(f,r,\theta)$ แสดงดังสมการที่ (2.16), (2.17) และ (2.18) ตามลำดับ

$$S_c(f,0,0) = E[|X(f,0,0)|^2] \tag{2.16}$$

$$S_x(f,r,\theta) = E[|X(f,r,\theta)|^2] \tag{2.17}$$

$$S_{cx}(f,r,\theta) = E[|X(f,0,0)X(f,r,\theta)|^2] \tag{2.18}$$

โดยที่ $X(f,0,0)$ และ $X(f,r,\theta)$ คือคลื่นจากการแปลงฟูรีเยที่ตำแหน่งศูนย์กลางอาเรย์ และตำแหน่ง x ตามลำดับ ซึ่งฟังก์ชันอัตสัมพันธ์เชิงระยะจะได้ผลลัพธ์เป็นความต่างเฟสระหว่างตำแหน่งจุดศูนย์กลางวงกลม และ ตำแหน่งรอบวงกลม

แต่ฟังก์ชันอัตสัมพันธ์เชิงระยะนั้นยังมีผลของทิศทางคลื่น (DOA) ซึ่งสามารถกำจัดได้ด้วยการหาค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันอัตสัมพันธ์เชิงระยะในทุกๆ จุดรอบวงกลม ซึ่งถูกเรียกว่าสัมประสิทธิ์อัตสัมพันธ์เชิงระยะ (Spac coefficient) ที่จะได้ผลลัพธ์เป็นมุมเฟสที่ไม่มีผลกระทบของทิศทางที่คลื่นเดินทางซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.19)

$$\bar{g}(f,r) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \rho(f,r,\theta) \tag{2.19}$$

โดยที่ (Aki, 1957) ตั้งสมมุติฐานให้มีจำนวนจีโอโฟนรอบวงกลมเป็นจำนวนอนันต์ที่สามารถหาสัมประสิทธิ์อัตสัมพันธ์เชิงระยะจากผลของการหาปริพันธ์ของวงอาเรย์ แต่เนื่องจากการตรวจวัดจริงนั้นจีโอโฟนรอบวงกลมจำนวนอนันต์นั้นไม่สามารถทำได้จึงจำเป็นต้องใช้จีโอโฟนอย่างน้อย 4 ตัว ซึ่งประกอบไปด้วยจีโอโฟนที่จุดศูนย์กลางจำนวน 1 ตัว และ จีโอโฟนที่จุดรอบวงกลมอาเรย์จำนวน 3 ตัวสำหรับการตรวจวัดดังนั้นสัมประสิทธิ์อัตสัมพันธ์เชิงระยะสมารถคำนวณได้จากการหาค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันอัตสัมพันธ์เชิงระยะตามสมการที่ (2.20)

$$\bar{g}(f,r) = \frac{g_1(f,r) + g_2(f,r) + \cdots + g_N(f,r)}{N} \tag{2.20}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ซึ่งผลลัพธ์ของสัมประสิทธิ์อัตสัมพันธ์เชิงระยะนั้นจะถูกนำมาพิจารณาเฉพาะค่าจำนวนจริงซึ่งก็คือฟังก์ชันโคไซน์ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับฟังก์ชันเบสเซลชนิดแรกอันดับที่ศูนย์ (Bessel function first kind zero order) ตามสมการที่ (2.21) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของวงอาเรย์ r และ ความเร็วเฟส $c(f)$ ในแต่ละความถี่ f

$$J_0\left(\frac{2\pi f r}{c(f)}\right) = \bar{g}(f,r) \tag{2.21}$$

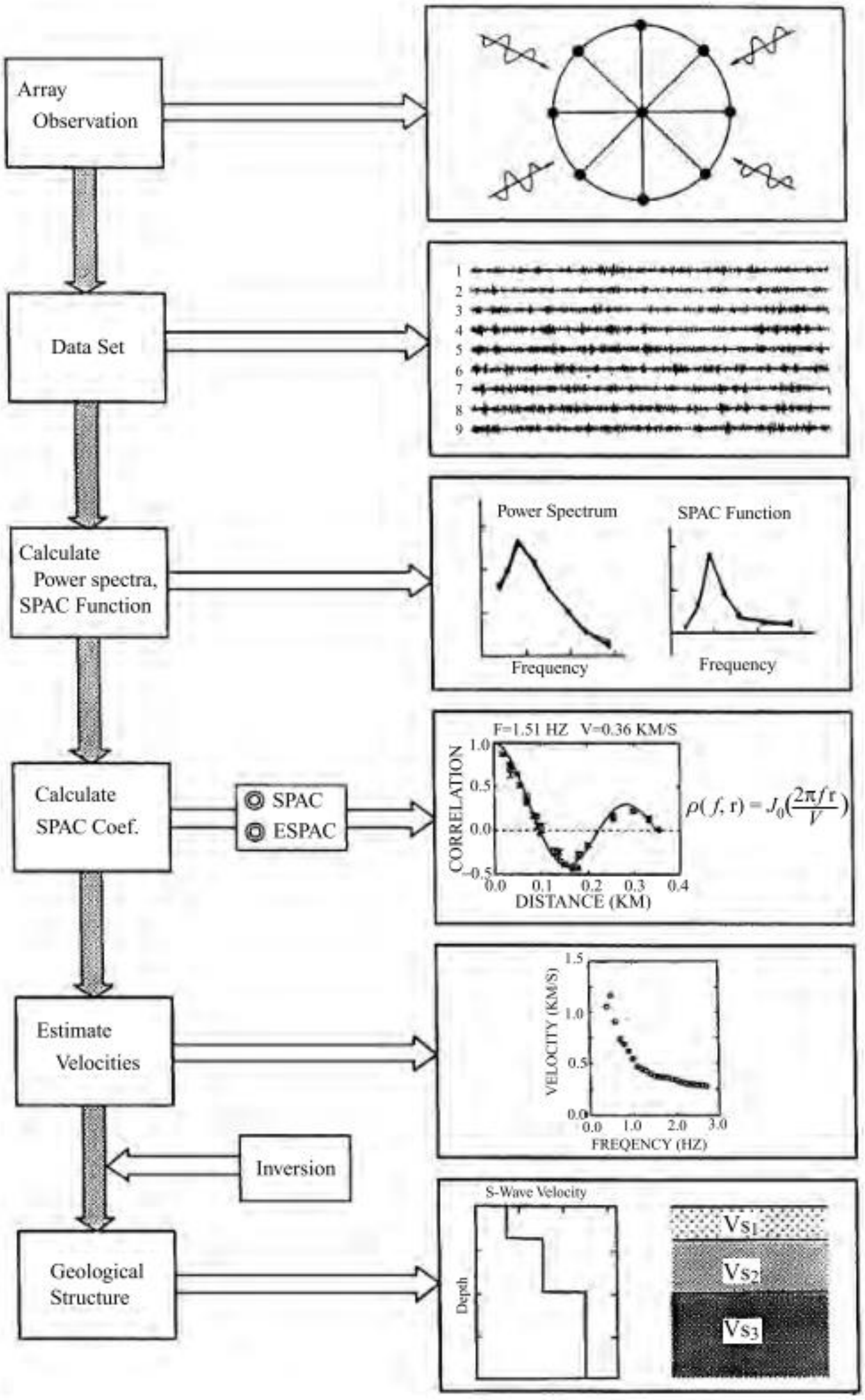
โดยสามารถคำนวณความเร็วเฟส $c(f)$ ในแต่ละความถี่ได้จากสมการที่ (2.22) ซึ่งเป็นส่วนกลับของสมการที่ (2.21)

$$c(f) = \frac{2\pi f r}{J_0^{-1}\big(\bar{g}(f,r)\big)} \tag{2.22}$$

จากสมการที่ (2.21) และ (2.22) จะสามารถสร้างเส้นโค้งการกระจายตัวจากเฟส $c(f)$ ในแต่ละความถี่ f โดยแผนผังการสร้างเส้นโค้งการกระจายตัวด้วยวิธีอัตสัมพันธ์เชิงระยะ และ ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างสัมประสิทธิ์อัตสัมพันธ์เชิงระยะ กับ ฟังก์ชันเบสเซลชนิดแรกอันดับที่ศูนย์แสดงดังรูปที่ 2.8 และ รูปที่ 2.9 ตามลำดับ

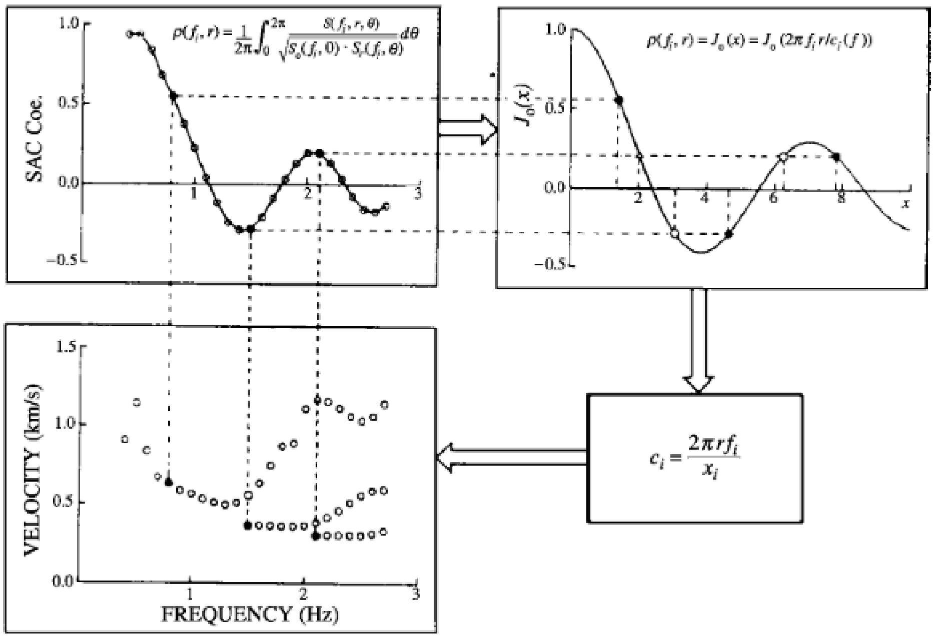
ซึ่งวิธีอัตสัมพันธ์เชิงระยะนั้นมีความสะดวกกว่าวิธีการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบแอคทีฟตรงที่ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้แหล่งกำเนิดคลื่นซึ่งทำให้สามารถลดจำนวนผู้ปฏิบัติงานภาคสนามลงได้ แต่เนื่องจากการเปรียบเทียบฟังก์ชันเบสเซลซึ่งอาจจะทำให้การวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวมีความยุ่งยากซึ่งในหัวข้อถัดไปจะอธิบายวิธี Power of Phase (POP) ซึ่งเป็นวิธีการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กที่ไม่จำเป็นต้องเปรียบเทียบฟังก์ชันเบสเซลรวมถึงใช้จำนวนจีโอโฟนขั้นต่ำน้อยกว่าวิธีอัตสัมพันธ์เชิงระยะซึ่งจะทำให้ต้นทุนของชุดอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนต่ำลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.8 แผนผังการวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวด้วยวิธีอัตสัมพันธ์เชิงระยะ

(Okada, 2003)



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบระหว่างสัมประสิทธิ์สัมประสิทธิ์อัตสัมพันธ์เชิงระยะ และ ฟังก์ชันเบสเซลชนิดแรกอันดับที่ศูนย์ (Okada, 2003)

2.2.4.4 Power of Phase (POP)

Power of Phase (Boonyatee, 2018) เป็นวิธีการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กซึ่งใช้จีโอโฟนจำนวนเพียง 3 ตัว ติดตั้งในรูปแบบวงกลมอาเรย์โดยไม่มีจีโอโฟนที่จุดกึ่งกลาง วิธี Power of Phase นั้นจะตรวจวัดเฟสโดยตรงจากจำนวนคลื่น (wave number) ในแต่ละความถี่เชิงมุมซึ่งไม่จำเป็นที่จะต้องเปรียบเทียบฟังก์ชันเบสเซล โดยคลื่นที่ตรวจวัดได้ในแต่ละจีโอโฟนจะถูกนำมาวิเคราะห์สเปกตรัมโดยสมการมุมเฟสปรากฏ $\phi(r)$ ซึ่งเป็นผลมาจากรัศมีวงอาเรย์ r ,จำนวนคลื่น k , ทิศทางของคลื่น α และ มุมเฟสของสัญญาณรบกวน ϕ_0^* สามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.23)

$$\phi(r) = krcos(\theta + \alpha) + \phi_0^* + \sigma_\eta \tag{2.23}$$

โดยมุมเฟสที่ตรวจวัดได้ตามสมการที่ (2.23) นั้นยังมีผลกระทบของทิศทางคลื่น α ที่แตกต่างกันไปตามช่วงเวลารวมถึงมุมเฟสที่คลาดเคลื่อนซึ่งเป็นผลกระทบของสัญญาณรบกวน ϕ_0^* วิธี Power of Phase นั้นจำเป็นที่จะต้องกำจัดผลกระทบทั้ง 2 อย่างนี้โดยเริ่มต้นจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสที่ตรวจวัดได้จากจีโอโฟน ทั้ง 3 ตัวด้วยค่าความแปรปรวนของมุมเฟส σ^2 ตามสมการที่ (2.24)

$$\sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{s+1}^{N}(\phi(s) + \phi_0^* - \mu)^2 \tag{2.24}$$

โดยที่ $\phi(s)$ คือมุมเฟสปรากฏจากจีโอโฟนตัวที่ s, N คือจำนวนจีโอโฟนรอบอาเรย์วงกลม, μ คือ ค่าเฉลี่ยของมุมเฟสรอบอาเรย์วงกลมซึ่งจะสังเกตุได้ว่าเมื่อทำการจัดเรียงอาเรย์ในรูปแบบวงกลมที่มีรัศมีเท่ากันค่าเฉลี่ยของมุมเฟสจะมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งสมการที่ (2.24) นั้นจะสามารถตัดพจน์ของค่าเฉลี่ยมุมเฟส μ ได้แต่ยังคงเหลือผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกซ์ ซึ่งสามารถกำจัดได้ด้วยการแบ่งหน้าต่างระหว่างการแปลงฟูรีเยจากเก็บตัวอย่างคลื่นไหวสะเทือนในระยะเวลาที่นานเพียงพอโดยความแปรปรวนของมุมเฟสสามารถจัดรูปใหม่ได้ตามสมการที่ (2.25)

$$\sigma^2 = \frac{1}{N}\underbrace{\sum_{s+1}^{N}\left(krcos(\theta + \alpha)\right)^2}_{A} \tag{2.25}$$

ซึ่งพจน์ A สามารถจัดรูปแบบใหม่ดังสมการที่ (2.26)

$$\begin{aligned} A &= (kr)^2\sum_{s+1}^{N}cos(\theta + \alpha)^2 \\ &= (kr)^2\sum_{s+1}^{N}\left(\frac{e^{i(\theta_s+\alpha)} + e^{-i(\theta_s+\alpha)}}{2}\right)^2 \\ &= (kr)^2\sum_{s+1}^{N}\left(\underbrace{\frac{e^{2i(\theta_s+\alpha)}+e^{-2i(\theta_s+\alpha)}}{4}}_{B} + \frac{2}{4}\right) \end{aligned} \tag{2.26}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากสูตรของออยเลอร์ (Euler's formula) พจน์ B สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันโคไซน์ และ จัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (2.27)

$$\begin{aligned} A &= (kr)^2\sum_{s+1}^{N}\left(\frac{\cos\left(2(\theta_s + \alpha)\right)}{2} + \frac{1}{2}\right) \\ &= (kr)^2\sum_{s+1}^{N}\frac{\cos\left(2(\theta_s + \alpha)\right)}{2} + \sum_{s+1}^{N}\frac{1}{2} \end{aligned} \tag{2.27}$$

โดยเมื่อทำการจัดเรียงอาเรย์ในรูปแบบวงกลมที่มีรัศมีเท่ากันจะทำให้มุมรัศมีระหว่างจีโอโฟน θ_s นั้นมีผลรวมเท่ากับ 360 องศา รวมถึงทิศทางของคลื่น α นั้นมีค่าคงที่จึงทำให้ผลลัพธ์ของฟังก์ชันโคไซน์จากมุมเฟสที่ตรวจวัดได้จากทุกจีโอโฟนมีค่าเท่ากับ 0 ซึ้งจะสามารถจัดรูปพจน์ A และ ความแปรปรวนของมุมเฟสใหม่ได้ตามสมการที่ (2.28) และ (2.29) ตามลำดับ

$$A = \frac{N(kr)^2}{2} \tag{2.28}$$

$$\sigma^2 = \frac{(kr)^2}{2} \tag{2.29}$$

ซึ่งจะสังเกตได้ว่ารัศมีของวงกลมอาเรย์นั้นเป็นตัวแปรที่กำหนดเอง ดังนั้นการคำนวณความแปรปรวนของมุมเฟส σ^2 ในแต่ละความถี่จะสามารถคำนวณจำนวนคลื่น k ได้ซึ่งจำนวนคลื่นในแต่ละความถี่เชิงมุม $k(\omega)$ นั้นจะสามารถนำไปคำนวณความเร็วเฟส $c(\omega)$ ในแต่ละความถี่เชิงมุมได้ตามสมการที่ (2.30)

$$c(\omega) = \omega k(\omega) \tag{2.30}$$

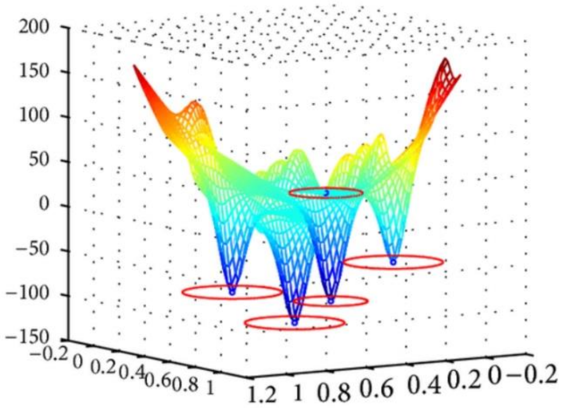
ซึ่งจะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวด้วยวิธี Power of Phase นั้นไม่จำเป็นที่จะต้องเปรียบเทียบความต่างเฟส กับ ฟังก์ชันเบสเซลซึ่งจะทำให้วิธี Power of Phase มีความสะดวกในการวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวมากกว่าวิธีอัตสัมพันธ์เชิงระยะ รวมถึงจำนวนจีโอโฟนขั้นต่ำที่ต้องการสำหรับการสำรวจด้วยวิธี Power of Phase มีน้อยกว่าจึงทำให้อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนมีต้นทุนที่ถูกลง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3 การคำนวณย้อนกลับ

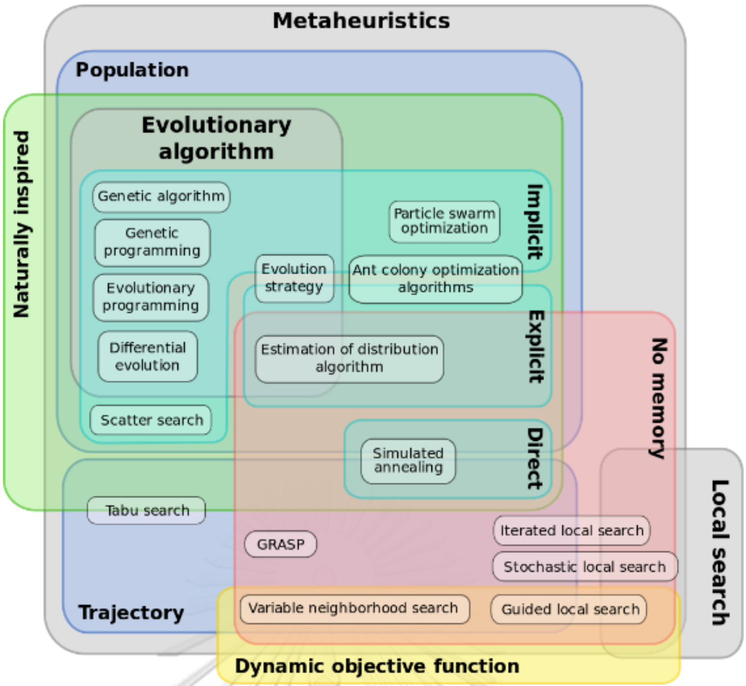
การคำนวณย้อนกลับของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนนั้นเป็นวิธีการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เพื่อหาคำตอบซึ่งก็คือความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน โดยที่พื้นฐานความรู้ในปัจจุบันนั้นยังไม่สามารถคำนวณความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินโดยตรงจากข้อมูลเส้นโค้งการกระจายตัวได้อย่างแม่นยำ ซึ่งวิธีการคำนวณย้อนกลับของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนประกอบไปด้วย 2 องค์ประกอบพื้นฐาน (Ganji et al., 1998) ได้แก่ 1) อัลกอริทึมสำหรับสร้างเส้นโค้งการกระจายทางทฤษฎี (Theoretical dispersion curves) และ 2) อัลกอริทึมสำหรับเลือกโมเดลคุณสมบัติของชั้นดินที่เหมาะสมที่สุด (Optimizer) โดย (Oscillations, 1972) ได้พัฒนาเทคนิคการผกผันทั่วไป (generalized inversion technique) ซึ่งสมมุติให้ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นดิน และ การเปลี่ยนแปลงความเร็วเฟสของเส้นโค้งการกระจายตัว

เป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ซึ่งวิธีการเชิงเส้นจะมีความแม่นยำก็ต่อเมื่อมีข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินเริ่มต้นใกล้เคียงกับชั้นดินจริง (Hu, Qiu, Zhang, & Ben-Zion, 2020) (Dal Moro et al., 2007) โดยเมื่อพิจารณาลักษณะของพื้นผิวความคลาดเคลื่อน (error surface) ของการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินที่มักจะมีจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ (local minimum) หลายจุด (multimodal error surface) ตามรูปที่ 2.10 ซึ่งทำให้วิธีการเชิงเส้นอย่างเทคนิคการผกผันทั่วไปนั้นมักจะได้ผลลัพธ์ที่อยู่ในจุดต่ำสุดสัมพัทธ์



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างพื้นผิวความคลาดเคลื่อนที่มีจุดต่ำสุดสัมพัทธ์หลายจุด
[https://www.hindawi.com]

ต่อมาเมต้าฮิวริสติกส์ (Metaheuristic) ซึ่งถูกพัฒนามาสำหรับงานทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) (Yamanaka, 2005) เป็นวิธีการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ในระดับสูงซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับประเภทของปัญหา (problem-independent algorithmic) (Gunantara & Nurweda Putra, 2019) โดยเมต้าฮิวริสติกส์จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักได้แก่ 1) เมต้าฮิวริสติกส์จากพื้นฐานการค้นหาเฉพาะที่ (local search) และ เมต้าฮิวริสติกส์จากพื้นฐานการสุ่มประชากร (populational) โดยอัลกอริทึมเมต้าฮิวริสติกส์ที่เป็นที่รู้จักมากที่สุด (Abd, M., & M., 2014) อย่างขั้นตอนเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) (Jonh Henry Holland, 1992) (Srinivas & Patnaik, 1994) (John H. Holland, 2019) วิธีการจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing, SA) (Annealing, 1988) (Rutenbar, 1989) และ วิธีการค้นหาแบบทาบู (Tabu Search, TS) (Rutenbar, 1989) (Fred Glover, 1989) ได้ถูกนำมาใช้คำนวณย้อนกลับในการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนซึ่งวิธีการเมต้าฮิวริสติกส์จะมีโอกาสได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำถึงแม้จะไม่มีข้อมูลคุณสมบัติชั้นดินเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกับชั้นดินจริง (Balamurugan, Natarajan, & Premalatha, 2015) (Balamurugan et al., 2015) โดยแผนภาพออยเลอร์ซึ่งจำแนกเมต้าฮิวริสติกส์วิธีต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพออยเลอร์การจำแนกประเภทเมต้าฮิวริสติก [https://en.wikipedia.org/wiki/Metaheuristic]

2.3.1 เทคนิคการผกผันทั่วไป

เทคนิคการผกผันทั่วไป (Ganji et al., 1998) เป็นวิธีการคำนวณย้อนกลับโดยสมมุติให้ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงตัวแปรคุณสมบัติชั้นดิน และ การเปลี่ยนแปลงความเร็วเฟสของเส้นโค้งการกระจายตัวในแต่ละจุดข้อมูล (datapoint) เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นซึ่งสามารถเขียนแทนด้วยเมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian matrix) โดยที่ความเร็วเฟส c เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน v_s, ความหนาของชั้นดิน h, อัตราส่วนปัวซอง υ และ ความหนาแน่นของชั้นดิน ρ ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.31)

$$C_i^{\tau} = F(v_s, h, \upsilon, \rho) \qquad (2.31)$$

สมการที่ (2.31) สามารถกระจายฟังก์ชันของความเร็วเฟสซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามคุณสมบัติของชั้นดิน Δp ด้วยการขยายเทย์เลอร์ (Taylor expansion) ได้ตามสมการที่ (2.32)

$$t(f) = \frac{\phi(f)}{360f} \qquad (2.32)$$

โดยที่ C_i^{τ} คือความเร็วเฟสของตำแหน่งข้อมูลที่ i ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงตัวแปรคุณสมบัติชั้นดิน Δp_j แสดงดังสมการที่ (2.33)

$$\Delta p_j = p_j + p_j^0, j = 1, 2, \dots, K \quad (2.33)$$

โดยที่ K คือจำนวนของตัวแปรคุณสมบัติชั้นดินทั้งหมดโดยให้อัตราส่วนของปัวซอง และความหนาแน่นของชั้นดินเป็นฟังก์ชันของความเร็วคลื่นเฉือนดังนั้นจำนวนตัวแปรทั้งหมดของชั้นดินจะมีค่าเท่ากับ $2L - 1$ โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฟสและ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นดินได้ดังสมการที่ (2.34)

$$\Delta c = A\Delta p \quad (2.34)$$

โดยที่ Δc คือการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฟสในรูปแบบอาเรย์ขนาด N, A คือเมทริกซ์จาโคเบียนขนาดเท่ากับ $N\,x\,K$ และ Δp คือการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นดินในรูปแบบอาเรย์ขนาด k ซึ่งเมทริกซ์จาโคเบียนแสดงดังสมการที่ (2.35)

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_1^\tau}{\partial p_1} & \frac{\partial C_1^\tau}{\partial p_2} & \cdots & \frac{\partial C_1^\tau}{\partial p_k} \\ \frac{\partial C_2^\tau}{\partial p_1} & \frac{\partial C_2^\tau}{\partial p_2} & \cdots & \frac{\partial C_2^\tau}{\partial p_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial C_N^\tau}{\partial p_1} & \frac{\partial C_N^\tau}{\partial p_2} & \cdots & \frac{\partial C_N^\tau}{\partial p_k} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

ซึ่งการการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฟสในแต่ละจุดข้อมูลเส้นโค้งการกระจายตัวจากผลของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติชั้นดินในแต่ละตัวแปรจะถูกเก็บไว้ในเมทริกซ์จาโคเบียน ซึ่งความคลาดเคลื่อนระหว่างความเร็วเฟสจริงจากการตรวจวัดคลื่น C^{obs} และ ความเร็วเฟสทางทฤษฎี C^{The} จากการคำนวณจะถูกประเมินด้วยฟังก์ชันความคลาดเคลื่อน ε ตามสมการที่ (2.36)

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (C_i^{obs} - C_i^{the})^2} \quad (2.36)$$

โดยที่ผลลัพธ์ของฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนนั้นจะบ่งบอกถึงทิศทางของความเร็วเฟสทางทฤษฎีใหม่ที่คาดว่าจะมีความใกล้เคียงกับความเร็วเฟสจริงจากการตรวจวัดมากยิ่งขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นดินใหม่ที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงความเร็วเฟสทางทฤษฎีใหม่สามารถหาได้จากการแยกเอกฐานเมตริก (Singular Value Decomposition, SVD) เพื่อคำนวณ

เมตริกสับเปลี่ยนสังยุค (pseudo inverse matrix) ของเมตริกจาโคเบียน A^{+} ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.37)

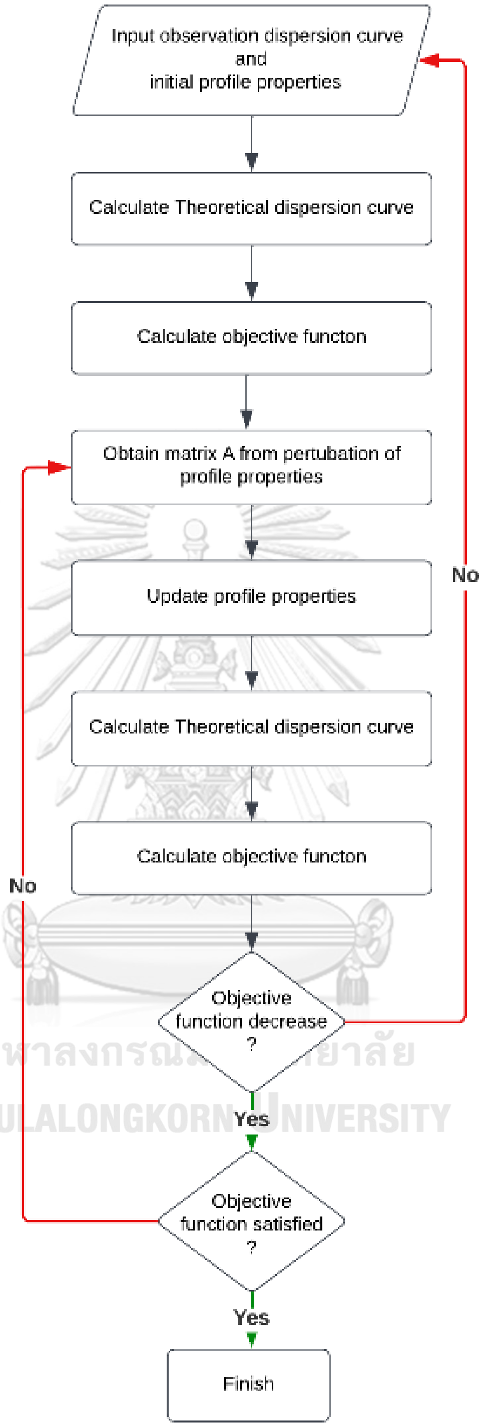
$$\Delta p = A^{+}\Delta c \tag{2.37}$$

โดย (Potter, 1999) ได้เสนอวิธีการคำนวณความไม่แน่นอน δ จากอัตราการเปลี่ยนแปลงตัวแปรคุณสมบัติของชั้นดินจากสมการก่อนหน้าซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.38)

$$\delta(\Delta p_j) = \sigma\sqrt{\sum_{k=1}^{K}\left(\frac{V_{jk}}{S_{kk}}\right)^2}, j = 1, 2, \ldots, K \tag{2.38}$$

โดยที่ V_{jk} และ S_{kk} เป็นส่วนประกอบเมตริก V และ S ซึ่งสามารถหาได้จากการแยกเอกฐานของเมตริกจาโคเบียน โดยผังงานการคำนวณย้อนกลับด้วยเทคนิคการผกผันทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเทคนิคการผกผันทั่วไปนั้นมักจะได้ผลลัพธ์อยู่ในจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ (Local minimum) ซึ่งเหมาะสำหรับพื้นผิวผิดพลาดรูปแบบนูน (Convex error surface) เนื่องจากไม่มีอัลกอริทึมสำหรับการเข้าใกล้ หรือ หาจุดต่ำสุดสัมบูรณ์ (Global minimum) แต่ในความเป็นจริงแล้วปัญหาการคำนวณย้อนกลับของการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนมักจะมีจุดต่ำสุดสัมพัทธ์หลายจุดอยู่บนพื้นผิวผิดพลาดโดยในหัวข้อถัดไปอัลกอริทึมแบบเมต้าฮิวริสติกส์นั้นถูกนำมาใช้สำหรับการคำนวณย้อนกลับซึ่งไม่จำเป็นที่จะต้องใช้ข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกับชั้นดินจริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 2.12 แผนผังเทคนิคการผกผันทั่วไป

2.3.2 การจำลองการอบเหนียว

การจำลองการอบเหนียวเป็นอัลกอริทึมเมต้าฮิวริสติกส์ซึ่งมีพื้นฐานจากการค้นหาเฉพาะที่ซึ่งเปรียบเทียบการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ กับ การหลอมของเหล็ก (Annealing, 1988) ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการคำนวณย้อนกลับของการสำรวจคลื่นผิวดิน (Sen & Stoffa, 1990) (Martínez et al., 2000) (Beaty et al., 2002) โดยหลักการคือเมื่อวัสดุที่มีสถานะเป็นของแข็งได้รับพลังงานความร้อนจนทำให้อนุภาคของแข็งกระจายตัวอยู่ในสถานะของเหลว เมื่ออุณหภูมิเริ่มเย็นตัวลงของเหลวนั้นจะกลับมามีสถานะเป็นของแข็งโดยที่อัตราการลดลงของอุณหภูมิจะมีผลต่อการจัดเรียงอนุภาค กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิมีอัตราการลดลงที่มากอนุภาคของแข็งจะจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Amorphous glass) ซึ่งเปรียบเทียบได้กับผลลัพธ์ของการหาค่าเหมาะสมที่สุดซึ่งได้ผลลัพธ์จะอยู่ในจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ (Local minimum) แต่เมื่อการลดลงของอุณหภูมิมีอัตราที่ต่ำอนุภาคของแข็งจะจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ (crystalline) ซึ่งเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของการหาค่าเหมาะสมที่สุดอยู่ในจุดต่ำสุดสัมบูรณ์ (Global minimum) (Beaty et al., 2002) โดยการคำนวณย้อนกลับด้วยการจำลองการอบเหนียวเริ่มต้นจากการสร้างชุดข้อมูล S ซึ่งเป็นอาเรย์ที่ประกอบไปด้วยตัวแปรคุณสมบัติชั้นดิน m_i เริ่มต้นสำหรับการคำนวณเส้นโค้งการกระจายตัวทางทฤษฎี d^f_{the} เพื่อเปรียบเทียบกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัด d^f_{obs} ด้วยฟังก์ชันพลังงาน E ตามสมการที่ (2.39)

$$E = \sum_f \left(d^f_{obs} - d^f_{pred}\right)^2 \tag{2.39}$$

โดยทำการสร้างโมเดลตัวแปรคุณสมบัติชั้นดินใหม่ m_{i+1} และ ทำการคำนวณฟังก์ชันพลังงาน $E(m_{i+1})$ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับฟังก์ชันพลังงานของโมเดลตัวแปรคุณสมบัติชั้นดินก่อนหน้า $E(m_i)$ ตามสมการที่ (2.40)

$$\Delta E = E(m_{i+1}) - E(m_i) \tag{2.40}$$

จากสมการที่ (2.40) จะสังเกตได้ว่าเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันพลังงาน ΔE มีเครื่องหมายติดลบแสดงว่าโมเดลคุณสมบัติของชั้นดินใหม่ m_{i+1} นั้นจะสร้างเส้นโค้งการกระจายตัวทางทฤษฎีที่ใกล้เคียงกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดมากยิ่งขึ้นซึ่งในกรณีที่ 1 นี้ชุดข้อมูลตัวแปรคุณสมบัติชั้นดินใหม่จะถูกจัดเก็บแทนตัวแปรคุณสมบัติชั้นดินก่อนหน้า แต่ในทางกลับกันเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันพลังงานมีเครื่องหมายเป็นบวกซึ่งแสดงว่าโมเดลตัวแปรคุณสมบัติของชั้นดินใหม่นั้นจะสร้างเส้นโค้งการกระจายตัวทางทฤษฎีที่มีความคลาดเคลื่อนมากขึ้น ซึ่งในกรณีที่ 2 นี้โมเดลตัวแปรคุณสมบัติของชั้นดินใหม่จะถูกเลือกด้วยเงื่อนไขจากความน่าจะเป็น $P(E_i)$ ซึ่งแสดงดังสมการที่ (2.41)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

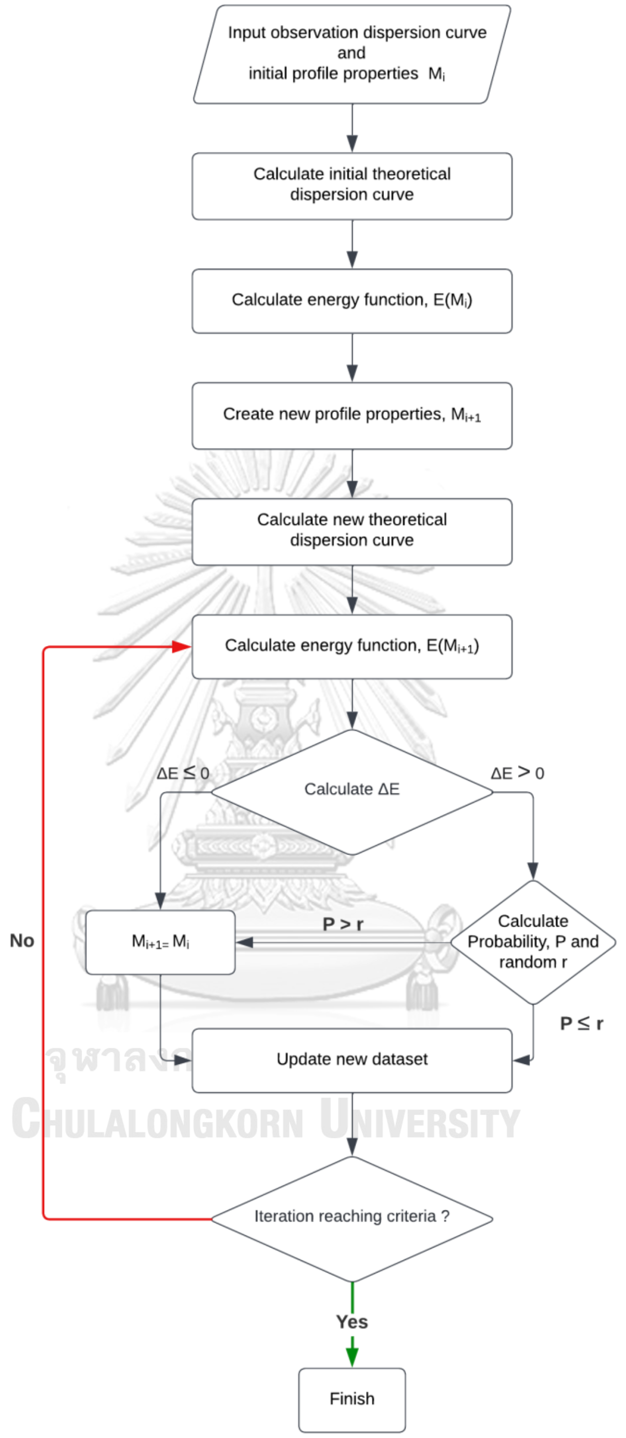
$$P(E_i) = \frac{\exp\left(-\frac{E_i}{K_b T_i}\right)}{\sum_{j\in S} \exp\left(-\frac{E_j}{K_b T_i}\right)} \tag{2.41}$$

โดย K_b คือค่าคงตัวบ็อลทซ์มันซึ่งมักจะแทนด้วย 1, T_i คือตัวแปรควบคุมอุณหภูมิซึ่งสอดคล้องกับจำนวนรอบของการวนซ้ำ i ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.42)

$$T_i = \frac{T_0}{\ln(i)} \tag{2.42}$$

โดยที่ T_0 คืออุณหภูมิเริ่มต้นโดยแผนผังการจำลองการอบเหนียวสำหรับการคำนวณย้อนกลับของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันพลังงานมีเครื่องหมายเป็นบวกซึ่งหมายถึงการที่ชุดตัวแปรคุณสมบัติของชั้นดินใหม่นั้นออกห่างจากจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ซึ่งทำให้มีโอกาสที่จะเข้าใกล้จุดต่ำสุดสัมบูรณ์มากขึ้นซึ่งแตกต่างจากขั้นตอนการแก้ปัญหาการปีนเขา (Hill climbing) ที่จะเลือกเพียงชุดตัวแปรที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันพลังงาน ΔE ลดลงโดยที่อุณหภูมิเริ่มต้นนั้นจะเป็นตัวแปรสำคัญที่จะกำหนดพฤติกรรมของการค้นหา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.13 แผนผังการจำลองการอบเหนียวสำหรับการคำนวณย้อนกลับของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.3 การค้นหาแบบทาบู

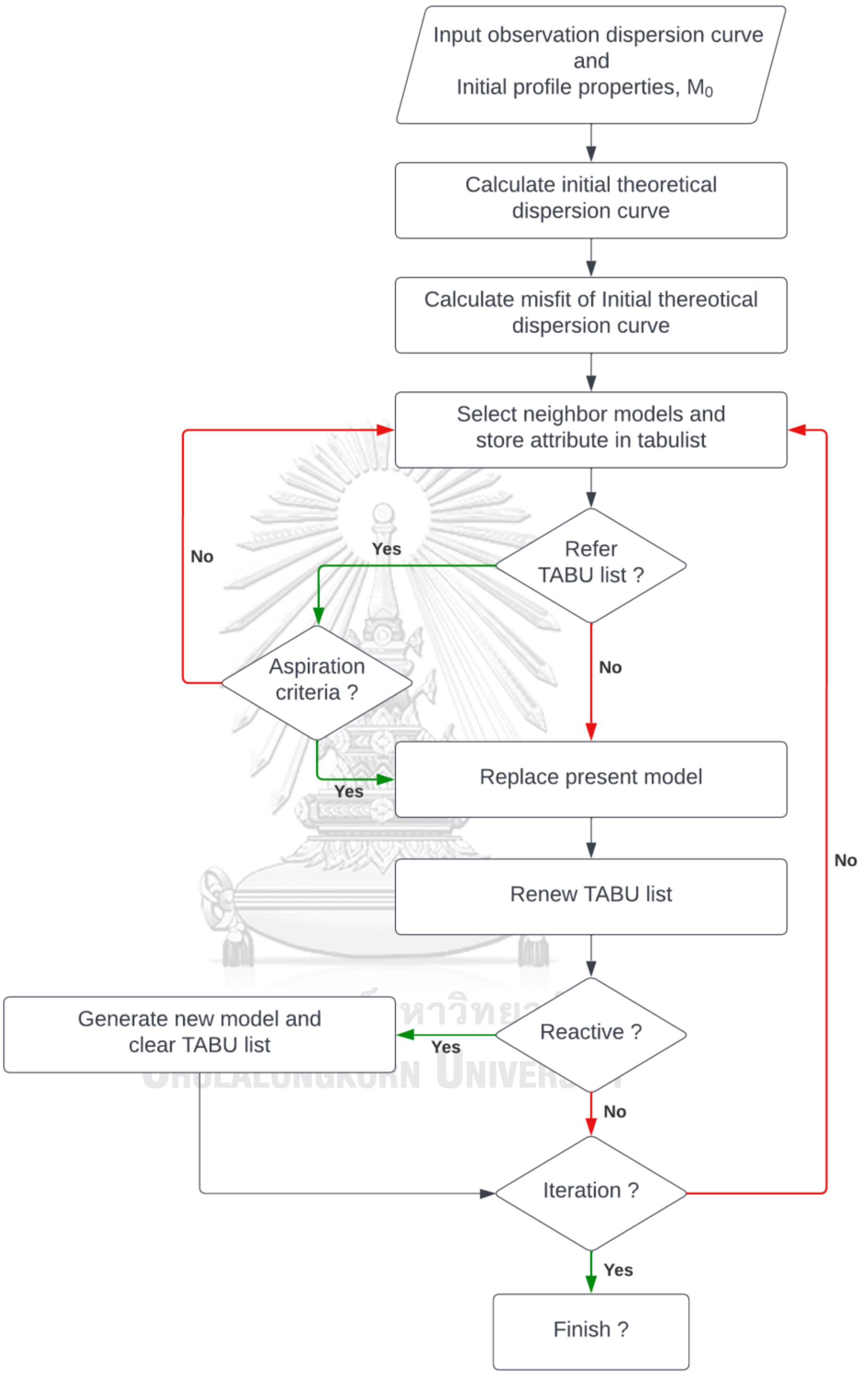
การค้นหาแบบทาบูเป็นหนึ่งในเมต้าฮิวริสติกส์พื้นฐานจากการค้นหาเฉพาะที่เช่นเดียวกับการจำลองการอบเหนียวโดยการค้นหาแบบทาบูพัฒนามาจากแนวคิดหน่วยความจำยืดหยุ่น (flexible memory) ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการคำนวณย้อนกลับสำหรับการสำรวจคลื่นไหวสะเทือน (Vinther & Mosegaard, 1996) โดยเริ่มต้นด้วยการสุ่มโมเดลคุณสมบัติชั้นดินเริ่มต้น m_0 และ ทำการสร้างโมเดลคุณสมบัติของชั้นดินข้างเคียง (neighbor model) m_1 ซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับคุณสมบัติชั้นดินเดิมดังสมการที่ (2.43)

$$m_1^i = m_0^i \pm \frac{1}{N_t}\left(m_{max}^i - m_{min}^i\right) \tag{2.43}$$

โดยที่ m_{max} และ m_{min} คือขอบเขตสูงที่สุด และ ต่ำที่สุดของตัวแปรแต่ละตัวซึ่งมาจากการคาดการณ์โดยโมเดลใหม่นี้จะถูกเลือกมาจากชุดข้อมูลโมเดลข้างเคียงล่าสุดตามเงื่อนไขได้แก่ 1) โมเดลข้างเคียงใหม่ที่จะถูกเลือกจะต้องมีความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุดในหมู่โมเดลข้างเคียงในรอบเดียวกัน และ 2) โมเดลข้างเคียงใหม่ที่ถูกเลือกจะต้องไม่มีคุณลักษณะที่ตรงตามตารางทาบู (Tabu list) โดยรายการทาบูจะมีขนาดที่ชัดเจนซึ่งจะเก็บจำนวนคุณลักษณะได้เท่ากับขนาดที่กำหนดซึ่งคุณลักษณะที่เก่าที่สุดในรายการทาบูจะถูกลบออกเมื่อมีคุณลักษณะใหม่เข้ามา โดยลำดับจะถูกเลื่อนในทุกแถวดังนั้นคุณลักษณะล่าสุดจะถูกเก็บในแถวแรก และ จะเลื่อนลงไปเลื่อยๆตามรอบการวนซ้ำ

ซึ่งขอดีของการเก็บข้อมูลคุณลักษณะเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเลือกอัตราการเปลี่ยนแปลงตัวแปรเดิมซ้ำๆ ซึ่งอาจจะทำให้ผลลัพธ์มีแนวโน้มที่เอนเอียงไปยังจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ โดยที่ขนาดของรายการทาบูนั้นเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของการค้นหาแบบทาบู เช่นเดียวกับ อุณหภูมิเริ่มต้นของการจำลองการอบเหนียวซึ่งการค้นหาแบบทาบูนั้นยังมีส่วนเพิ่มเติมที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีมากยิ่งขึ้นได้แก่ 1) เกณฑ์ความปรารถนา (aspiration criteria) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงข้อกำหนดของการเลือกโมเดลคุณสมบัติชั้นดินใหม่ซึ่งจะมีโอกาสที่โมเดลคุณสมบัติชั้นดินที่ดีที่สุดซึ่งมีคุณลักษณะอยู่ในรายการทาบูถูกเลือก และ 2) กฎการกำเนิดใหม่ (reactive rule) จะทำการสุ่มเลือกโมเดลคุณสมบัติของชั้นดินเพื่อเริ่มต้นการวนซ้ำใหม่ รวมถึงล้างข้อมูลในรายการทาบูทั้งหมด เมื่อชุดข้อมูลของโมเดลคุณสมบัติเดิมมีความคลาดเคลื่อนมากขึ้นในทุกโมเดลซึ่งแผนผังการค้นหาทาบูแสดงดังรูปที่ 2.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.14 แผนผังการค้นหาแบบทาบูสำหรับการคำนวณย้อนกลับของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือน

2.2.4 ขั้นตอนเชิงพันธุ์กรรม

ขั้นตอนเชิงพันธุกรรมเป็นหนึ่งในเมต้าฮิวริสติกส์ซึ่งมีพื้นฐานจากการสุ่มประชากรโดยการจำลองกลยุทธ์การวิวัฒนาการทางชีววิทยา โดยเริ่มต้นพัฒนาเพื่อใช้สำหรับงานทางด้านปัญญาประดิษฐ์โดย (Holland 1975) และ ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณย้อนกลับสำหรับการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือน (Sambridge & Drijkoningen, 1992) (Lomax & Snieder, 1995) (Hunaidi, 1998) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วรูปแบบของข้อมูลในการคำนวณด้วยขั้นตอนเชิงพันธุ์กรรมจะถูกเปลี่ยนเป็นเลขฐานสอง (Binary) ซึ่งคล้ายกับการจัดเรียงตัวของโครโมโซมในระบบพันธุ์กรรม โดยเริ่มต้นจากการสุ่มโมเดลตัวแปรคุณสมบัติชั้นดินในรุ่นแรก (Parent) m_0 ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรคุณสมบัติของชั้นดิน x_i ตัวที่ i ซึ่งเป็นตัวเลขฐานสิบ (Decimal) แล้วทำการสร้างโมเดลใกล้เคียงด้วยขอบเขตบน a_i และขอบเขตล่าง b_i ที่ตัวแปรคุณสมบัติชั้นดินตัวที่ i โดยสมการที่ (2.44) แสดงสมการที่ใช้สำหรับการสร้างโมเดลข้างเคียง

$$x_i = a_i + jd_i \tag{2.44}$$

โดยที่ j คือตำแหน่งของของโมเดลข้างเคียงที่ต้องการซึ่งมีจำนวน N_i ตัว และ d_i คือช่วงความห่างของตัวแปรคุณสมบัติชั้นดินแต่ละโมเดลซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.45)

$$d_i = \frac{a_i + b_i}{N_i} \tag{2.45}$$

โดยที่ทุกโมเดลในชุดข้อมูลที่ถูกสร้างมาใหม่ตามสมการที่ (2.45) ซึ่งมีจำนวนโมเดลทั้งหมด Q โมเดล ถูกประเมิณผลความคลาดเคลื่อน $\phi(m)$ ระหว่างเส้นโค้งการกระจายตัวทางทฤษฎี และ เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดด้วยฟังก์ชันความคลาดเคลื่อน และ แปลงข้อมูลให้อยู่ในเลขฐานสองก่อนที่จะเข้าไปยังขั้นตอนการคัดเลือกเชิงพันธุ์กรรมซึ่งประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนได้แก่ 1) ขั้นตอนการคัดสรรค์ (Selection) 2) ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนยีนส์ (Crossover) และ 3) ขั้นตอนการกลายพันธ์ (Mutation)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยขั้นตอนการคัดสรรค์จะทำการเลือกโมเดลคุณสมบัติชั้นดินใหม่ด้วยเงื่อนไขความน่าจะเป็นสำหรับการเลือกโมเดลโดย (Sambridge & Drijkoningen, 1992) เสนอวิธีการคำนวณความน่าจะเป็น $P_r(m)$ สำหรับการเลือกโมเดลคุณสมบัติของชั้นดินใหม่ 2 วิธี คือ วิธีการคำนวณเชิงเส้นแสดงดังสมการที่ (2.46) และ (2.48) และ วิธีเลขชี้กำลัง ดังสมการที่ (2.47) และ (2.49)

$$P_r(m_k) = a - b\phi(m_k) \tag{2.46}$$

$$b = Q^{-1}\left(\phi_{max} - \phi_{average}\right)^{-1}, a \geq b\phi_{max} \tag{2.47}$$

$$P_r(m_k) = A\exp[-B\phi(m_k)] \tag{2.48}$$

$$B = (\phi_\sigma)^{-1}, A = \sum_j \left[\exp\left(-B\phi_j\right)\right]^{-1} \tag{2.49}$$

โดยที่ ϕ_{max}, $\phi_{average}$, ϕ_σ คือ ความคลาดเคลื่อนสูงสุดของโมเดลคุณสมบัติชั้นดินใหม่ในชุดข้อมูล, ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของโมเดลคุณสมบัติชั้นดินใหม่ในชุดข้อมูล และ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคลาดเคลื่อนของโมเดลคุณสมบัติชั้นดินใหม่ในชุดข้อมูล ซึ่งประชากรโมเดลคุณสมบัติของชั้นดินรุ่นใหม่ (Offspring) ที่ถูกเลือกนี้จะถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่มก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการแลกเปลี่ยนยีนส์ตามเงื่อนไขเกณฑ์ความน่าจะเป็น (threshold) ของการเลือกยีนส์มาทำการแลกเปลี่ยน $P_c(m)$ ซึ่งเกณฑ์ความน่าจะเป็นนี้จะถูกกำหนดให้มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โดยที่ 0 หมายถึงไม่มีประชากรโมเดลคุณสมบัติของชั้นดินที่ถูกเลือกทำการแลกเปลี่ยนยีนส์ ในทางกลับกันเกณฑ์ความน่าจะเป็นของการเลือกยีนส์มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงประชากรโมเดลคุณสมบัติของชั้นดินทุกโมเดลจะถูกเลือกมาแลกเปลี่ยนยีนส์ ซึ่งโอกาสของการแลกเปลี่ยนยีนส์ของโมเดลใดๆ นี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรสุ่มในแต่ละโมเดลซึ่งจะสุ่มตัวเลขระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งถ้าหากตัวแปรสุ่มมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ความน่าจะเป็นของการเลือกยีนส์โมเดลนั้นจะถูกทำการแลกเปลี่ยนยีนส์กับโมเดลอื่น แต่ถ้าหากตัวแปรสุ่มมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเกณฑ์ความน่าจะเป็นของการเลือกยีนส์โมเดลนั้นจะไม่ถูกนำมาแลกเปลี่ยนยีนส์

ซึ่งการแลกเปลี่ยนยีนส์ทำโดยการแลกเปลี่ยนชุดบิตสตริง (Bit-String) ในช่วงที่กำหนดซึ่งจะได้โมเดลคุณสมบัติของชั้นดินใหม่โดยตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนยีนส์แบบจุดเดียว (Single Point Crossover) แสดงวิธีการแลกเปลี่ยนยีนส์ด้วยวิธีแบบจุดเดียว (Single Point Crossover) ที่ตำแหน่งบิตสตริงตัวที่ 5 หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการแลกเปลี่ยนยีนส์แล้วขั้นตอนต่อมาคือขั้นตอนการกลายพันธ์ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของขั้นตอนเชิงพันธุ์กรรมซึ่งจะทำการคัดเลือกตำแหน่งบิตสตริงตามเงื่อนไขความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ P_m ซึ่งคำนวณตามสมการที่ (2.50)

$$P_m = \frac{1}{l} \tag{2.50}$$

โดยที่ l คือจำนวนของบิตสตริงในแต่ละโมเดล ซึ่งตัวอย่างของการกลายพันธุ์แบบบิตสตริง (Bit string mutation) ที่บิตสตริงตำแหน่งที่ 4 และ แผนผังอัลกอริทึมวิธีเชิงพันธุกรรมตามตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการกลายพันธ์แบบบิตสตริง (Bit string mutation) และ รูปที่ 2.15

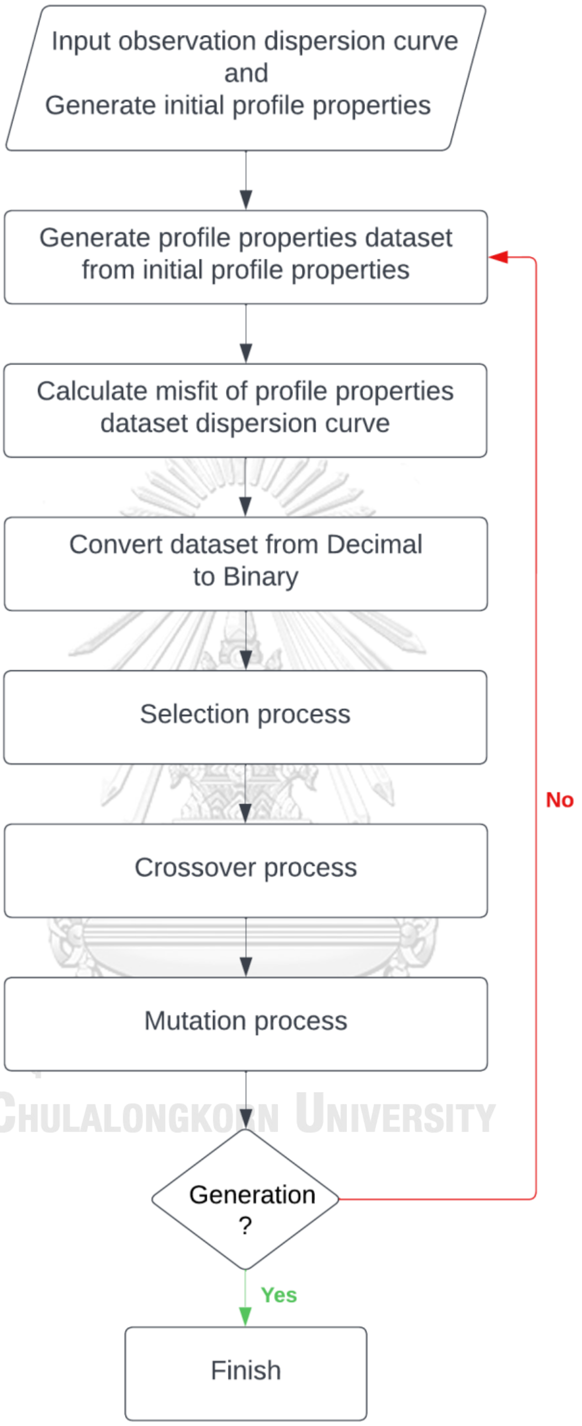
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนยีนส์แบบจุดเดียว (Single Point Crossover)

Parent 1	11011 | 00100110110
Parent 2	11011 | 11000011110
Offspring 1	11011 | 11000011110
Offspring 2	11011 | 00100110110

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการกลายพันธ์แบบบิตสตริง (Bit string mutation)

Before mutation	1101100100110110
After mutation	1100100100110110

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.15 แผนผังขั้นตอนเชิงพันธุ์กรรมสำหรับการคำนวณย้อนกลับของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือน

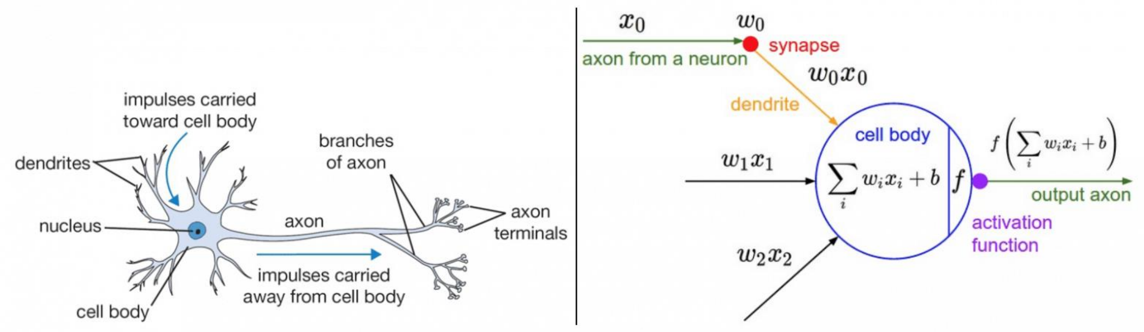
ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการเมต้าฮิวริสติกส์ทั้ง 3 วิธีได้แก่ การจำลองการอบเหนียว, การค้นหาแบบทาบู และ วิธีเชิงพันธุกรรม นั้นมีวิธีการรับมือกับจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ โดยไม่จำเป็นที่จะต้องมีข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินที่ใกล้เคียงกับข้อมูลชั้นดินจริง รวมถึงวิธีการเมต้าฮิวริสติกส์ไม่จำเป็นต้องทำการหาอนุพันธ์ (derivative free)

แต่เมื่อปัญหาของการคำนวณย้อนกลับนั้นมีความซับซ้อน และ มีจำนวนของจุดข้อมูลที่มาก ซึ่งอาจจะทำให้ต้องใช้ทรัพยากรณ์ในการคำนวณ และ ระยะเวลาในการคำนวณที่มากซึ่งไม่เหมาะที่จะคำนวณด้วยอุปกรณ์ขนาดเล็กที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณที่ต่ำ ซึ่งทำให้ขั้นตอนการคำนวณย้อนกลับนั้นทำได้ยากในภาคสนามเนื่องจากต้องใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณซึ่งต่อมาการเรียนรู้เชิงลึกได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการคำนวณย้อนกลับทางด้านธรณีวิทยา อย่างเช่น การหาความหนาของชั้นเปลือกโลก (Devilee, Curtis, & Roy-Chowdhury, 1999) การหาความหนาของชั้นโมโฮ (Meier, Curtis, & Trampert, 2007) และ การหาความเร็วคลื่นเฉือนของเปลือกโลกทิเบต (Hu et al., 2020) เป็นต้น

2.3 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Hopfield, 1988) (Jain, Mao, & Mohiuddin, 1996) (Krogh, 2008) เป็นระบบการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ที่ได้แรงบันดาลใจมาจากระบบประสาทในสิ่งมีชีวิต (Biological Neural Network) ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมประกอบไปด้วย เซลล์ประสาทเทียม (Artificial Neuron), ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function), น้ำหนักถ่วง (Weight), เซลล์ประสาทเอนเอียง (Bias) และ ขั้นตอนการฝึกฝน

เซลล์ประสาทเทียม (Alzahrani & Parker, 2020) เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เปรียบเสมือนเซลล์ประสาททางด้านชีววิทยา ทำหน้าที่รับสัญญาณขาเข้า (Inputs) จากเซลล์ประสาทเทียมอื่นๆ ในชั้นก่อนหน้าซึ่งรวมถึงเซลล์ประสาทเอนเอียง (Geman, Bienenstock, & Doursat, 1992) โดยเซลล์ประสาทเทียมสามารถรับสัญญาณขาเข้าได้หลายสัญญาณพร้อมกัน โดยทั่วไปแล้วสัญญาณขาเข้าจะมีน้ำหนักถ่วงที่เป็นตัวเลขเชื่อมอยู่ระหว่างเซลล์ในชั้นก่อนหน้า และ เซลล์ในชั้นปัจจุบันซึ่งน้ำหนักถ่วงในละตัวแปรจะมีความแตกต่างกัน โดยเซลล์ประสาทเทียมจะนำผลรวมของสัญญาณขาเข้าไปประมวลผลผ่านฟังก์ชันกระตุ้นซึ่งมักจะเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นตัวเลขไปยังเซลล์ประสาทเทียมในชั้นถัดไป โดยโครงสร้างพื้นฐานของเซลล์ประสาทเทียม และ สมการพื้นฐานของเซลล์ประสาทเทียม แสดงดังรูปที่ 2.16 และ สมการที่ (2.51)



A cartoon drawing of a biological neuron (left) and its mathematical model (right).

รูปที่ 2.16 โครงสร้างพื้นฐานของระบบประสาททางชีววิทยา และ ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (cs231n.github.io)

$$output = f\left(\sum_{i=1}^{n}(w_ix_i) + w_0x_0\right) \qquad (2.51)$$

โดยที่ผลลัพธ์ขาออกคือสัญญาณจากประสาทเทียม k ซึ่งรับสัญญาณขาเข้าจากเซลล์ประสาทเทียม x_1 ถึง x_n โดยมีน้ำหนัก w_1 ถึง w_n และมีเซลล์ประสาทเทียมเอนเอียง b ซึ่งมีค่าเท่ากับน้ำหนักเอนเอียง w_b โดยผลรวมของสัญญาณขาเข้าจากชั้นก่อนหน้าจะถูกคำนวณผ่านฟังก์ชันกระตุ้น f ก่อนที่จะส่งข้อมูลขาออกไปยังชั้นถัดไป

2.3.1 ฟังก์ชันกระตุ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ฟังก์ชันกระตุ้น (Sharma, Sharma, & Athaiya, 2020) เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพื่อกำหนดผลรวมของน้ำหนักสัญญาณขาเข้าจากชั้นก่อนหน้าและส่งสัญญาณไปยังชั้นถัดไปซึ่งเป็นชั้นซ้อน (Hidden layer) หรือ ชั้นขาออก (Output layer) เพื่อกำหนดประเภท และ ขอบเขตของการทำนาย ตัวอย่างเช่น ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ให้ผลคำตอบอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งเหมาะกับคำตอบในเชิงความน่าจะเป็น (probability) ซึ่งใช้ในการทำนายแบบจำแนกประเภท (classification) โดยตัวอย่างฟังก์ชันกระตุ้นที่นิยมใช้ในอดีต และ ปัจจุบันได้แก่

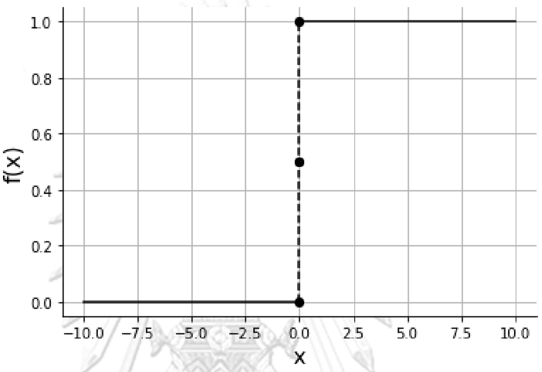
2.3.1.1 ฟังก์ชันไบนารี่สเต็ป (Binary step function)

ฟังก์ชันไบนารี่สเต็ปเป็นฟังก์ชันที่กำหนดช่วงของสัญญาณ (threshold) ที่สามารถผ่านไปได้ ซึ่งถ้าสัญญาณมีค่ามากกว่า 0 จะให้ค่าเป็น 1 นอกจากนั้นจะให้ค่าเป็น 0 โดยสมการของ

ฟังก์ชันไบนารี่สเต็ป, อนุพันธ์ของฟังก์ชันไบนารี่สเต็ป และ กราฟฟังก์ชันไบนารี่สเต็ปแสดงดังสมการที่ (2.52) สมการที่ (2.53) และรูปที่ 2.17

$$f(x) = \begin{cases} 0 \; for \; x < 0 \\ 1 \; for \; x \; \geq 0 \end{cases} \tag{2.52}$$

$$f'(x) = 0 \tag{2.53}$$



รูปที่ 2.17 กราฟฟังก์ชันกระตุ้นไบนารี่สเตป

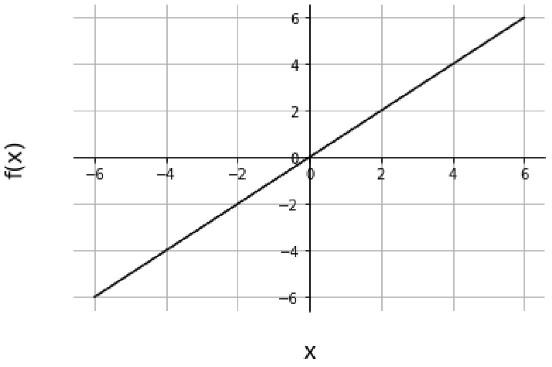
ซึ่งจะเห็นได้ว่าฟังก์ชันไบนารี่สเต็ปนั้นมีค่าคำตอบที่แยกกันตายตัวซึ่งไม่เหมาะกับโมเดลที่ต้องการคำตอบแบบการจำแนกประเภทหลายประเภท (multiple classification) รวมถึงฟังก์ชันเองเป็นฟังก์ชันเงื่อนไขซึ่งเมื่อทำการหาอนุพันธ์แล้วจะมีค่าเป็น 0 ในทุกกรณีจึงทำให้ไม่สามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงในแต่ละตัวแปรได้

2.3.1.2 ฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear function) หรือ ฟังก์ชันเอกลักษณ์ (Identity function)

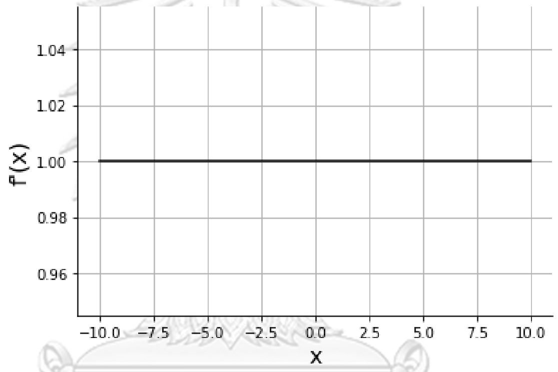
ฟังก์ชันเชิงเส้นนั้นเป็นฟังก์ชันกระตุ้นซึ่งมีค่าเทียบเท่ากับการไม่มีฟังก์ชันกระตุ้นโดยสมการของฟังก์ชันเชิงเส้น, สมการอนุพันธ์ของฟังก์ชันเชิงเส้น, กราฟฟังก์ชันเชิงเส้น และ กราฟอนุพันธ์ของฟังก์ชันเชิงเส้น แสดงดังสมการที่ (2.54), สมการที่ (2.55) รูปที่ 2.18 และ รูปที่ 2.19 ตามลำดับ

$$f(x) = x \tag{2.54}$$

$$f'(x) = 1 \tag{2.55}$$



รูปที่ 2.18 กราฟฟังก์ชันกระตุ้นเชิงเส้น



รูปที่ 2.19 กราฟอนุพันธ์ของฟังก์ชันกระตุ้นเชิงเส้น

ถึงแม้ฟังก์ชันเชิงเส้นจะมีค่าอนุพันธ์ที่ไม่เป็น 0 เหมือนฟังก์ชันก่อนหน้า แต่การปรับปรุงค่าน้ำหนักถ่วงในโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจะมีอัตราที่คงที่เนื่องจากเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1 ในทุกกรณีจึงทำให้สัญญาณที่ถูกส่งเข้ามาไม่มีความสัมพันธ์กับอนุพันธ์ของฟังก์ชัน

จากสถาการณ์ที่กล่าวมานี้จึงทำให้โครงข่ายประสาทเทียมนั้นไม่สามารถลดค่าความผิดพลาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

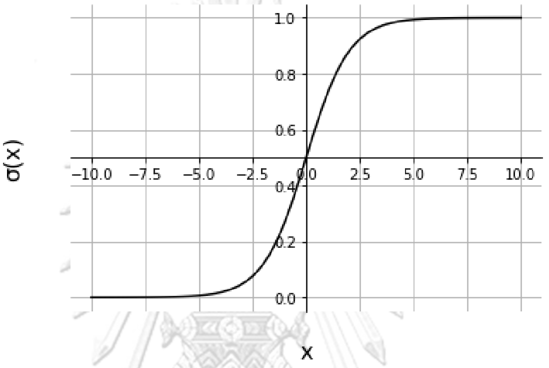
2.3.1.3 **ฟังก์ชันซิกมอยด์** (Sigmoid function)

ฟังก์ชันซิกมอยด์เป็นฟังก์ชันที่รับสัญญาณขาเข้าในรูปแบบตัวเลขจำนวนจริง และ ส่งสัญญาณขาออกซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่ยิ่งผลรวมของสัญญาณที่รับเข้ามามีค่ามากผลคำตอบของฟังก์ชันจะยิ่งมีค่าเข้าไกล้ 1 ในทางกลับกันยิ่งผลรวมของสัญญาณที่รับเข้ามามีค่าน้อยผลคำตอบของฟังก์ชันจะมีค่าเข้าไกล้ 0 โดยสมการของฟังก์ชันซิกมอยด์, สมการอนุพันธ์ของฟังก์ชันซิกมอยด์,

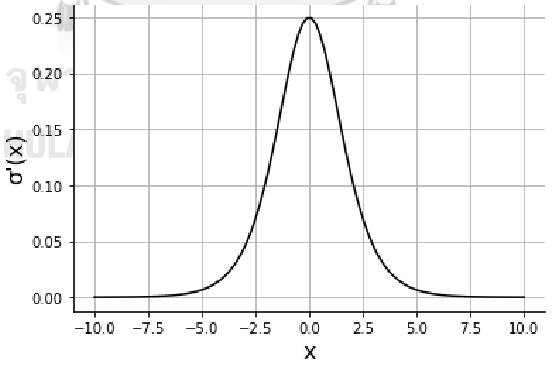
กราฟฟังก์ชันซิกมอยด์ และ กราฟอนุพันธ์ฟังก์ชันซิกมอยด์ แสดงดังสมการที่ (2.56), สมการที่ (2.57) รูปที่ 2.20 และ รูปที่ 2.21 ตามลำดับ

$$\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \tag{2.56}$$

$$\sigma'(x) = \sigma(x)\big(1-\sigma(x)\big) \tag{2.57}$$



รูปที่ 2.20 กราฟฟังก์ชันกระตุ้นซิกมอยด์



รูปที่ 2.21 กราฟอนุพันธ์ฟังก์ชันกระตุ้นซิกมอยด์

ฟังก์ชันซิกมอยด์เป็นหนึ่งในฟังก์ชันที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย เหมาะสำหรับโมเดลที่ต้องการคำตอบแบบความน่าจะเป็นเนื่องจากคำตอบของฟังก์ชันที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แต่เมื่อสัญญาณขาเข้ามีค่าน้อยกว่า -3 หรือ มากกว่า 3 ตามรูปที่ 2.20 กราฟฟังก์ชันกระตุ้นซิกมอยด์และ

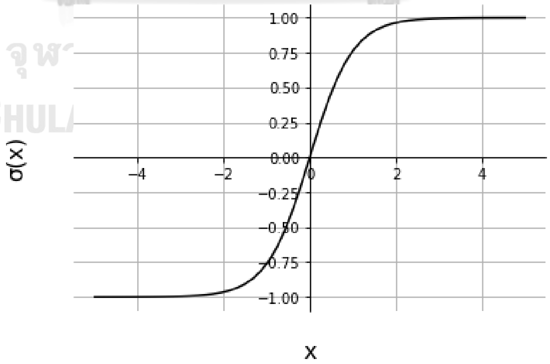
รูปที่ 2.21 กราฟอนุพันธ์ฟังก์ชันกระตุ้นซิกมอยด์ ที่จะทำให้ความชันมีค่าเข้าใกล้ 0 ซึ่งสถานการณ์นี้จะทำให้เกิดปัญหาการเรียนรู้ที่หายไป (vanishing gradient problem) (Hochreiter 1997) (Tan & Lim, 2019) รวมถึงฟังกันซิกมอยด์นั้นไม่สมมาตรรอบแกน 0 ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 2.20 จึงทำให้สัญญาณที่ถูกส่งออกมาในช่วงการแพร่กระจายไปข้างหน้า (forward propagation) มีค่าที่เยื้องไปในทิศทางเดียวกันจึงทำให้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมมีความเอนเอียงซึ่งปัญหาดังกล่าวนั้นสามารถแก้ไขได้ด้วยการปรับมาตราส่วน (scaling) (Sharma et al., 2020)

2.3.1.4 ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ (Hyperbolic tangent function, Tanh)

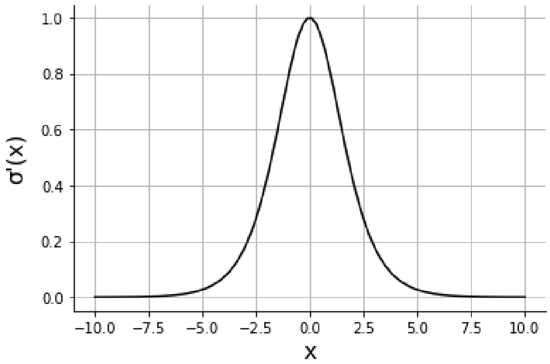
ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์เป็นฟังก์ชันที่คล้ายคลึงกับฟังก์ชันซิกมอยด์แต่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ 0 โดยมีช่วงคำตอบของฟังก์ชันอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยสมการฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์, สมการอนุพันธ์ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์, กราฟของฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ และ กราฟอนุพันธ์ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์แสดงดังสมการที่ (2.58) สมการที่ (2.59) รูปที่ 2.22 และ รูปที่ 2.23 ตามลำดับ

$$t(f) = \frac{\phi(f)}{360f} \tag{2.58}$$

$$t(f) = \frac{\phi(f)}{360f} \tag{2.59}$$



รูปที่ 2.22 กราฟฟังก์ชันกระตุ้นไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์



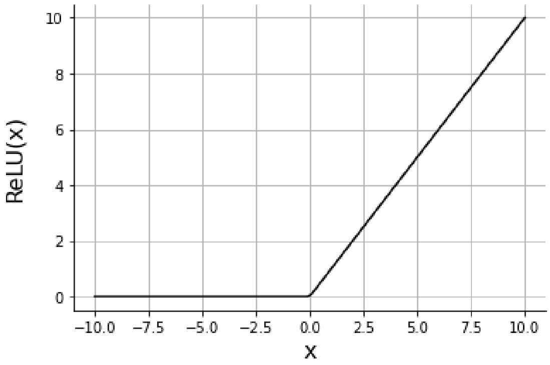
รูปที่ 2.23 กราฟอนุพันธ์ของฟังก์ชันกระตุ้นไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์

2.2.5.5 ฟังก์ชันเส้นตรงที่ถูกปรับแก้ (Rectified Linear Unit, ReLU)

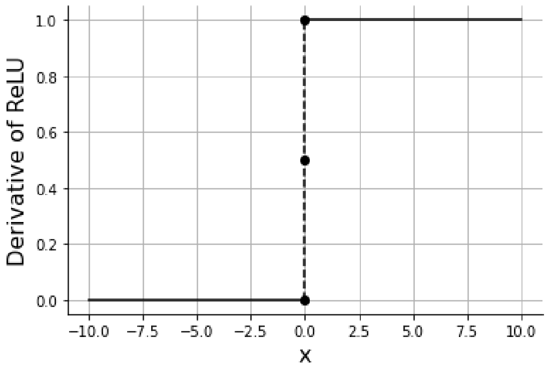
ฟังก์ชันเส้นตรงที่ถูกปรับแก้ (Agarap, 2018) เป็นฟังก์ชันที่นิยมใช้ในการสร้างโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกมากที่สุด (Sharma et al., 2020) โดยสมการของฟังก์ชันเส้นตรงที่ถูกปรับแก้, สมการอนุพันธ์ของฟังก์ชันเส้นตรงที่ถูกปรับแก้, กราฟของฟังก์ชันเส้นตรงที่ถูกปรับแก้ และ กราฟของอนุพันธ์ของฟังก์ชันเส้นตรงที่ถูกปรับแก้ แสดงดังสมการที่ (2.60), สมการที่ (2.61), รูปที่ 2.24 และ รูปที่ 2.25 ตามลำดับ

$$ReLU(x) = max\{0, x\} \tag{2.60}$$

$$F'(x) = \begin{Bmatrix} 0\ if\ x < 0 \\ 1\ if\ x > 0 \\ undefined\ if\ x = 0 \end{Bmatrix} \tag{2.61}$$



รูปที่ 2.24 กราฟฟังก์ชันกระตุ้นเส้นตรงที่ถูกปรับแก้



รูปที่ 2.25 กราฟอนุพันธ์ของฟังก์ชันกระตุ้นเส้นตรงที่ถูกปรับแก้

ฟังก์ชันเส้นตรงที่ถูกปรับแก้เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นซึ่งมีข้อดีคือถึงแม้ว่าสัญญาณขาเข้าจะมีค่ามากเพียงใดก็ตามการเรียนรู้จะไม่ช้าลง เหมือนอย่างฟังก์ชันซิกมอยด์ และ ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันตัว “S” โดยข้อเสียของฟังก์ชันเส้นตรงที่ถูกปรับแก้คือเมื่อสัญญาณขาเข้ามีค่าติดลบจะทำให้ผลลัพธ์ของฟังก์ชันเป็น 0 เสมอซึ่งจะทำให้เซลล์ประสาทเทียมบางเซลล์จะไม่ถูกอัพเดทโดยจะเรียกเซลล์ประสาทเทียมประเภทนี้ว่าเซลล์ประสาทเทียมที่ตายแล้ว (dead neuron)

2.3.2 การสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

การสร้างโครงข่ายประสาทเทียมเริ่มต้นด้วยการสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network architecture) ซึ่งประกอบไปด้วย 1) ชั้นขาเข้าซึ่งจะมีจำนวนตำแหน่ง และ รูปแบบมิติของเซลล์ประสาทเทียมสอดคล้องกับจำนวนตำแหน่ง และ รูปแบบมิติของข้อมูลที่ต้องการให้ทำนาย อย่างเช่น ในงานวิจัยนี้ต้องการทำนายข้อมูลของสันโค้งกระจายตัวในช่วงความถี่ที่ 3 ถึง 5.5 เฮิรตซ์ โดยมีความห่างของช่วงข้อมูลทุกๆ 0.1 เฮิรตซ์ จะต้องใช้เซลล์ประสาทเทียมทั้งสิ้น 26 เซลล์ในรูปแบบอาเรย์ขนาด 1 x 26 เป็นต้น 2) ชั้นซ่อน ซึ่งถ้าหากโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีชั้นซ่อนหลายชั้นจะถูกจำแนกประเภทเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบลึก (Depp Neural Network, DNN) หรือที่รู้จักกันในชื่อการเรียนรู้เชิงลึก โดยชั้นซ่อนสามารถกำหนดฟังก์ชันกระตุ้นในแต่ละชั้นซ่อน รวมถึงจำนวนเซลล์ประสาทเทียมในแต่ละชั้นซ่อนเพื่อกำหนดความซับซ้อนของโครงข่ายประสาทเทียมให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการทำนาย และ 3) ชั้นข้อมูลขาออก ซึ่งเป็นชั้นข้อมูลชั้นสุดท้ายของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นชั้นที่มีจำนวนเซลล์ประสาทเทียม และ มิติสอดคล้องกับจำนวน และ มิติของข้อมูลที่ต้องการทำนาย โดยสามารถกำหนดฟังก์ชันกระตุ้นเพื่อทำให้คำตอบของโครงข่ายประสาทเทียมสอดคล้องกับรูปแบบคำตอบที่ผู้พัฒนาต้องการได้ซึ่งหลังจากการสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมขั้นตอนต่อไปคือการเตรียมชุดข้อมูล (Dataset) สำหรับการฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

2.3.3 ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกฝน

หลังจากสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมขั้นตอนต่อไปคือการฝึกฝน (Train) ซึ่งโครงข่ายประสาทนั้นจำเป็นต้องมีชุดข้อมูลซึ่งประกอบไปด้วย 1) ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกฝน (Train dataset) เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม 2) ชุดข้อมูลสำหรับประเมิณผลระหว่างการฝึกฝน (Validation dataset) เพื่อประเมิณความแม่นยำ (accuracy) และ ความคลาดเคลื่อน (loss) ของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมด้วยชุดข้อมูลที่ไม่เคยถูกเรียนรู้มาก่อนรวมถึงเป็นชุดข้อมูลสำหรับการปรับปรุง และ เลือกชุดของไฮเปอร์พารามิเตอร์ (Hyperparameter) ให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของผู้พัฒนามากที่สุด และ 3) ชุดข้อมูลสำหรับทดสอบความแม่นยำ และ ความคลาดเคลื่อนของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมหลังจากการฝึกฝน โดยชุดข้อมูลสำหรับการฝึกฝนโครงข่ายประสาทเทียมแบบการเรียนรู้โดยมีผู้สอน (supervised learning) ซึ่งถูกใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยส่วนของเนื้อหาการเรียนรู้ (Data train) และ ส่วนของเฉลย (Label) เพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบกับผลการทำนาย

2.3.4 การฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

การเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมเริ่มต้นด้วยวิธีการแพร่กระจายไปข้างหน้า โดยการกระจายชุดเนื้อหาการเรียนรู้จากชั้นขาเข้าผ่านไปยังชั้นซ่อน และ ได้ผลลัพธ์จากชั้นข้อมูลขาออกโดยเริ่มต้นนั้นตัวแปรซึ่งประกอบด้วย น้ำหนักถ่วง และ น้ำหนักถ่วงเอนเอียงจะถูกสุ่มค่าเริ่มต้นจึงทำให้ผลการทำนายเกิดความคลาดเคลื่อนสูงจึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุง (tuning) ตัวแปรด้วยวิธีการแพร่กระจายย้อนกลับ (Backward propagation) (Dreyfus, 1990) (Wythoff, 1993) (Goh, 1995) ซึ่งใช้กฎลูกโซ่ (Chain rule) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนของการทำนายกับ ตัวแปรแต่ละตัวในโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อที่จะทำการปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปรไปในทิศทางที่ทำให้ผลการทำนายสอดคล้องกับผลเฉลยมากยิ่งขึ้น ซึ่งความคลาดเคลื่อนสามารถประเมิณผลด้วยชุดข้อมูลตรวจสอบซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่ไม่ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงตัวแปร เพื่อที่จะไม่ทำให้เกิดความเอนเอียงโดยอัลกอริทึมเริ่มต้นสำหรับการปรับปรุงตัวแปรที่นิยมใช้ได้แก่ อัลกอริทึมการเคลื่อนลงตามความชัน (Montavon et al., 2012) (Ruder, 2016) (Ketkar & Ketkar, 2017) ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

2.3.5 อัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม

โดยโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจำเป็นต้องมีการปรับปรุงตัวแปรเพื่อที่จะทำให้ความคลาดเคลื่อนของการทำนายมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยที่ต้องการ ซึ่งวิธีการปรับปรุงตัวแปรจะขึ้นอยู่อัลกอริทึมการหาค่าเหมาะสมที่สุดซึ่งโดยพื้นฐานแล้วโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมักจะนิยมใช้วิธีการเคลื่อนลงตามความ (Gradient Descent, GD) ซึ่งจะแบ่งย่อยออกเป็น 3 แบบ

ได้แก่ 1) การเคลื่อนลงตามความชันมาตรฐาน (Batch Gradient Descent, BGD) 2) การเคลื่อนลงตามความชันสุ่ม (Stochastic Gradient Descent, SGD) และ 3) การเคลื่อนลงตามความชันทีละชุดย่อย (Mini-batch Gradient Descent)

2.3.5.1 การเคลื่อนลงตามความชันมาตรฐาน

การเคลื่อนลงตามความชันมาตรฐานเป็นอัลกอริทึมเริ่มต้นโดยการฝึกฝนข้อมูลทั้งหมดในชุดข้อมูลในช่วงการแพร่กระจายไปข้างหน้าก่อนที่จะทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ในช่วงการแพร่กระจายย้อนกลับเพียงครั้งเดียว (Ruder, 2016) ซึ่งทำให้เหมาะกับการฝึกฝนข้อมูลที่มีลักษณะพื้นผิวความผิดพลาดแบบนูน (Convex) แต่เนื่องจากต้องเรียนรู้ทุกๆ ข้อมูลก่อนการปรับพารามิเตอร์ 1 ครั้งทำให้การเคลื่อนลงตามความชันมาตรฐานนั้นใช้ทรัพยากร และ ระยะเวลาในการเรียนรู้ที่มากเพื่อการปรับปรุงตัวแปรเพียงครั้งเดียว

2.3.5.2 การเคลื่อนลงตามความชันสุ่ม

การเคลื่อนลงตามความชันสุ่มเป็นอัลกอริทึมตรงข้ามกับการเคลื่อนลงตามความชันมาตรฐานจากหัวข้อที่ผ่านมา เนื่องจากการเคลื่อนลงตามความชันสุ่มจะใช้ข้อมูลฝึกฝนเพียงข้อมูลเดียวในช่วงการแพร่กระจายไปข้างหน้าเพื่อทำการปรับปรุงตัวแปรในช่วงการแพร่กระจายย้อนกลับ ซึ่งทำให้การปรับปรุงตัวแปรเกิดขึ้นถี่ ซึ่งทำให้ใช้ระยะเวลาในการฝึกฝนน้อยกว่าการเคลื่อนลงตามความชันมาตรฐาน และ มีโอกาสที่การปรับปรุงตัวแปรแต่ละครั้งจะทำให้ผลการทำนายไปอยู่ในช่วงจุดต่ำสุดสัมพัทธ์ที่ดีกว่าการเคลื่อนลงตามความชันมาตรฐาน แต่การเคลื่อนลงตามความชันสุ่มนั้นจะไม่สเถียรเมื่อปรับปรุงตัวแปรให้อยู่ในช่วงจุดต่ำสุดสัมบูรณ์ (Ruder, 2016) เนื่องจากการปรับปรุงตัวแปรแต่ละครั้งมักจะเกิดการแปรปรวน (fluctuation) และ ปรับค่าเกินกว่าที่ต้องการ (overshooting) ซึ่งสามารถแก้ไขด้วยการปรับอัตราการเรียนรู้ (learning rate) ซึ่งเมื่อลดอัตราการเรียนรู้ลงพฤติกรรมการเรียนรู้ของการเคลื่อนลงตามความชันสุ่มจะมีความคล้ายคลึงกับการเคลื่อนลงตามความชันมาตรฐาน

2.3.5.3 การเคลื่อนลงตามความชันทีละชุดย่อย

การเคลื่อนลงตามความชันทีละชุดย่อยเป็นอัลกอริทึมซึ่งรวมข้อดีของอัลกอริทึมก่อนหน้าทั้ง 2 ชนิดมาใช้โดยการจัดชุดข้อมูลขนาดย่อย (mini-batch) ที่ถูกแบ่งออกมาจากชุดข้อมูลหลักซึ่งจะทำให้ลดการแปรปรวนของการปรับปรุงตัวแปรที่เป็นปัญหาในการเคลื่อนลงตามความชันสุ่มซึ่งจะทำให้อัตราการลดลงของความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทำนาย และ ผลเฉลยนั้นมีความสเถียรมากยิ่งขึ้นในขณะที่ยังคงในการปรังปรุงตัวแปรให้มีความต่อเนื่องมากกว่าการเคลื่อนลงตามความชันมาตรฐานทำให้ระยะเวลาที่ใช้ในการฝึกฝนน้อยลง การเคลื่อนลงตามความชันทีละชุดย่อยนั้นมีความประสิทธิภาพมากกว่าสองวิธีก่อนหน้าโดยทั่วไปแล้วขนาดของชุดข้อมูลย่อย ที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง

50 ถึง 256 ข้อมูล (Ruder, 2016) ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะเป็นอัลกอริทึมส่วนเสริม (Extension) ที่จะทำให้การเคลื่อนลงตามความชันนั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.3.6 อัลกอริทึมการเคลื่อนลงตามความชันส่วนเพิ่มเติม

อัลกอริทึมการเคลื่อนลงตามความชันส่วนเพิ่มเติมเป็นอัลกอริทึมวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงตัวแปรที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการเคลื่อนลงตามความชันพื้นฐานในหัวข้อก่อนหน้าทั้ง 3 วิธีซึ่งได้แก่

2.3.6.1 โมเมนตัม (Momentum)

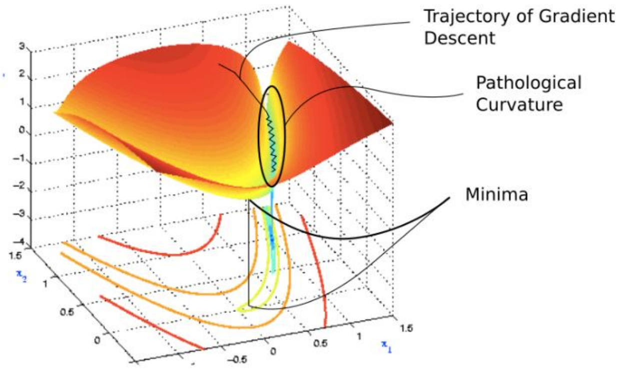
โมเมนตัม (Rumelhart & Hintont, 2019) ถูกพัฒนามาเพื่อแก้ไขปัญหาพื้นผิวของฟังก์ชันความผิดพลาดลักษณะหุบเหว (ravine) ยกตัวอย่างเช่น พื้นผิวของฟังก์ชันความผิดพลาดที่มีลักษณะชันมากเป็นพิเศษในมิติใดมิติหนึ่ง (Ruder, 2016) ดังรูปที่ รูปที่ 2.26 ซึ่งมักจะอยู่รอบๆช่วงต่ำสุดสัมพัทธ์ โดยโมเมนตัมนั้นเพิ่มตัวแปรสัมประสิทธิ์โมเมนตัม γ และ ความชันสะสม v_t ซึ่งคำนวณจากการปรับปรุงตัวแปรระหว่างฝึกฝนในครั้งก่อนหน้าตามสมการที่ (2.62) และ ทำการปรับปรุงตัวแปรใหม่ตามสมการที่ (2.63)

$$v_t = \gamma v_{t-1} + \eta \cdot \nabla_\theta J(\theta) \tag{2.62}$$

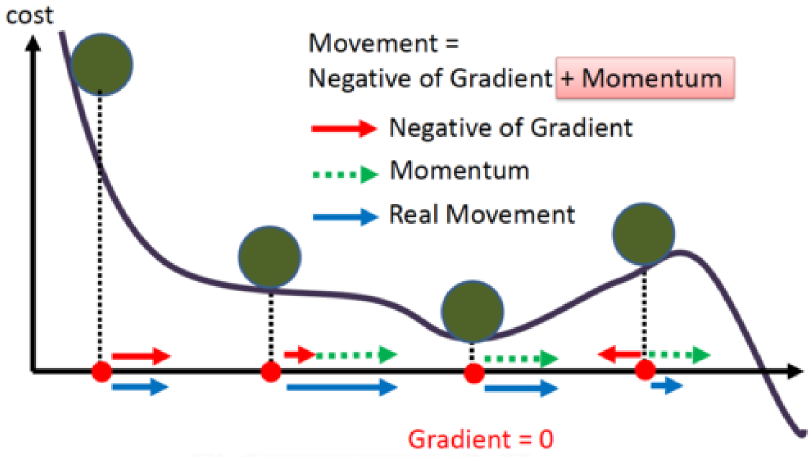
$$\theta = \theta - v_t \tag{2.63}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ซึ่งจะเห็นว่าการปรับปรุงตัวแปรของโมเมนตัมในแต่ละครั้งจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของการเคลื่อนลงตามความชันแบบปกติเมื่อความชัน $\nabla_\theta J(\theta)$ มีทิศทางเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงในครั้งก่อนหน้า v_{t-1} แต่จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงเมื่อความชันมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงในครั้งก่อนหน้า v_{t-1} ซึ่งพฤติกรรมของโมเมนตัมที่มีต่อพื้นผิวของฟังก์ชันความผิดพลาดแสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.26 พื้นผิวผิดพลาดลักษณะหุบเหว
[blog.paperspace.com]



รูปที่ 2.27 พฤติกรรมของโมเมนตัมต่อพื้นผิวผิดพลาดลักษณะหุบเหว
[miro.medium.com]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.6.2 โมเมนตัมของเนสเตรอฟ (Nesterov momentum, NAG)

โมเมนตัมของเนสเตรอฟพัฒนามาจากอัลกอริทึมโมเมนตัมซึ่งพฤติกรรมของโมเมนตัมเนสเตรอฟเปรียบเสมือนการหยั่งรู้อนาคตข้างหน้าโดยถ้าสมมุติว่าการปรับปรุงตัวแปรในครั้งถัดไปจะเจอกับความชันที่มีทิศทางตรงกันข้าม หรือ ความชันนั้นเป็นขาขึ้นโมเมนตัมเนสเตรอฟจะทำการลดอัตราการปรับปรุงตัวแปรซึ่งจะช่วยให้การฝึกฝนนั้นไม่ต้องเสียระยะเวลาในการเดินกลับมาที่จุดต่ำสุด (Ruder, 2016) โดยสมการของโมเมนตัมของเนสเตรอฟแสดงดังสมการที่ (2.64)

$$v_t = \gamma v_{t-1} + \cdot\, \nabla_\theta J(\theta - v_{t-1}) \tag{2.64}$$

2.3.6.3 การปรับตัวตามความชัน (Adaptive gradient, Adagrad)

การปรับตัวตามความชัน (Duchi, Bartlett, & Wainwright, 2012) เป็นอัลกอริทึมวิธีการหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้การปรับอัตราการเรียนรู้ η ซึ่งแตกต่างจากอัลกอริทึมก่อนหน้าอย่าง โมเมนตัม และ โมเมนตัมของเนสเตรอฟ ที่จะมีอัตราการเรียนรู้ที่คงที่ในแต่ละรอบของการฝึกฝน โดยการปรับตัวตามความชันจะสร้างเมทริกทแยงมุม G_t ตามสมการที่ (2.66) ซึ่งจัดเก็บผลรวมกำลังสองของความชันในรอบการฝึกฝนก่อนหน้าตามสมการที่ (2.65) ซึ่งจะทำให้ตัวแปรที่มีการปรับปรุงบ่อยจะมีอัตราการเรียนรู้ที่น้อย ในทางกลับกันตัวแปรที่มีอัตราการปรับปรุงต่ำจะมีอัตราการเรียนรู้ที่มากซึ่งทำให้วิธีการปรับตัวตามความชันเหมาะสำหรับชุดข้อมูลที่มีการกระจัดกระจายตัวสูง (sparse data) โดยสมการที่ (2.67) แสดงสมการของการปรับตัวตามความชัน

$$g_{t,i} = \nabla_{\theta_t} J(\theta_{t,i}) \tag{2.65}$$

$$G_t = \sum_{t=1}^{t} g_t g_t^T \tag{2.66}$$

$$\theta_{t+1,i} = \theta_{t,i} - \frac{\eta}{\sqrt{G_{t,ii} + \epsilon}} g_{t,i} \tag{2.67}$$

โดยที่ $g_{t,i}$ คือความชันของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของตัวแปร θ_i ในรอบการฝึกฝน t เพื่อป้องกันข้อผิดพลาดจากการที่เมทริกซ์ G_t ที่อาจจะมีค่าเป็น 0 จึงเพิ่มสัมประสิทธิ์ปรับเรียบ (smoothing term) ϵ เข้ามาโดยมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 1e-8 โดยสมการที่ (2.66) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบการคำนวณเวกเตอร์ และ รูปแบบเมทริกซ์ตามสมการที่ (2.68) และ (2.69) ตามลำดับ

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta}{\sqrt{G_t + \epsilon}} \odot g_t \tag{2.68}$$

$$\theta_{t+1} = \begin{bmatrix} \theta_{t+1,0} \\ \theta_{t+1,1} \\ \vdots \\ \theta_{t+1,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{t,0} \\ \theta_{t,1} \\ \vdots \\ \theta_{t,N} \end{bmatrix} - \eta \left(\begin{bmatrix} \epsilon & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \epsilon & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \epsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{t,11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & G_{t,22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & G_{t,NN} \end{bmatrix} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \begin{bmatrix} g_{t,1} \\ g_{t,2} \\ \vdots \\ g_{t,N} \end{bmatrix} \tag{2.69}$$

แต่เมื่อการฝึกฝนกินระยะเวลาที่นานขึ้นตัวแปรที่ถูกปรับปรุงบ่อยก็จะเริ่มมีอัตราการเรียนรู้ที่น้อยลงจนไม่สามารถที่จะเรียนรู้เพิ่มขึ้นได้เนื่องจากความชันสะสมในเมทริกซ์ G_t นั้นมีค่ามากซึ่งอัลกอริทึมในหัวข้อถัดไปนั้นจะมาแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในวิธีการปรับตัวตามความชัน

2.3.6.4 Adadelta

Adadelta (Zeiler, 2012) เป็นอัลกอริทึมส่วนเพิ่มเติมของการปรับตัวตามความชันซึ่งพัฒนามาเพื่อแก้ไขปัญหาการเก็บความชันสะสมที่ไม่สิ้นสุดโดย Adadelta จะทำการเปลี่ยนวิธีการเก็บความชันสะสมในรอบก่อนหน้าด้วยค่าเฉลี่ยการเสื่อมกำลังสอง $E[g^2]_t$ ดังสมการที่ (2.70) ซึ่ง Adadelta ใช้ในการปรับพารามิเตอร์ตามสมการที่ (2.71) และ แปลงให้อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองดังสมการที่ (2.72)

$$E[g^2]_t = \gamma E[g^2]_{t-1} + (1-\gamma)g_t^2 \tag{2.70}$$

$$\Delta\theta_t = -\frac{\eta}{\sqrt{E[g^2]_t + \epsilon}} g_t \tag{2.71}$$

$$\Delta\theta_t = -\frac{\eta}{RMS[g]_t} g_t \tag{2.72}$$

โดยผู้พัฒนาได้เสนอให้การปรับพารามิเตอร์ $\Delta\theta_t$ นั้นควรจะมีหน่วยที่สอดคล้องกันซึ่งต่างจากวิธีก่อนหน้าอย่างการเคลื่อนลงตามความชัน, โมเมนตัม และ การปรับตัวตามความชัน ซึ่งใช้ความชัน g_t ในการปรับปรุงพารามิเตอร์ θ_t เพื่อแก้ปัญหาเรื่องของหน่วยที่ไม่สอดคล้องกัน Adadelta จึงสร้างสมการค่าเฉลี่ยการเสื่อมกำลังสองตามสมการที่ (2.73) ซึ่งใช้การปรับปรุงตัวแปรครั้งก่อนหน้า $\Delta\theta_{t-1}$ และ แปลงให้อยู่ในรูปของความผิดพลาดกำลังสองตามสมการที่ (2.74) ซึ่งจะได้สมการการปรับปรุงตัวแปรใหม่ดังสมการที่ (2.75)

$$E[\Delta\theta^2]_t = \gamma E[\Delta\theta^2]_{t-1} + (1-\gamma)\Delta\theta_t^2 \tag{2.73}$$

$$RMS[\Delta\theta^2]_t = \sqrt{E[\Delta\theta^2]_t + \epsilon} \tag{2.74}$$

$$\Delta\theta_t = -\frac{RMS[\Delta\theta]_{t-1}}{RMS[g]_t} \tag{2.75}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราปรับพารามิเตอร์ $\Delta\theta_t$ นั้นมีหน่วยเดียวกับตัวแปร รวมถึง Adadelta ยังยกเลิกการใช้อัตราการเรียนรู้ η ซึ่งทำให้ไม่จำเป็นต้องตั้งค่าอัตราการเรียนรู้เริ่มต้น

2.3.6.5 อดัม (Adaptive Moment Estimation, ADAM)

อดัม (Kingma & Ba, 2015) เป็นวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดซึ่งใช้การปรับอัตราการเรียนรู้ซึ่งนอกจากจะใช้ค่าเฉลี่ยการเสื่อมกำลังสองที่ใช้ใน Adadelta แล้วอดัมยังใช้ค่าเฉลี่ยการเสื่อมของความชันเหมือนกับโมเมนตัมโดยค่าเฉลี่ยการเสื่อมกำลังสอง m_t และ ค่าเฉลี่ยการเสื่อมของความชัน v_t แสดงดังสมการที่ (2.76) และ (2.77) ตามลำดับ

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) g_t \tag{2.76}$$

$$v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) g_t^2 \tag{2.77}$$

โดยที่ค่าเฉลี่ยการเสื่อมของความชัน m_t และค่าเฉลี่ยความเสื่อมของความชันกำลังสอง v_t จะมีค่าเริ่มต้นเป็นเวกเตอร์ 0 โดยผู้พัฒนานั้นได้สังเกตุพฤติกรรมของการฝึกฝนโดยมักจะเกิดปัญหาที่มีการเอนเอียงเข้าใกล้ 0 โดยเฉพาะช่วงเริ่มต้นของการฝึกฝน และ อัตราการเสื่อมสลายต่ำซึ่งแก้ไขโดยใช้การปรับการเอนเอียง (bias-corrected) ซึ่งค่าเฉลี่ยการเสื่อมกำลังสองที่ถูกปรับการเอนเอียง $\hat{m}_t$ ค่าเฉลี่ยการเสื่อมของความชันที่ถูกปรับการเอนเอียง $\hat{v}_t$ และ วิธีการปรับปรุงตัวแปรใหม่ แสดงดังสมการที่ (2.78), (2.79) และ (2.80) ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\hat{m}_t = \frac{m_t}{1 - \beta_1^t} \tag{2.78}$$

$$\hat{v}_t = \frac{v_t}{1 - \beta_2^t} \tag{2.79}$$

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \frac{\eta}{\sqrt{\hat{v}_t} + \varepsilon} \hat{m}_t \tag{2.80}$$

โดยผู้พัฒนาได้เสนอค่าเริ่มต้น β_1 เท่ากับ 0.9, β_2 เท่ากับ 0.99 และ ε เท่ากับ 10^{-8}

2.3.7 ฟังก์ชันความคลาดเคลื่อน (Loss function)

ฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนในระบบโครงข่ายประสาทเทียมนั้นทำหน้าที่ในการประเมิณความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทำนาย และ คำตอบ ซึ่งจะช่วยทำให้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมสามารถปรับปรุงตัวแปรได้อย่างเหมาะสมในช่วงแพร่กระจายย้อนกลับโดยฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนของโครงข่ายประสาทเทียมแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักได้แก่ ฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนสำหรับการจำแนกประเภท (classification) อย่างวิธีการครอส-เอนโทรปี (Cross-Entropy Method, CE) และฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนสำหรับทำนายการถดถอย (regression) อย่าง ฟังชันความผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error Loss function, MSE), ฟังก์ชันความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยลอกการิทึม (Mean Square Logarithm Error Loss function, MSLE) และ ฟังชันความผิดพลาดเฉลี่ยสมบูรณ์ (Mean Absolute Error Loss function)

2.3.7.1 วิธีการครอส-เอนโทรปี

ครอส-เอนโทรปี (Rubinstein, 1999) (Booth, 2008) ถูกพัฒนามาจากทฤษฎีเอนโทรปี (Shannon, 1951) ทางด้านทฤษฎีสารสนเทศ (Information theory) ซึ่งอธิบายระดับของข้อมูลในแต่ละตัวแปรอย่าง ความไม่แน่นอน (uncertainty) ของการทำนายผลตัวแปรในครั้งถัดไปซึ่งอยู่ในผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ของตัวแปรโดยฟังก์ชันเอนโทรปี $H(\chi)$ แสดงในสมการที่ (2.81)

$$H(\chi) = -\sum_{i=1}^{n} P(x_i) \log P(x_i) \tag{2.81}$$

โดยที่ $H(\chi)$ คือ เอนโทรปีของเซต χ ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปร x ซึ่งมีจำนวน n ตัวโดยที่ $P(x_i)$ คือความน่าจะเป็นของการเลือกตัวแปร x ตัวที่ i ซึ่งฐานของลอการิทึมจะขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้ โดยที่ลอการิทึมฐาน 2 จะมีหน่วยเรียกว่า บิต (Bit) หรือ แชนนอน (Shannon’s), ลอการิทึมฐานธรรมชาติ หรือ e จะมีหน่วยเรียกว่าแน็ต (Nat) และ ลอการิทึมฐาน 10 จะมีหน่วยเรียกว่า แบน (Bans) โดยวิธีการครอส-เอนโทรปีสำหรับโครงข่ายประสาทเทียมจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลักขึ้นอยู่กับรูปแบบของการทำนายซึ่งประกอบไปด้วย 1) ครอส-เอนโทรปีสำหรับการจำแนกประเภทไบนารี่ (Binary cross entropy) 2) ครอส-เอนโทรปีสำหรับการจำแนกประเภทหลายคลาส (Multi-class cross entropy) และ 3) ครอส-เอนโทรปีสำหรับการจำแนกประเภทหลายเลเบล (Multi-label cross entropy)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ครอส-เอนโทรปีสำหรับการจำแนกประเภทไบนารี่ (Dr.A, 2020) (Mannor, Peleg and Rubinstein 2005) เป็นการหาเอนโทรปีของชุดข้อมูลที่มีคำตอบให้เลือกเพียง 2 ตัวเลือก (binary classification) มักจะใช้ 0 และ 1 แทนผลเฉลยตัวอย่างเช่น การทำนายรูปว่ามีแพนดาในรูปหรือไม่ โดยผลเฉลยกมักจะแทนด้วย 0 เมื่อไม่มีแพนดาอยู่ในรูป และ 1 เมื่อมีแพนดาอยู่ในรูป โดยสมการที่ (2.82) แสดงสมการครอส-เอนโทรปีสำหรับการจำแนกแบบไบนารี่

$$Binary\ cross\ entropy\ loss = -(p(x) \bullet \log(q(x)) + (1 - p(x) \bullet \log(1 - q(x))) \quad (2.82)$$

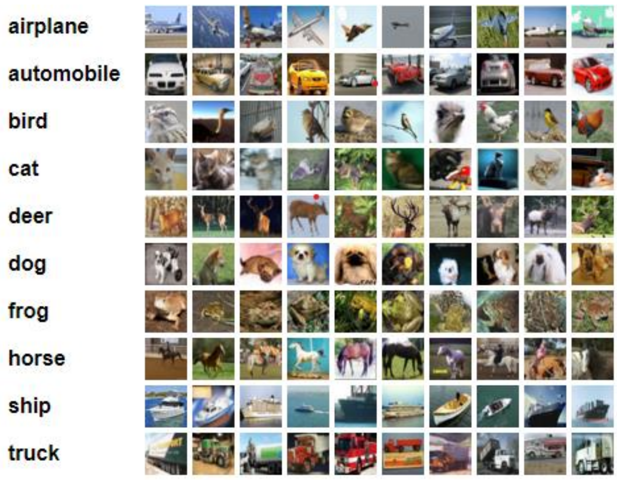
โดยที่ $p(x)$ คือผลเฉลยของคำตอบซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 และ $q(x)$ คือความน่าจะเป็นของการทำนายด้วยโครงข่ายประสาทเทียมผ่านฟังก์ชันกระตุ้นซอฟต์แม็กซ์ (SoftMax activation function) ในชั้นขาออกของโครงข่ายประสาทเทียม

ครอส-เอนโทรปีสำหรับการจำแนกประเภทหลายคลาส (Multi-class classification) (Hsu, Lv, Schlosser, Odom, & Kira, 2019) จะมีรูปแบบการจัดเรียงของคำตอบ 2 รูปแบบได้แก่ 1) ครอส-เอนโทรแบบจัดกลุ่ม (Categorical cross entropy) ซึ่งจะมีรูปแบบของคลาสที่ถูกเข้ารหัสแบบ One-hot ยกตัวอย่างเช่น โครงข่ายประสาทเทียมมีคำตอบซึ่งประกอบไปด้วยคลาส 3 คลาส ซึ่งสามารถเขียนแทนคลาสที่ 1, 2 และ 3 โดยใช้อาเรย์ [1,0,0], [0,1,0] และ [0,0,1] ตามลำดับ และ 2) ครอส-เอนโทรแบบจัดกลุ่มเบาบาง (Sparse categorical cross entropy) ซึ่งจะเขียนแทนคลาสด้วยอินทิเจอร์ (Integer) ยกตัวอย่างเช่นโครงข่ายประสาทเทียมมีคำตอบซึ่งประกอบไปด้วยคลาส 3 คลาสซึ่งสามารถเขียนแทนคลาสที่ 1, 2 และ 3 โดยอินทิเจอร์ [1], [2] และ [3] ตามลำดับซึ่งรูปแบบของการจัดเรียงคำตอบแต่ละชนิดนั้นจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน โดยตัวอย่างการจำแนกแบบหลายคลาสได้แก่ การทำนายชนิดของสิ่งมีชีวิตซึ่งประกอบด้วย แพนดา, หมา และ แมว โดยสมการที่ (2.83) แสดงสมการครอส-เอนโทรปีสำหรับการจำแนกแบบหลายคลาส

$$Multi - class\ cross\ entropy = -p(x_i)\log(q(x_i)) \quad (2.83)$$

โดยที่ $p(x_i)$ คือ ผลเฉลยจริงของคำตอบที่คลาส i ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 และ $q(x_i)$ คือผลการทำนายด้วยโครงข่ายประสาทเทียมผ่านฟังก์ชันกระตุ้นซอฟต์แม็กซ์ที่คลาส i โดย รูปที่ 2.28 แสดงตัวอย่างชุดข้อมูลพร้อมเฉลย Cifar-10 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลสำหรับการจำแนกประเภทหลายคลาส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



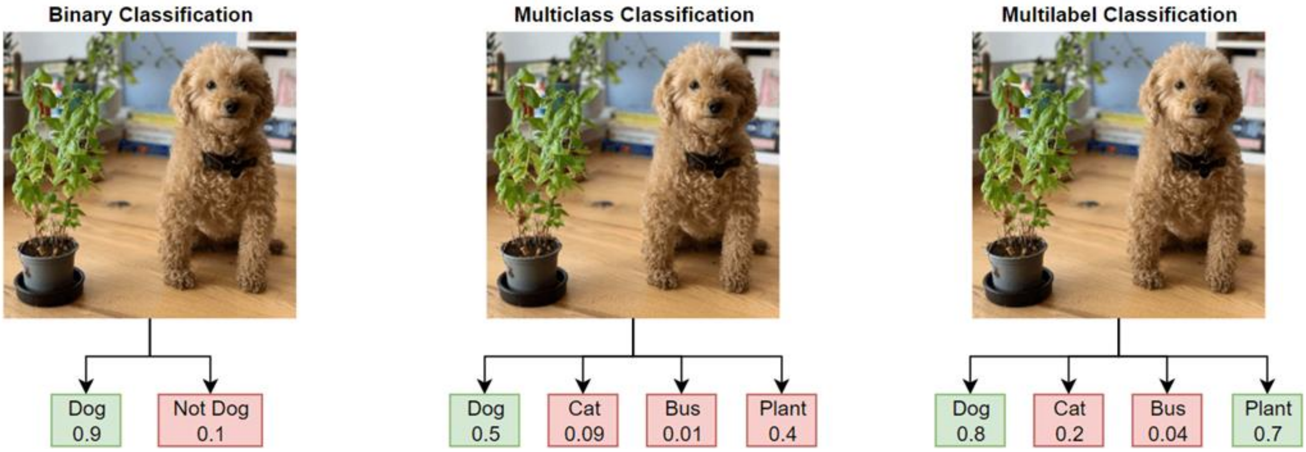
รูปที่ 2.28 ตัวอย่างรูปภาพ และ เฉลยจากชุดข้อมูล Cifar-10
[nvsyashwanth.github.io]

ครอสเอนโทรปีสำหรับการจำแนกประเภทหลายเลเบล (Tsoumakas & Katakis, 2007a) (Tsoumakas & Katakis, 2007b) ซึ่งจะมีคำตอบมากกว่า 1 คำตอบโดยที่คำตอบมักจะจัดอยู่ในรูปแบบของอาเรย์ที่มีขนาดเท่ากับจำนวนคลาสในแต่ละคลาสซึ่งประกอบไปด้วยตัวเลข 0 หรือ 1 โดยตัวอย่างของการจำแนกประเภทหลายเลเบลได้แก่ การทำนายชนิดของสิ่งมีชีวิตซึ่งอาจจะประกอบไปด้วย แพนดา และ แมวในรูปเดียวกันโดยสมการที่ (2.84) แสดง ครอสเอนโทรปีสำหรับการจำแนกประเภทหลายเลเบล

$$Multi - label\ cross\ entropy\ loss = -\sum_{i=1}^{n} p(x_i)\, log\big(q(x_i)\big) \qquad (2.84)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยที่ $p(x_i)$ คือผลเฉลยของคำตอบที่คลาส i ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 และ $q(x_i)$ คือผลการทำนายด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการครอส-เอนโทรปี สำหรับการจำแนกประเภทในรูปแบบต่างๆ นั้นมีความคล้ายคลึงกันโดยหน้าที่ของวิธีการครอส-เอนโทรปีนั้นจะทำให้การทำนายมีความใกล้เคียงกับผลเฉลยให้มากที่สุด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วลอกการิทึมฐานธรรมชาติ หรือ แน็ต (Nat) มักจะถูกใช้ในการคำนวณ โดยตัวอย่างของการทำนายทั้ง 3 แบบซึ่งประกอบไปด้วย การจำแนกประเภทไบนารี, การจำแนกประเภทหลายคลาส และ การจำแนกประเภทหลายเลเบล แสดงดังรูปที่ 2.29



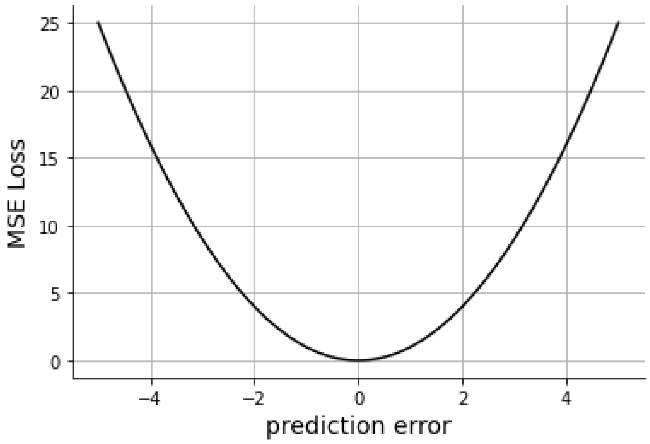
รูปที่ 2.29 รูปภาพ และ ผลการทำนายประเภทในหลากหลายรูปแบบ
[https://www.mathworks.com]

2.3.7.2 ฟังชันความคลาดเคลื่อนกำลังสอง

ฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Akaike, 1992) เป็นฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนพื้นฐานสำหรับการทำนายการถดถอยโดยจุดเด่น คือ เมื่อการทำนายมีความคลาดเคลื่อนมากค่าความผิดพลาดก็จะยิ่งสูงอีกนัยหนึ่งคือ เมื่อข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนสูงฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนกำลังสองก็จะยิ่งปรับปรุงตัวแปรในอัตราการเปลี่ยนแปลงที่สูงโดยสมการที่ (2.85) และ รูปที่ 2.30 แสดงฟังก์ชันความผิดพลาดกำลังสอง และ กราฟของฟังก์ชันความผิดพลาดกำลังสอง

$$MSE\ Loss(y, \hat{y}) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1}(y_i - \hat{y}_i)^2 \qquad (2.85)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



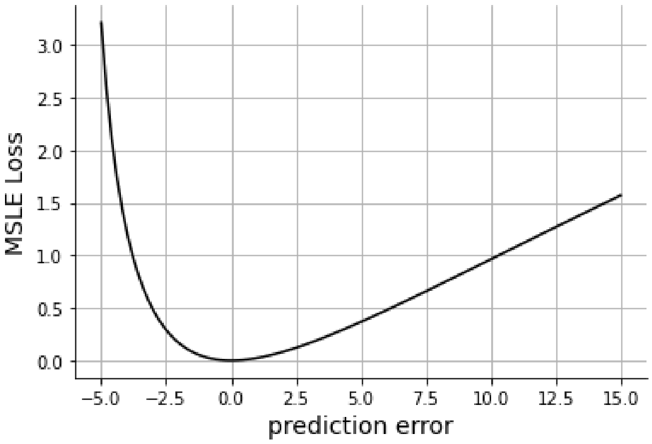
รูปที่ 2.30 กราฟฟังก์ชันความผิวพลาดกำลังสอง

โดยที่ y_i คือ ผลเฉลยที่ตำแหน่ง i, $\hat{y}_i$ คือ ผลการทำนายที่ตำแหน่ง i ซึ่งมีจำนวนจุดของข้อมูลที่ใช้ในการประเมิณเท่ากับ N จุด

2.3.7.3 ฟังก์ชันความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยลอกการิทึม

ฟังก์ชันความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยลอกการิทึม (Akaike, 1992) เป็นฟังก์ชันที่แสดงถึงความคลาดเคลื่อนระหว่างผลเฉลย และ ผลการทำนายในรูปแบบลอกการิทึม โดยที่ฟังก์ชันความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยลอการิทึมนั้นจะปรับปรุงตัวแปรจากผลของการทำนายที่ต่ำกว่าค่าจริง (Underestimate) ในอัตราที่สูงเหมือนฟังชันความคลาดเคลื่อนกำลังสองในหัวข้อก่อนหน้าในทางกลับกันฟังก์ชันความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยลอการิทึมนั้นจะปรับปรุงตัวแปรจากผลของการทำนายที่สูงกว่าค่าจริง (Overestimate) ในอัตราที่ต่ำกว่าซึ่งเหมือนกับฟังชันค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสมบูรณ์ที่จะอธิบายในหัวข้อถัดไปโดยสมการ และ กราฟของฟังก์ชันความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยลอกการิทึม แสดงดังสมการที่ (2.86) และ รูปที่ 2.31

$$MSLE\ Loss\ (y, \hat{y}) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1}(\log\ (y_i + 1) - \log\ (\hat{y}_i + 1))^2 \qquad (2.86)$$



รูปที่ 2.31 กราฟฟังก์ชันความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยลอกการิทึม

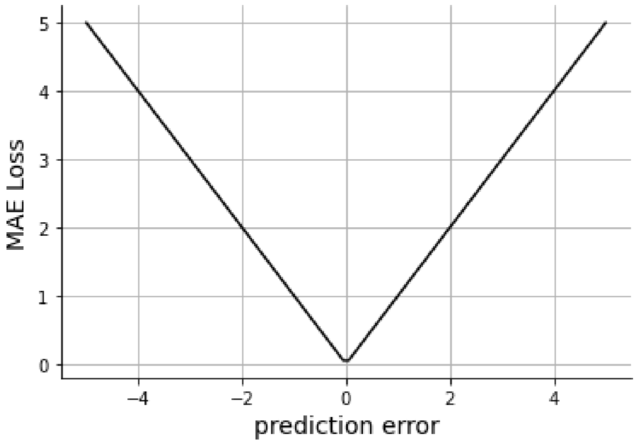
โดยที่ y_i คือผลเฉลยที่ตำแหน่ง i, $\hat{y}_i$ คือผลการทำนายที่ตำแหน่ง i ซึ่งมีจำนวนจุดของข้อมูลที่ใช้ในการประเมิณเท่ากับ N จุด

2.3.7.4 ฟังชันค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสมบูรณ์

ฟังชันค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสมบูรณ์ (Willmott & Matsuura, 2005) เป็นฟังก์ชันที่สามารถสังเกตุความคลาดเคลื่อนของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมระหว่างการฝึกฝนได้ดี และสามารถที่จะรับมือกับกลุ่มข้อมูลที่ผิดปกติ (outlier) ไม่มากได้ดีกว่าฟังชันความผิดพลาดกำลังสองแต่เมื่อกลุ่มข้อมูลที่ผิดปกติมีจำนวนมาก หรือ ความผิดปกตินั้นเป็นคุณลักษณะสำคัญบางอย่าง การใช้ฟังก์ชันความผิดพลาดกำลังสองจะมีความเหมาะสมมากกว่าฟังชันค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสมบูรณ์โดยที่สมการ และ กราฟของฟังชันค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสมบูรณ์แสดงดังสมการที่ (2.87) และ รูปที่ 2.32 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$MAPE\ Loss(y,\hat{y}) = \frac{100\%}{N}\sum_{i=0}^{N-1}|y_i - \hat{y}_i| \qquad (2.87)$$



รูปที่ 2.32 กราฟฟังก์ชันค่าเฉลี่ยร้อยละความผิดพลาดสมบูรณ์

โดยที่ y_i คือผลเฉลยที่ตำแหน่ง i, $\hat{y}_i$ คือผลการทำนายที่ตำแหน่ง i ซึ่งมีจำนวนจุดของข้อมูลที่ใช้ในการประเมิณเท่ากับ N จุด

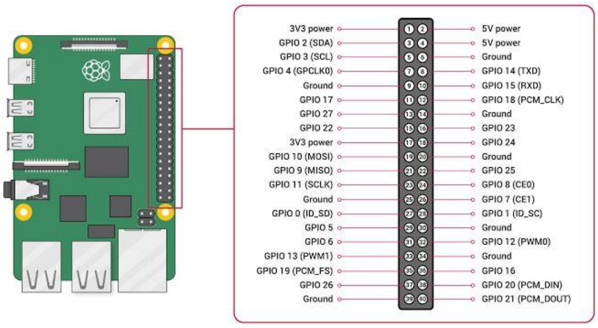
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 3
ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 การประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนขนาดเล็กส่วนเครื่อง

ส่วนเครื่อง (hardware) ในงานวิจัยนี้ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์แบบราสเบอร์รีพาย 3 บี (Raspberry Pi 3b) เป็นส่วนควบคุมหลักซึ่งจะทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณจากการตรวจวัดตลื่นไหวสะเทือน (Signal processing), วิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัว (Dispersion curve analysis), การทำนายความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity prediction), การแสดงผลข้อมูลผ่านส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (GUI) รวมถึงการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์สำหรับสั่งการอย่างสมาร์ทโฟนผ่านเครือข่ายเสมือน (VNC)

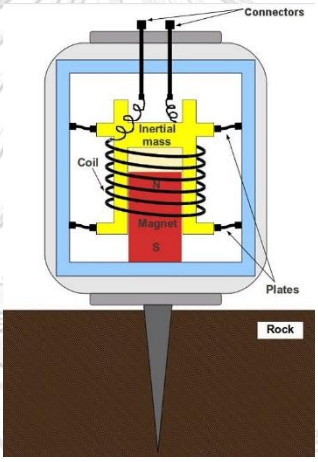
ซึ่งราสเบอร์รีพาย 3 บี ใช้หน่วยประมวลผลกลางรุ่น Broadcom BCM2837B0 ซึ่งมีความละเอียด 64 บิตที่ความเร็วสัญญาณนาฬิกา (Clock Speed) 1.4 กิกะเฮิรตซ์ มีหน่วยความจำหลัก (RAM) 1 กิกะไบต์ มีพอร์ตอเนกประสงค์ (General Purpose Input Output, GPIO) จำนวน 40 หัว ซึ่งจะสามารถรับสัญญาณในรูปแบบค่าตรรกะ (Logical value) ซึ่งเมื่อใดก็ตามที่พอร์ตอเนกประสงค์ตรวจวัดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ (threshold) ที่ความต่างศักย์ประมาณ 1.8 โวลต์สำหรับพอร์ตอเนกประสงค์ที่รับสัญญาณ 3.3 โวลต์ค่าตรรกะของพอร์ตอเนกประสงค์หัวนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0 หรือ Low แต่เมื่อใดก็ตามที่พอร์ตอเนกประสงค์ตรวจวัดความต่างศักย์ที่มีค่ามากกว่า 1.8 โวลต์ค่าตรรกะของพอร์ตอเนกประสงค์นั้นจะมีค่าเท่ากับ 1 หรือ High โดยรูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพของราสเบอร์รีพาย 3 บี และ รายละเอียดพอร์ตอเนกประสงค์



รูปที่ 3.1แผนภาพของราสเบอร์รีพาย 3 บี และ รายละเอียดพอร์ตอเนกประสงค์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ซึ่งจะเห็นได้ว่าพอร์ตอเนกประสงค์ของราสเบอร์รีพาย 3 บี นั้นจะสามารถส่ง และ รับสัญญาณที่มีความละเอียดต่ำซึ่งไม่สามารถอธิบายคลื่นผิวดินจากการตรวจวัดที่มีความซับซ้อนได้จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มเติมสำหรับการตรวจวัดที่ละเอียดมากยิ่งขึ้นโดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ Texas Instrument ADS 1256 ซึ่งเป็นอุปกรณ์แปลงสัญญาณที่มีความละเอียด 24 บิต โดยมีช่องสัญญาณขาเข้า (Input channels) จำนวน 8 ช่องสัญญาณ สำหรับการตรวจวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปลายเดียว (Single-end) มีอัตราการสุ่มตัวอย่าง (sampling rate) สูงสุด 30,000 ตัวอย่างต่อวินาทีโดย ADS 1256 สามารถสื่อสารกับราสเบอร์รีพาย 3 บี ผ่านการสื่อสารแบบอนุกรมหรือ SPI (Serial Peripheral Interface) โดย ADS 1256 จะตรวจวัดความต่างศักย์ของสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากขดลวด (Coil) และ มวลความเฉื่อย (Inertia mass) ของจีโอโฟนดังรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงส่วนประกอบภายในจีโอโฟน



รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบภายในจีโอโฟน

ซึ่งอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้ใช้กล่อง (case) จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งใช้โพลีแลคติคแอซิด (Polylactic acid, PLA) เป็นวัสดุสำหรับการขึ้นแบบพิมพ์โดยอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กขนาดเล็กรุ่นต้นแบบ (prototype) ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนในงานวิจัยนี้

3.2 การประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนขนาดเล็กส่วนควบคุม

ส่วนควบคุม (software) พื้นฐานในงานวิจัยนี้พัฒนาด้วยโปรแกรม ไพทอน 3 (Python 3) เป็นหลักซึ่งพัฒนาร่วมกับคลังโปรแกรม หรือ ไลบรารี (Library) ซึ่งจะทำให้การพัฒนาโปรแกรมมีประสิทธิภาพ และ มีความสะดวกในการพัฒนา โดยตารางที่ 3.1 แสดงคลังโปรแกรมหลักสำหรับพัฒนาส่วนควบคุมในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 3.1 คลังโปรแกรมหลักสำหรับพัฒนาส่วนควบคุม

คลังโปรแกรม	คุณลักษณะ
NumPy	การจัดการข้อมูลอาเรย์ เมทริกซ์ และ ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์
SciPy	การคำนวณทางด้านวิทยาศาสตร์ และ เทคนิค
Matplotlib	การจัดการการพล็อตข้อมูลเชิงตัวเลข
Pandas	การจัดการวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านตาราง อนุกรมเวลา และ ชุดข้อมูล
TensorFlow	การจัดการข้อมูลทางด้านการเรียนรู้ของเครื่องมือ และ การเรียนรู้เชิงลึก
Keras	การพัฒนาทางด้านโครงข่ายประสาทเทียม
Scikit learn	การพัฒนาทางด้านโครงข่ายประสาทเทียม
Scikit image	การจัดการรูปสำหรับการพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียม
PyQt	การพัฒนาชุดเครื่องมือสำหรับส่วนต่อประสานกราฟิกผู้ใช้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3 การพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียม

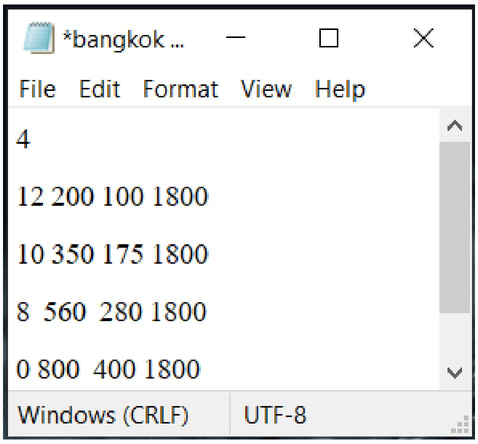
การพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนซึ่งประกอบด้วยส่วนของการสร้างชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้, ส่วนของการฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม และ ส่วนของการวิเคราะห์โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมหลังจากการฝึกฝน

3.3.1 การสร้างชุดข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ซึ่งจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ 1) ส่วนข้อมูลที่ใช้สำหรับเป็นเนื้อหาในการฝึกฝนซึ่งก็คือข้อมูลของความเร็วเฟสในช่วงความถี่ที่สนใจ และ 2) ส่วนของผลคำตอบซึ่งได้แก่โมเดลการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกชั้นดินที่สอดคล้องกับส่วนของเนื้อหาการฝึกฝน

โดยชุดข้อมูลในงานวิจัยนี้สร้างมาจาก Geopsy package (Marc Wathelet, 2005) ด้วยโมดูล Geopsy package dispersion curve (gpdc) ซึ่งการสร้างชุดข้อมูลนั้นเริ่มต้นโดยการสร้างโมเดลคุณสมบัติของชั้นดินซึ่งอยู่ในรูปของไฟล์นามสกุล .MODEL แล้วทำการเรียกใช้โมดูล gpdc ผ่านหน้าต่างพร้อมท์คำสั่ง (command prompt, cmd) ซึ่งจะได้คำตอบเป็นความเฉื่อยของเฟส (Phase slowness) ในแต่ละความถี่ซึ่งความเฉื่อยของเฟสนั้นเป็นส่วนกลับของความเร็วเฟสหลังจากนั้นจึงทำการจัดเก็บข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ในไฟล์ .CSV โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาชุดคำสั่งสำหรับการสร้างชุดข้อมูลซึ่งจะสร้างโมเดลการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกชั้นดินแบบสุ่มทำงานในรูปแบบของการวนซ้ำ ซึ่งตัวอย่างโมเดลคุณสมบัติของชั้นดินประกอบไปด้วย แถวแต่ละแถวเปรียบเสมือนชั้นดินแต่ละชั้น ซึ่งชั้นดินแต่ละชั้นจะประกอบไปด้วย ความหนาของชั้นดิน, ความเร็วคลื่นอัดของชั้นดิน, ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน และ ความหนาแน่นของชั้นดิน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างโมเดลคุณสมบัติของชั้นดิน

โดยในงานวิจัยนี้ได้สร้างชุดข้อมูลที่มีขอบเขตของตัวแปรคุณสมบัติของชั้นดินที่แตกต่างกันตามพื้นที่ของการสำรวจที่ซึ่งประกอบไปด้วยโมเดล A สำหรับการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการตรวจวัดในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ โมเดล B สำหรับการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการตรวจวัดในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล (MTL) และ พื้นที่โครงการบางบอน 5 (BB) โดยขอบเขตของตัวแปรคุณสมบัติชั้นดิน A และ B แสดงดังตารางที่ 3.2 และ ตารางที่ 3.3 ตามลำดับโดยที่ H (m) คือความหนาของชั้นดินในหน่วย เมตร, Vs (m/s) คือความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในหน่วย เมตรต่อวินาที, Vp/Vs คืออัตราส่วนระหว่างความเร็วคลื่นอัดและ ความเร็วคลื่นเฉือน และ Density (t/m3) คือความหนาแน่นของชั้นดินในหน่วน ตันต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งหลังจากการสร้างชุดข้อมูลสำหรับฝึกฝนเรียบร้อยแล้วในหัวข้อถัดไปคือการฝึกฝนโครงข่ายประสาทเทียม

ตารางที่ 3.2 ขอบเขตของตัวแปรคุณสมบัติชั้นดินโมเดล A

Layer	H (m)	Vs (m/s)	Vp/Vs	Density (t/m3)
1	3	80~360	2	1.8
2	3	80~360	2	1.8
3	3	80~360	2	1.8
4	3	80~360	2	1.8
5	3	80~360	2	1.8
6	3	80~360	2	1.8
7	3	80~360	2	1.8
8	3	80~360	2	1.8
9	3	80~360	2	1.8
10	3	80~360	2	1.8
11	Half space	240~720	2	1.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.3 ขอบเขตของตัวแปรคุณสมบัติชั้นดินโมเดล B

Layer	H (m)	Vs (m/s)	Vp/Vs	Density (t/m3)
1	3	50~360	2	1.8
2	3	50~360	2	1.8
3	3	50~360	2	1.8
4	3	50~360	2	1.8
5	3	50~360	2	1.8
6	3	50~360	2	1.8
7	3	50~360	2	1.8
8	3	50~360	2	1.8
9	3	50~360	2	1.8
10	3	50~360	2	1.8
11	Half space	240~740	2	1.8

3.3.2 การฝึกฝนโครงข่ายประสาทเทียม

การฝึกฝนโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Google colab ซึ่งเป็น Jupyter Notebook ที่ประมวลผลผ่านคลาวด์ของ Google ที่จะสามารถทำให้ผู้ใช้งานเข้าถึงฮาร์ดแวร์ของ Google ที่มีประสิทธิภาพที่สูงอย่าง NVIDIA TESLA T4 ได้โดยการฝึกฝนโครงข่ายประสาทเทียมนั้นเริ่มต้นจากการสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งเป็นสิ่งที่จะบ่งบอกความซับซ้อนของโครงข่ายประสาทเทียมโดยสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 3.4 ซึ่งหลังจากสร้างสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมแล้วในขั้นตอนต่อไปคือขั้นตอนการฝึกฝนโดยการฝึกฝนโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยจะแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 3 ชุดข้อมูลย่อยซึ่งประกอบไปด้วย 1) ชุดข้อมูลสำหรับการฝึกฝนซึ่งมีสัดส่วนเป็นร้อยละ 60 2) ชุดข้อมูลสำหรับประเมินความคลาดเคลื่อนระหว่างการฝึกฝนซึ่งมีสัดส่วนเป็นร้อยละ 30 และ 3) ชุดข้อมูลสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องหลังการฝึกฝนซึ่งมีสัดส่วนเป็นร้อยละ 10 ซึ่งหลังจากการแบ่งชุดข้อมูลย่อยแล้วต่อมาคือการตั้งค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์เริ่มต้นซึ่งประกอบไปด้วย อัลกอริทึมวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (optimizer), อัตราการเรียนรู้ (learning rate), ฟังก์ชันความคลาดเคลื่อน (loss function), วิธีประเมินความแม่นยำระหว่างและหลังฝึกฝน, จำนวนรอบในการฝึกฝน (epoch), ขนาดของแบทซ์ (batch size) และ จำนวนรอบย่อยในหนึ่งรอบการฝึกฝน (steps per epoch)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการตั้งค่าเกณฑ์การบันทึกโมเดลผ่านฟังก์ชันเรียกกลับ (callbacks function) ซึ่งจะบันทึกโมเดลตามข้อกำหนดที่ตั้งไว้แทนที่การบันทึกโมเดลเมื่อครบรอบการฝึกฝนสุดท้ายเพียงอย่างเดียวซึ่งสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้, การตั้งค่าไฮเปอร์พารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการฝึกฝน และ เกณฑ์การบันทึกโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม แสดงดังตารางที่ 3.4,ตารางที่ 3.5 และ ตารางที่ 3.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการฝึกฝน

Layer (type)	Output Shape	Activation function
Input	n x 16	-
Dense	1 x 32	Rectified Linear Unit
Dense	1 x 32	Rectified Linear Unit
Dense	1 x 64	Rectified Linear Unit
Dense	1 x 64	Rectified Linear Unit
Dense	1 x 128	Rectified Linear Unit
Dense	1 x 128	Rectified Linear Unit
Dense	1 x 128	Rectified Linear Unit
Dense	1 x 128	Rectified Linear Unit
Output	n x 11	-

ตารางที่ 3.5 ไฮเปอร์พารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับใช้ในการฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

Parameters	Initial setup
Optimizer	ADAM
Learning rate	10e-5
Loss function	Mean Absolute Percentage Error
Metrics	accuracy
Epoch	10,000
Batch size	32
steps per epoch	256

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.6 เกณฑ์ที่ใช้สำหรับการบันทึกโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

Parameters	Setup
Monitors	Validation loss
Mode	Min
File	.PB

หลังจากการฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมสมบูรณ์แล้วต่อมาคือวิธีการวัดผลของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมโดยการใช้ชุดข้อมูลสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องหลังจากเสร็จสิ้นการฝึกฝน ซึ่งจะเป็นชุดข้อมูลที่โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมไม่เคยถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงตัวแปรในช่วงการแพร่กระจายย้อนกลับ โดยผลการฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมในรอบการเรียนรู้สุดท้ายสำหรับการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, โครงการมัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล และ โครงการ บางบอน 5 แสดงดังตารางที่ ตารางที่ 3.7 และตารางที่ 3.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.7 ผลการฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมจากขอบเขตตัวแปร A

Model name	Frequency range (Hz)	Validation loss (%)	Validation accuracy (%)
A_3.0_4.0	3.0 – 4.0	28.67	91.37
A_3.0_4.5	3.0 - 4.5	28.83	91.36
A_3.0_5.5	3.0 – 5.5	28.20	91.38
A_3.5_5.5	3.5 – 5.5	28.32	91.35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.8 ผลการฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมจากขอบเขตตัวแปร B

Model name	Frequency range (Hz)	Validation loss (%)	Validation accuracy (%)
B_2.3_3.0	2.3 – 3.0	33.41	81.77
B_2.3_3.3	2.3 – 3.3	33.49	81.78
B_2.5_4.8	2.5 – 4.8	31.61	81.96
B_2.7_4.0	2.7 – 4.0	32.92	81.83
B_2.7_4.3	2.7 – 4.3	32.76	81.83
B_3.0_3.5	3.0 – 3.5	34.95	81.69
B_3.0_4.0	3.0 – 4.0	34.74	81.73
B_3.0_5.0	3.0 – 5.0	32.84	81.74

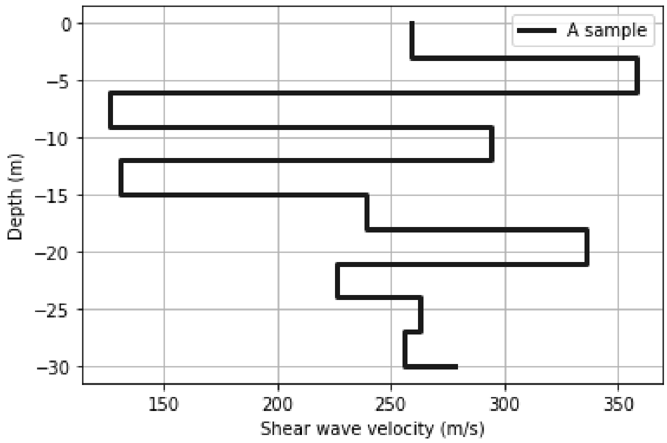
โดยที่ Validation loss (%) คือร้อยละของความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทำนาย และ ผลเฉลย ด้วยชุดข้อมูลทดสอบหลังจากเสร็จสิ้นการฝึกฝน และ Validation accuracy (%) คือร้อยละของความแม่นยำซึ่งจะบอกถึงอัตราการทำนายถูกของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

3.3.3 การวิเคราะห์โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมหลังจากการฝึกฝน

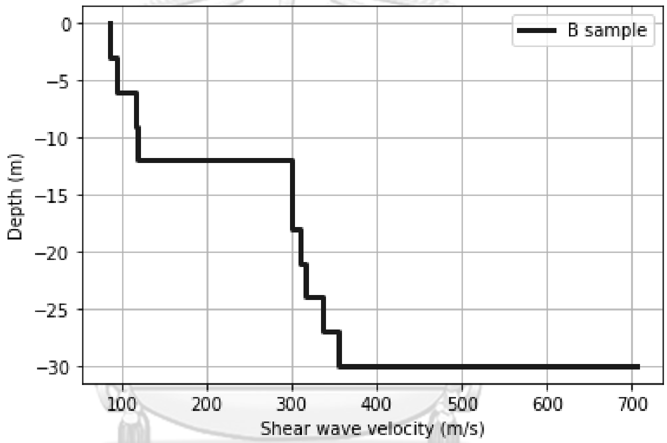
การวิเคราะห์โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมหลังจาการฝึกฝนเป็นวิธีการที่ใช้สำหรับการเลือกโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมจากกลุ่มโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมที่มีรอบการเรียนรู้ที่แตกต่างกันโดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมิณความคลาดเคลื่อนของโมเดลโดยให้โมเดลที่เรียนรู้ครบแต่ละรอบการฝึกฝนทำนายชุดข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ เปรียบเทียบกับชุดข้อมูลเดิมที่ใช้ในการฝึกฝนรวมถึงการศึกษาพฤติกรรมการเรียนรู้เพิ่มเติมของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมด้วยการทำนายชุดข้อมูลใหม่ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนต่อความลึกของชั้นดินที่แตกต่างกันจำนวน 4 ชุดข้อมูลซึ่งประกอบไปด้วย ชุดข้อมูล A ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่มีการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนเป็นแบบสุ่มจำนวน 491 ข้อมูล, ชุดข้อมูล B ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่มีการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนจากน้อยไปมากตามความลึกของชั้นดินจำนวน 500 ข้อมูล, ชุดข้อมูล C ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่มีการจัดเรียงของความเร็วคลื่นเฉือนแบบดินอ่อนอยู่ระหว่างดินแข็งจำนวน 500 ข้อมูล และชุดข้อมูล D ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่มีการจัดเรียงของความเร็วคลื่นเฉือนแบบดินแข็งอยู่ระหว่างดินอ่อนจำนวน 500 ข้อมูล เปรียบเทียบกับชุดข้อมูล S ซึ่งเป็นชุดข้อมูลย่อยจากชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับการเรียนรู้ของโมเดลจำนวน 500 ข้อมูล โดยตัวอย่างการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากชุดข้อมูล A, B, C และ D แสดงดัง

รูปที่ 3.5, รูปที่ 3.6, รูปที่ 3.7 และ รูปที่ 3.8

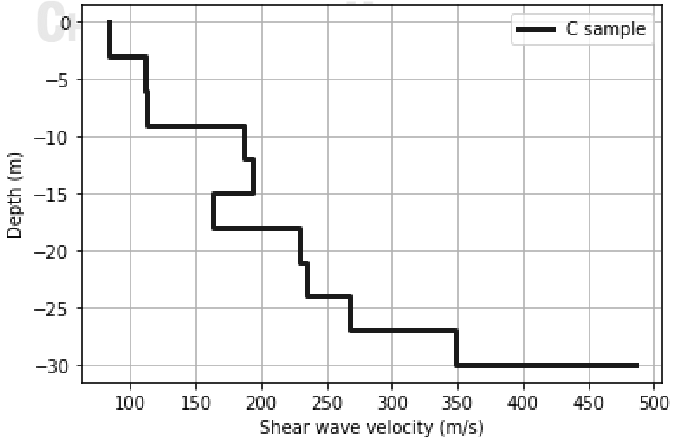
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



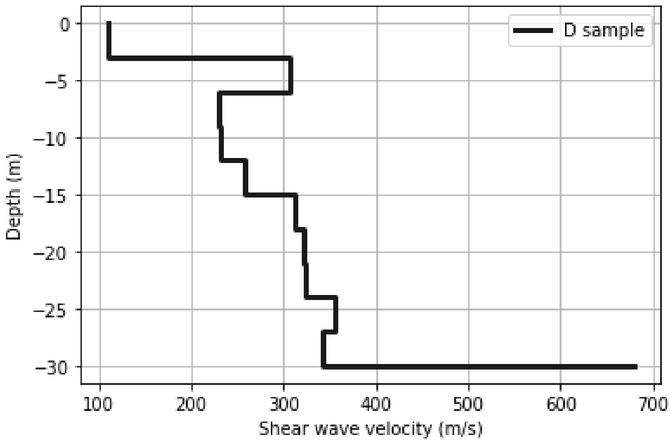
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนจากชุดข้อมูล A



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนจากชุดข้อมูล B



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนจากชุดข้อมูล C

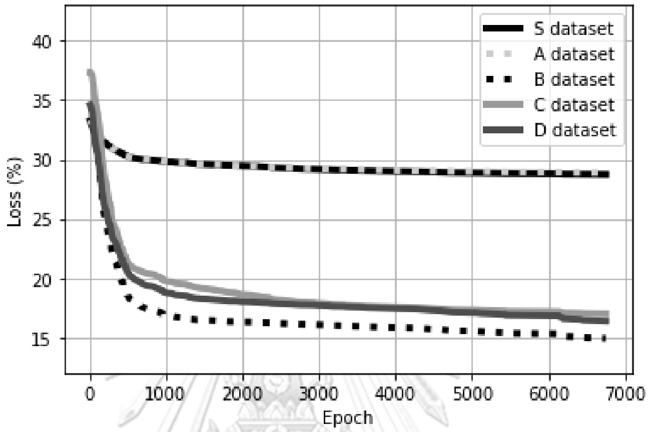


รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนจากชุดข้อมูล D

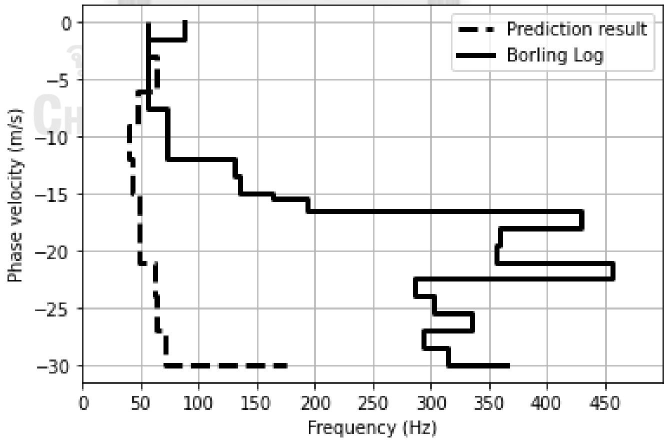
จากการวิเคราะห์พบว่าความคลาดเคลื่อนของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมจากการทำนายชุดข้อมูล A ซึ่งเป็นชุดข้อมูลใหม่ และ ชุดข้อมูล S ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่ถูกใช้ในการฝึกฝนที่มีวิธีการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินที่คล้ายคลึงกันมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน ในขณะที่โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนจุดข้อมูลที่แตกต่างกันจะมีจำนวนรอบของการเรียนรู้เหมาะสมที่แตกต่างกัน โดยที่โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนจุดข้อมูลมากกว่าอย่าง B_2.5_4.8 ที่มีจำนวนจุดข้อมูล 24 จุดข้อมูล จะสามารถทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินได้ใกล้เคียงกับผลเฉลยในช่วงรอบการเรียนรู้ที่ 352 ถึง 407 รอบ ในขณะที่โครงข่ายประสาทเทียมที่มีจำนวนจุดข้อมูลน้อยกว่าอย่าง B_2.3_3.0 ที่มีจำนวนจุดข้อมูลเพียง 8 จุดข้อมูล จะสามารถทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินได้ใกล้เคียงกับผลเฉลยในช่วงรอบการเรียนรู้ที่ 600 ถึง 1,800 รอบ

โดยการเรียนรู้ในช่วงแรก หรือ ก่อนช่วงการเรียนรู้ที่เหมาะสมนั้นโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมพยายามที่จะปรับปรุงตัวแปรให้คำตอบจากการทำนายสอดคล้องกับผลเฉลยมากที่สุดสังเกตุได้จากรูปที่ 3.9 ที่ช่วงความชันของการเรียนรู้ในช่วงแรกนั้นมีลักษณะที่ชันมากเนื่องจากโมเดลนั้นยังสามารถที่จะปรับปรุงตัวแปรให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยลงได้ ซึ่งการเลือกใช้โมเดลในช่วงแรกนั้นจะทำให้ผลการทำนายมีความคลาดเคลื่อนจากผลกระทบของการเรียนรู้ที่น้อยเกินไป (Underfitting) ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 3.10 ในขณะที่โมเดลในช่วงการเรียนรู้ที่เยอะเกินไปซึ่งสังเกตได้จากรอบการเรียนรู้ที่ประมาณ 400 รอบ ขึ้นไปโมเดล B_2.5_4.8 จะมีช่วงความชันที่ลดลงจนเกือบจะเป็นเส้นตรงแนวนอน เนื่องจากโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมพยายามที่จะลดความคลาดเคลื่อนซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้นจากข้อจำกัดของชุดข้อมูลยกตัวอย่าง เช่น เส้นโค้งการกระจายตัวในช่วงความถี่ต่ำที่ไม่สามารถตรวจวัดได้เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านการตอบสนองต่อช่วงความถี่ของจีโอโฟน หรือ เป็นความคลาดเคลื่อนที่ไม่สามารถเรียนรู้เพิ่มขึ้นได้ ซึ่งส่งผลทำให้โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับฝึกฝนให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าที่ควรจะเป็น

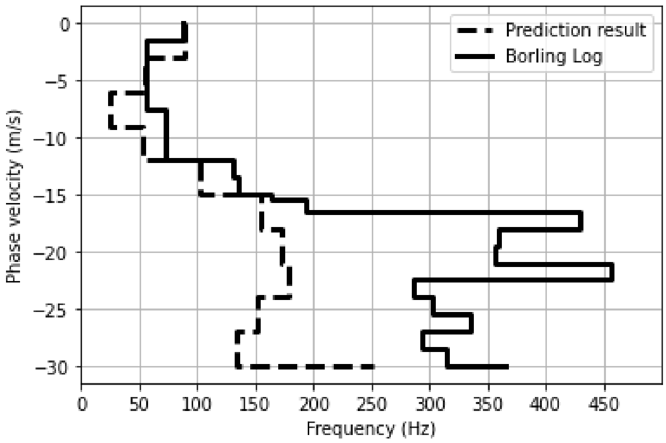
แต่จะมีความคลาดเคลื่อนจากการทำนายชุดข้อมูลใหม่ซึ่งไม่เคยใช้ในการฝึกฝนที่สูงขึ้นซึ่งปัญหานี้ถูกเรียกว่าการเรียนรู้ที่พอดีเกินไป (Over Fitting) สังเกตได้จากรูปที่ รูปที่ 3.14 ซึ่งแนวโน้มความคลาดเคลื่อนของโมเดล B_2.5_4.8 ในแต่ละรอบการฝึกฝนจากการทำนายชุดข้อมูล A, B, C, D และ S และ ตัวอย่างผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินหลังจากเรียนรู้ครบ 102, 307, 352 990 และ 7384 รอบ แสดงดังรูปที่ รูปที่ 3.10, รูปที่ 3.11, รูปที่ 3.12, รูปที่ 3.13 และ รูปที่ 3.14 ตามลำดับ



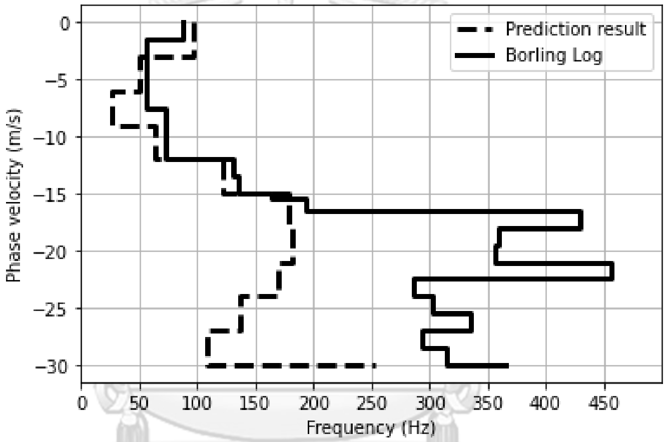
รูปที่ 3.9 แนวโน้มความคลาดเคลื่อนของโมเดล B_2.5_4.8 จากการทำนายชุดข้อมูล A, B, C, D และ S ในแต่ละรอบการฝึกฝน



รูปที่ 3.10 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.5_4.8 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 102 รอบ

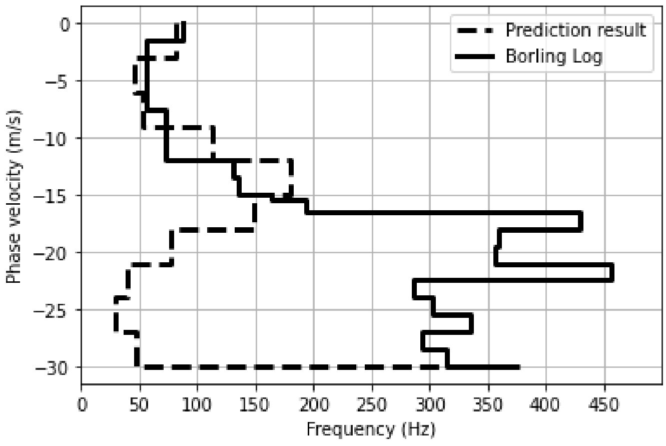


รูปที่ 3.11 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.5_4.8 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 307 รอบ

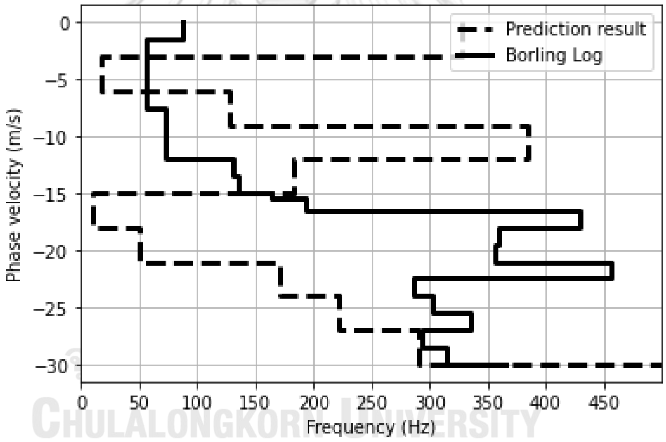


รูปที่ 3.12 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.5_4.8 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 352 รอบ

CHULALONGKORN UNIVERSITY



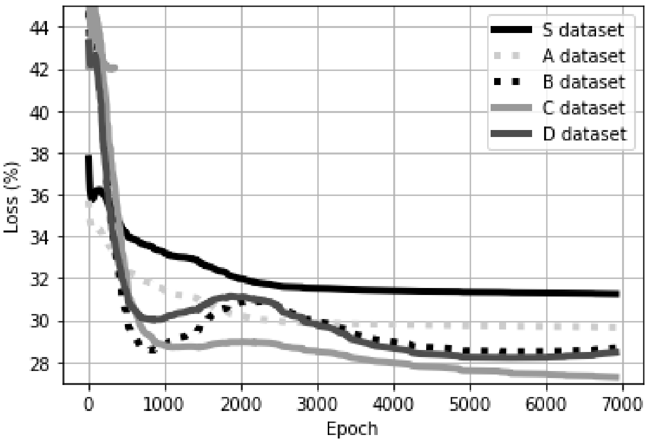
รูปที่ 3.13 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.5_4.8 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 990 รอบ



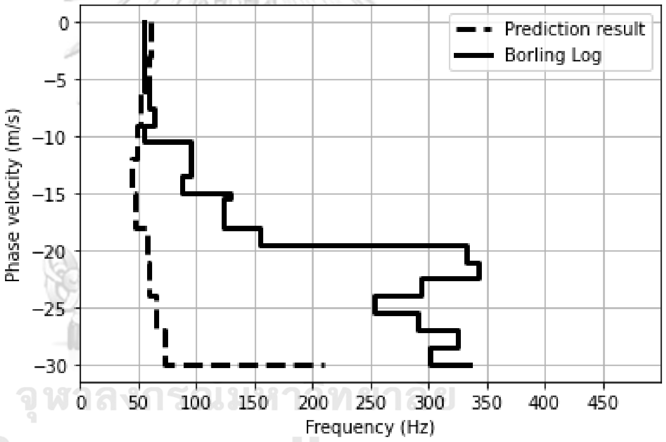
รูปที่ 3.14 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.5_4.8 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 7384 รอบ

โดยแนวโน้มความคลาดเคลื่อนของโมเดล B_2.3_3.0 ในแต่ละรอบการฝึกฝนจากการทำนายชุดข้อมูล A, B, C, D และ S และ ตัวอย่างผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินหลังจากเรียนรู้ครบ 100, 361, 607, 1500, 1800 และ 6916 รอบ แสดงดังรูปที่ 3.15, รูปที่ 3.16, รูปที่ 3.17, รูปที่ 3.18, รูปที่ 3.19, รูปที่ 3.20 และ รูปที่ 3.21 ตามลำดับ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

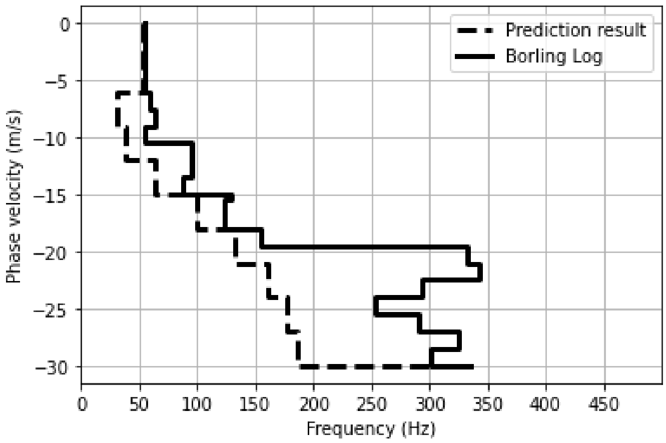


รูปที่ 3.15 แนวโน้มความคลาดเคลื่อนของโมเดล B_2.3_3.0 จากการทำนายชุดข้อมูล A, B, C, D และ S ในแต่ละรอบการฝึกฝน

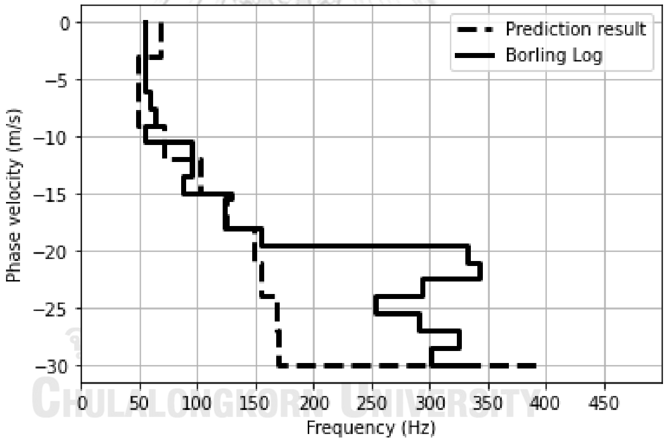


CHULALONGKORN UNIVERSITY

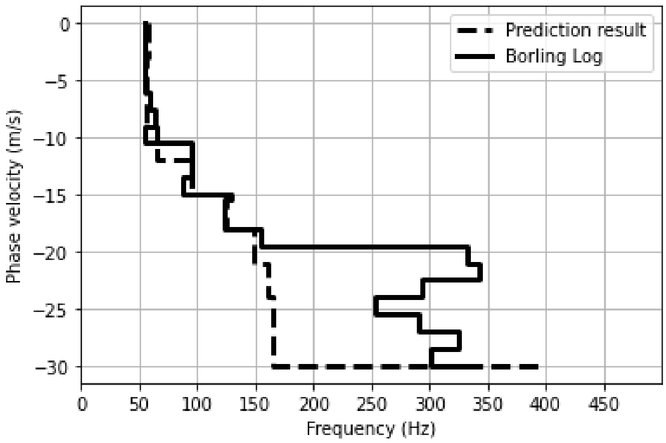
รูปที่ 3.16 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.3_3.0 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 100 รอบ



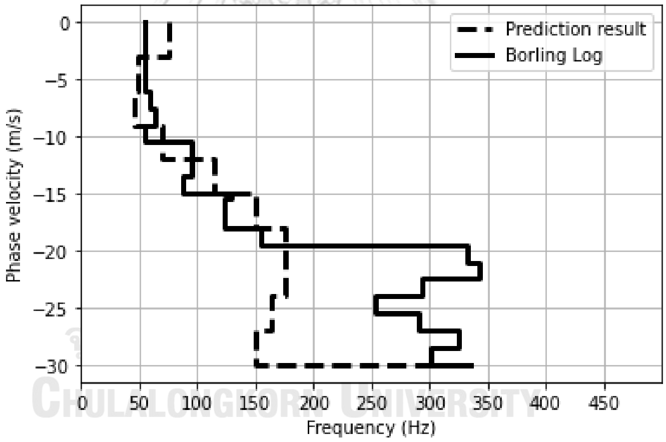
รูปที่ 3.17 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.3_3.0 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 361 รอบ



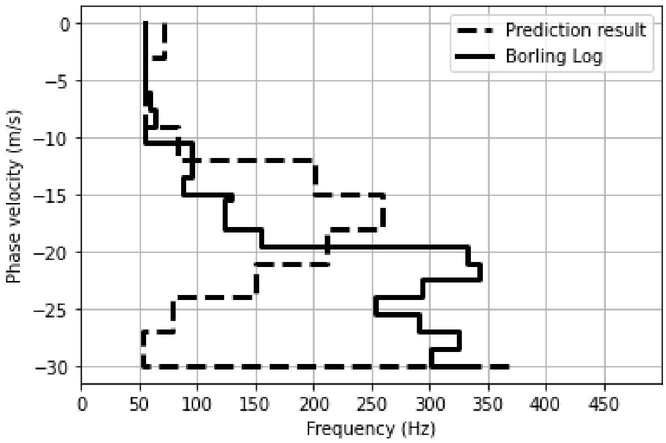
รูปที่ 3.18 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.3_3.0 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 607 รอบ



รูปที่ 3.19 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.3_3.0 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 1500 รอบ



รูปที่ 3.20 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.3_3.0 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 1800 รอบ



รูปที่ 3.21 ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโมเดล B_2.3_3.0 ที่เรียนรู้ชุดข้อมูลครบ 6916 รอบ

ซึ่งจากการศึกษาพฤติกรรมส่วนเพิ่มเติมของโครงข่ายประสาทเทียมพบว่าลักษณะการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินนั้นมีผลต่อความคลาดเคลื่อนของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งสังเกตุได้จากรูปที่ 3.9 และ รูปที่ 3.15 ที่ผลการทำนายชุดข้อมูลที่มีการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนแบบสุ่มตามความลึกของชั้นดินมีความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่าการจัดเรียงตัวแบบอื่นถึงแม้ว่าชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกฝนจะเป็นชุดข้อมูลที่ถูกสร้างมาจากการจัดเรียงตัวแบบสุ่มก็ตาม ซึ่งความคลาดเคลื่อนของการทำนายผลในชุดข้อมูลที่มีการจัดเรียงตัวของความเร็วคลื่นเฉือนที่แตกต่างกันเนื่องมาจากในชั้นดินที่มีการจัดเรียงแบบไม่ปกติ (Invert layer) นั้นมีผลของคลื่นผิวดินในโหมดที่สูงกว่าโดยเฉพาะชั้นดินที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม

3.4 การแปลงโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในรูปแบบไฟล์ Hierarchical Data Format 5 (.HDF5), Protocol Buffer สำหรับรูปแบบตัวอักษร (Text format, .PBTXT) และ Protocol Buffer สำหรับรูปแบบไบนารี่ (Binary format, .PB) ซึ่งรองรับระบบปฏิบัติการณ์ อูบุนตู (Ubuntu), วินโดว์ (Windows) และ แมคโอเอส (macOS) ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการแปลงรูปแบบไฟล์เป็น TensorFlow Lite (.TFLITE) เพื่อที่จะรองรับระบบปฏิบัติการณ์ลินุกซ์ (Linux) โดยใช้หลักการควอนไทซ์ (Quantization) ซึ่งเป็นวิธีการแปลงโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมให้มีขนาดที่เล็กลง และ ยังสามารถลดระยะเวลาแฝง (latency) ของตัวเร่งส่วนประมวลผลกลาง (CPU Accelerator) ซึ่งต้องแรกมาด้วยความแม่นยำของการทำนายผลที่ลดลงเล็กน้อย ในงานวิจัยนี้จึงได้ทดสอบความคลาดเคลื่อนระหว่างโมเดลเริ่มต้นที่คำนวณจาก Google colab เปรียบเทียบกับโมเดลหลังจากการควอนไทซ์ที่คำนวณด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กในงานวิจัยนี้ ซึ่งพบว่าผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินใช้ระยะเวลาไม่เกิน 70 มิลลิวินาที และ มีความคลาดเคลื่อนไม่

เกิน 1 เมตรต่อวินาทีโดย ตารางที่ 3.9 แสดงตัวเลือกเทคนิคการควอนไทซ์แบบต่างๆ ซึ่งแสดง ข้อดีของแต่ละเทคนิค และ ระบบปฏิบัติการณ์ที่รองรับ

ตารางที่ 3.9 เทคนิคการควอนไทซ์แบบต่างๆ

Technique	Benefits	Hardware
Dynamic range quantization	4x smaller, 2x-3x speedup	CPU
Full integer quantization	4x smaller, 3x+ speedup	CPU, Edge, TPU, Microcontrollers
Float16 quantization	2x smaller, GPU acceleration	CPU, GPU

3.5 การตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กในพื้นที่ภาคสนาม

การตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กในพื้นที่ภาคสนามซึ่งประกอบด้วย 1) พื้นที่ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2) พื้นที่ โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล และ 3) พื้นที่โครงการบางบอน 5 โดยในแต่ละพื้นที่จะมีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป

3.5.1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

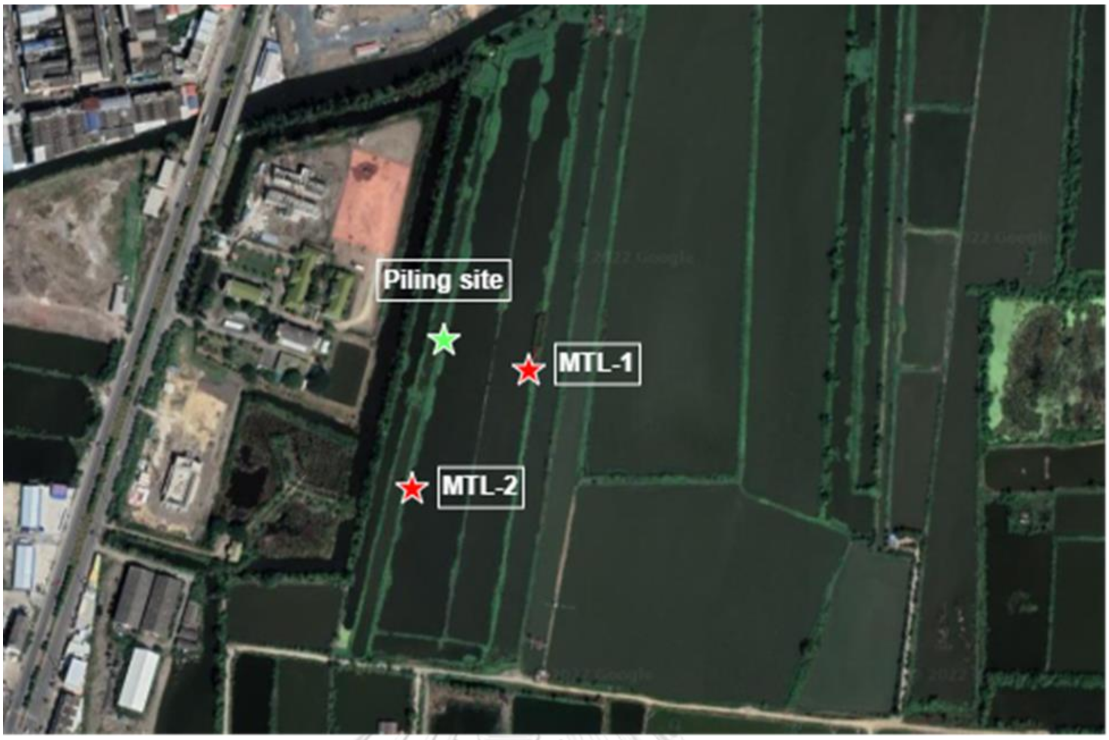
การสำรวจพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยบริเวณด้านข้างหอประชุมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมในเมืองโดยด้านข้างพื้นที่ตรวจวัดมีรถยนต์วิ่งผ่านเป็นระยะ โดยจุดที่ทำการตรวจวัดมีระยะห่างจากพื้นถนนอยู่ที่ประมาณ 5 เมตร โดยตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กด้วยรัศมีวงอาเรย์ขนาด 2, 4, 6, 8 และ 10 เมตร โดยเก็บข้อมูลคลื่นจำนวน 300,000 ข้อมูล ในแต่ละเซนเซอร์ซึ่งใช้ระยะเวลาในการตรวจวัดคลื่นประมาณ 15 นาที โดยมีผลการทดสอบดาวน์โฮลเป็นผลเปรียบเทียบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.22 ตำแหน่งของการสำรวจคลื่นสั่นไหวขนาดเล็กในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.2 โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล

พื้นที่โครงการมัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล ซึ่งเป็นพื้นที่ก่อสร้างซึ่งอยู่ในระหว่างขั้นตอนการตอกเสาเข็มโดยทำการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กจำนวน 2 จุด ได้แก่จุดที่ไกล้เขียงกับหลุมเจาะสำรวจที่ 3 (MTL-1) และ จุดที่ไกล้เคียงกับหลุมเจาะสำรวจที่ 4 (MTL-2) โดยระยะห่างระหว่างพื้นที่สำรวจ MTL-1 กับพื้นที่ตอกเสาเข็มมีระยะห่างประมาณ 20 เมตร และ ระยะห่างระหว่างพื้นที่สำรวจ MTL-2 กับพื้นที่ตอกเสาเข็มมีระยะทางประมาณ 150 เมตร โดยการตรวจวัดคลื่นในพื้นที่ MTL-1 และ MTL-2 ใช้รัศมีขนาด 4, 6, 8 และ 10 เมตร เก็บข้อมูลคลื่นจำนวน 300,000 ข้อมูล ใช้ระยะเวลาในการตรวจวัดคลื่นประมาณ 15 นาที โดยมีผลการเจาะสำรวจดิน และผลการตอกทดลองมาตรฐานเป็นผลเปรียบเทียบ



รูปที่ 3.23 ตำแหน่งของการสำรวจคลื่นสั่นไหวขนาดเล็กในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.24 สภาพพื้นที่สำหรับการสำรวจคลื่นสั่นไหวขนาดเล็กในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 1 (MTL-1)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.25 สภาพพื้นที่สำหรับการสำรวจคลื่นสั่นไหวขนาดเล็กในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียบ-ชายทะเล จุดที่ 2 (MTL-2)

3.5.3 แลนด์ แอนด์ เฮ้าส์ โครงการ บางบอน 5

พื้นที่โครงการบางบอน 5 เป็นพื้นที่ที่อยู่ระหว่างการถมดินซึ่งจะมีรถบรรทุกดินผ่านทุกๆ 10 นาที โดยทำการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กจำนวน 2 จุด ได้แก่ จุดที่ใกล้เคียงกับหลุมเจาะที่ 1 (BB-1) และ จุดที่ใกล้เคียงกับหลุมเจาะที่ 2 (BB-2) โดยระยะห่างระหว่างพื้นที่สำรวจ BB-1 กับ ถนนอยู่ที่ประมาณ 5 เมตร และ ระยะห่างระหว่างพื้นที่สำรวจ BB-2 กับ ถนนอยู่ที่ประมาณ 50 เมตร โดยตรวจวัดคลื่นโดยใช้รัศมีขนาด 4, 6 และ 8 เมตร เก็บข้อมูลคลื่นจำนวน 300,000 ข้อมูลใช้ระยะเวลาในการตรวจวัดคลื่นประมาณ 15 นาที โดยมีผลการเจาะสำรวจชั้นดิน และ ผลการตอกทดลองมาตรฐาน เป็นผลเปรียบเทียบ

รูปที่ 3.26 ตำแหน่งของการสำรวจคลื่นสั่นไหวขนาดเล็กในพื้นที่โครงการ บางบอน 5

รูปที่ 3.27 สภาพพื้นที่สำหรับการสำรวจคลื่นสั่นไหวขนาดเล็กในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1 (BB-1)รูปที่ 3.28

รูปที่ 3.29 สภาพพื้นที่สำหรับการสำรวจคลื่นสั่นไหวขนาดเล็กในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 (BB-2)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.6.1 การวิเคราะห์ผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน

ผลการทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์ความลึก และ ความแม่นยำที่โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายได้เปรียบเทียบกับผลความเร็วคลื่นเฉือนจากการคำนวณย้อนกลับด้วยโปรแกรม Dinver (Wathelet, 2008) โดยใช้ผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากวิธีดาวน์โฮล, วิธีเจาะสำรวจดิน และการตอกทดลองมาตรฐาน เป็นผลเฉลยโดยความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากวิธีเจาะสำรวจ และ การตอกทดลองมาตรฐานถูกแปลงด้วยสมการที่ (3.1) ซึ่งเสนอโดย (Likitlersuang & Kyaw, 2010) และสมการที่ (3.2) ซึ่งถูกเสนอโดย (Tonuochi, 1982) ตามลำดับ

$$V_s = 227.93\left(\frac{s_u}{p_a}\right)^{0.510} \tag{3.1}$$

$$V_s = 96.92N^{0.341} \tag{3.2}$$

โดยที่ V_s คือความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในหน่วยเมตรต่อวินาที, $\frac{s_u}{p_a}$ คือค่าหน่วยแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ถูกปรับค่ามาตรฐาน (normalized undrained shear strength parameter) และ N คือ N-value ในหน่วยครั้งต่อฟุต โดยตัวแปรที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบได้แก่ 1) ความลึกคาดหวัง (Expected depth) คือความลึกที่คาดหวังว่าจะสามารถวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนได้ใกล้เคียงกับผลเปรียบเทียบซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3) 2) ความลึกไม่แน่นอน (Uncertainty depth) คือความลึกระดับสุดท้ายที่สามารถวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินได้ใกล้เคียงกับผลเปรียบเทียบ และ 3) ฟังก์ชันการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนแบบค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ตามสมการที่ (3.3)

$$Expected\ depth = \frac{\lambda_{max}}{3} \tag{3.3}$$

โดยที่ λ_{max} คือความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถตรวจวัดได้ในหน่วย เมตร ซึ่งคำนวณได้ความเร็วเฟส $C(f_{min})$ ในหน่วยเมตรต่อวินาทีที่ความถี่ต่ำที่สุดที่สามารถตรวจวัดได้

3.6.2 การวิเคราะห์ผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินด้วยโปรแกรม Dinver

Dinver เป็นชุดโครงสร้างโปรแกรม (framework) สำหรับการแก้ปัญหาการคำนวณย้อนกลับด้วยการจำลองมอนติคาร์โล (Monte Carlo simulation) และ อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุด (Neighbor Algorithm) ซึ่งอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดสำหรับการคำนวณย้อนกลับของการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนถูกพัฒนาโดย (Sambridge, 1999b) และ (Sambridge, 1999a)

โดยในงานวิจัยนี้ใช้ชุดโปรแกรม Dinver ทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินซึ่งขอบเขตตัวแปรสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมถูกแบ่งออกเป็น 2 ขอบเขตตัวแปรตามพื้นที่ตรวจวัดภาคสนามซึ่งคล้ายคลึงกับตัวแปรที่ใช้ในการสร้างชุดข้อมูลสำหรับฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมในหัวข้อที่ 3.3.1 โดยขอบเขตตัวแปร A_Dinver ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ขอบเขตตัวแปร B_Dinver ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล และโครงการ บางบอน 5 ซึ่งขอบเขตตัวแปร A_Dinver และ B_Dinver แสดงดังตารางที่ 3.10 และตารางที่ 3.11 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.10 ขอบเขตตัวแปร A_Dinver

Layer	Bottom depth (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Density (t/m3)	Poisson’s ratio
1	1~30	80~360	160~1400	1600~1800	0.2~0.5
2	1~30	80~360	160~1400	1600~1800	0.2~0.5
3	1~30	80~360	160~1400	1600~1800	0.2~0.5
4	1~30	80~360	160~1400	1600~1800	0.2~0.5
5	1~30	80~360	160~1400	1600~1800	0.2~0.5
6	1~30	80~360	160~1400	1600~1800	0.2~0.5
7	1~30	80~360	160~1400	1600~1800	0.2~0.5
8	1~30	80~360	160~1400	1600~1800	0.2~0.5
9	1~30	80~360	160~1400	1600~1800	0.2~0.5
10	1~30	80~360	160~1400	1600~1800	0.2~0.5
11	Half space	240~720	480~2500	1600~1800	0.2~0.5

ตารางที่ 3.11 ขอบเขตตัวแปร B_Dinver

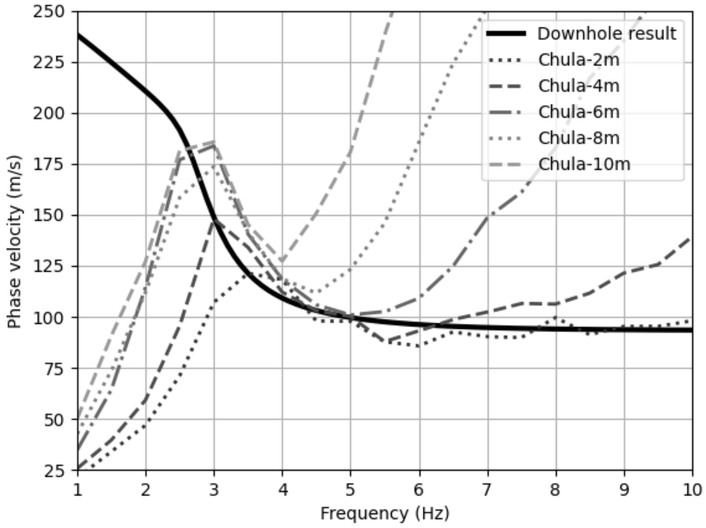
Layer	Bottom depth (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Density (t/m3)	Poisson's ratio
1	1~30	50~360	100~1400	1600~1800	0.2~0.5
2	1~30	50~360	100~1400	1600~1800	0.2~0.5
3	1~30	50~360	100~1400	1600~1800	0.2~0.5
4	1~30	50~360	100~1400	1600~1800	0.2~0.5
5	1~30	50~360	100~1400	1600~1800	0.2~0.5
6	1~30	50~360	100~1400	1600~1800	0.2~0.5
7	1~30	50~360	100~1400	1600~1800	0.2~0.5
8	1~30	50~360	100~1400	1600~1800	0.2~0.5
9	1~30	50~360	100~1400	1600~1800	0.2~0.5
10	1~30	50~360	100~1400	1600~1800	0.2~0.5
11	Half space	240~740	400~2500	1600~1800	0.2~0.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
อภิปรายผลการทดสอบ

4.1 เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามด้วยอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้

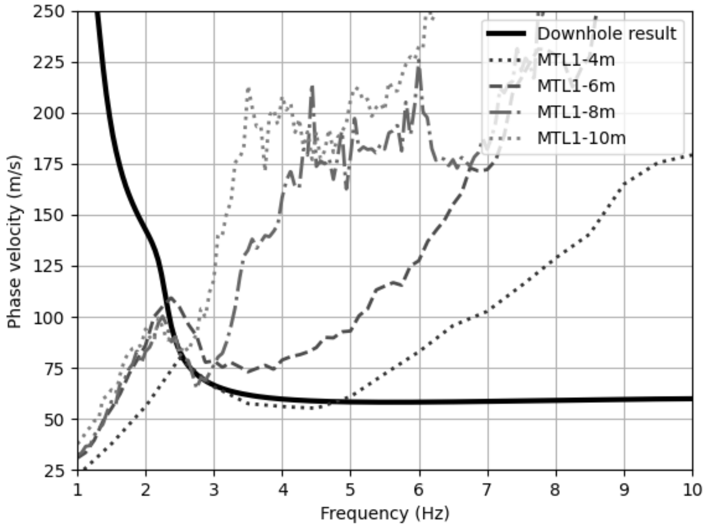
4.1.1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



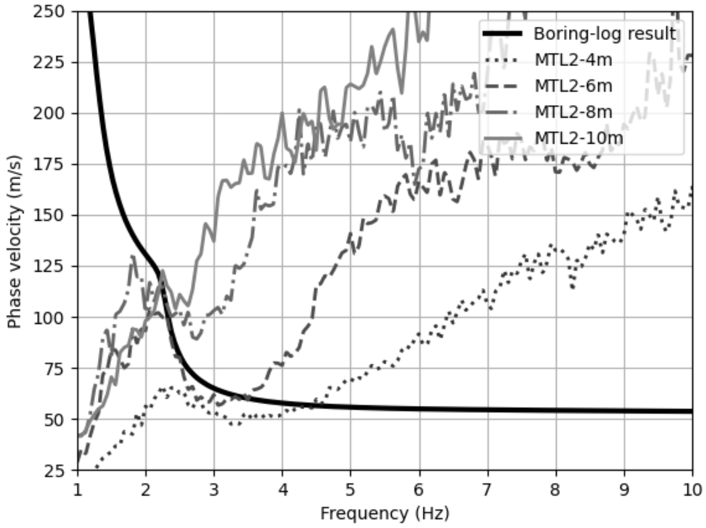
รูปที่ 4.1 เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เปรียบเทียบกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.2 แลนด์ แอนด์ เฮ้าส์ โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล

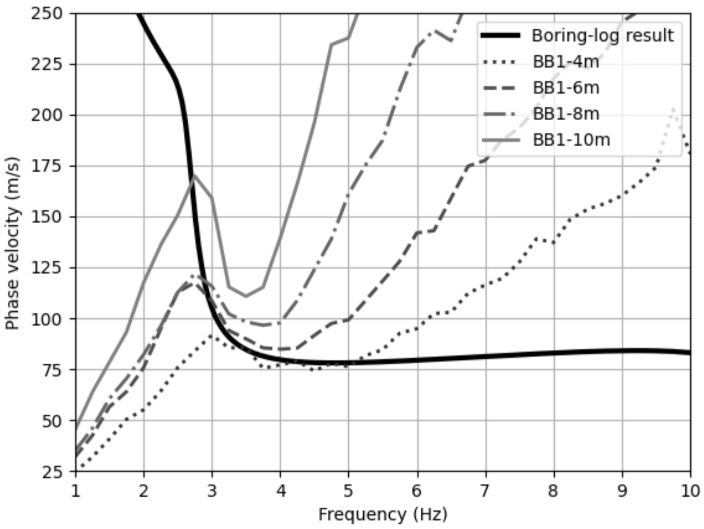


รูปที่ 4.2 เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 1 เปรียบเทียบกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากผลเจาะสำรวจชั้นดิน

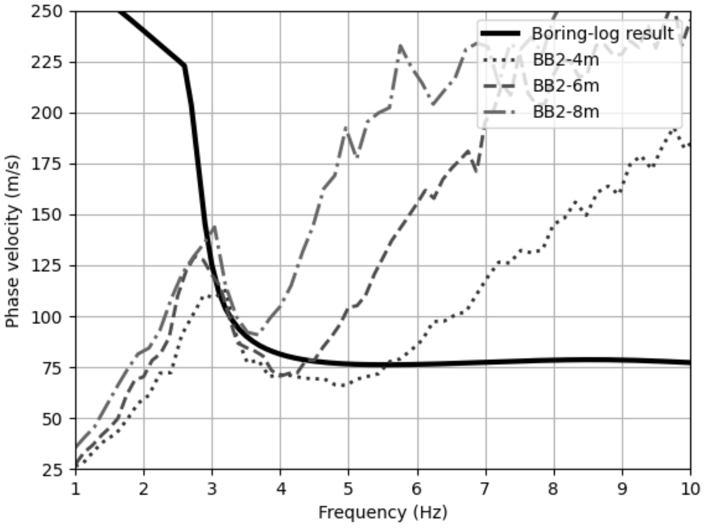


รูปที่ 4.3 เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 2 เปรียบเทียบกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากผลเจาะสำรวจชั้นดิน

4.1.3 แลนด์ แอนด์ เฮ้าส์ โครงการ บางบอน 5



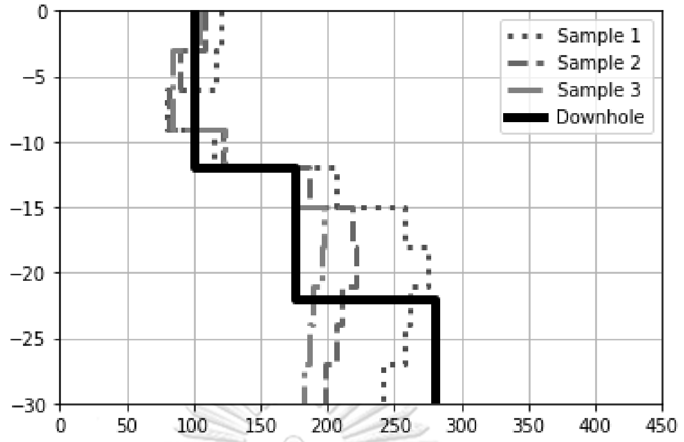
รูปที่ 4.4 เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามในพื้นที่โครงการบางบอน 5 จุดที่ 1 เปรียบเทียบกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากผลเจาะสำรวจชั้นดิน



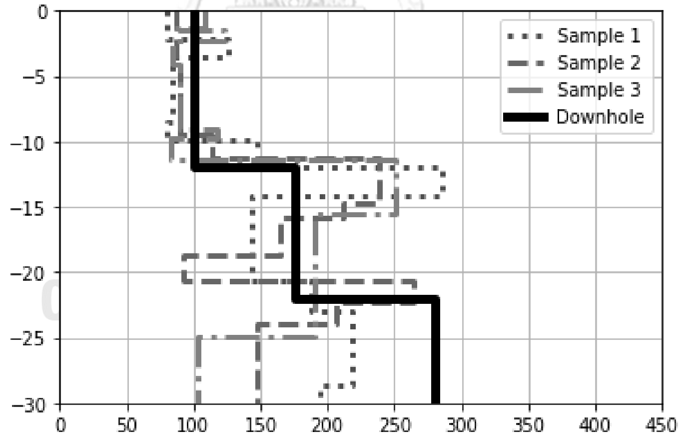
รูปที่ 4.5 เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 เปรียบเทียบกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากผลเจาะสำรวจชั้นดิน

4.2 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้

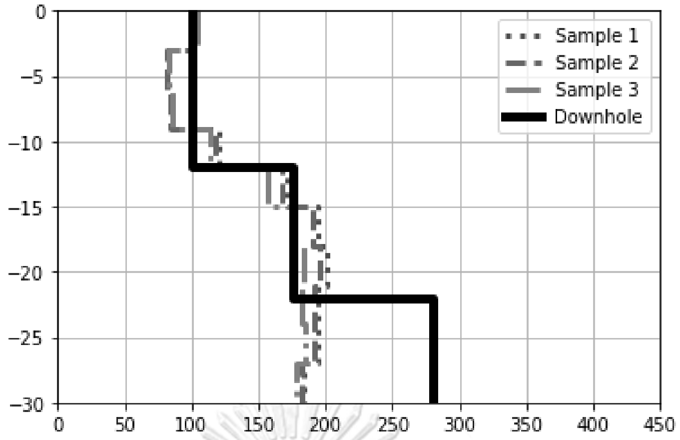
4.2.1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



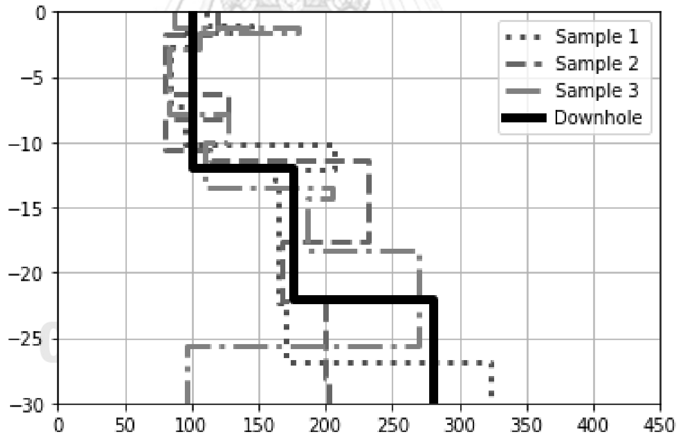
รูปที่ 4.6 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 2 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล



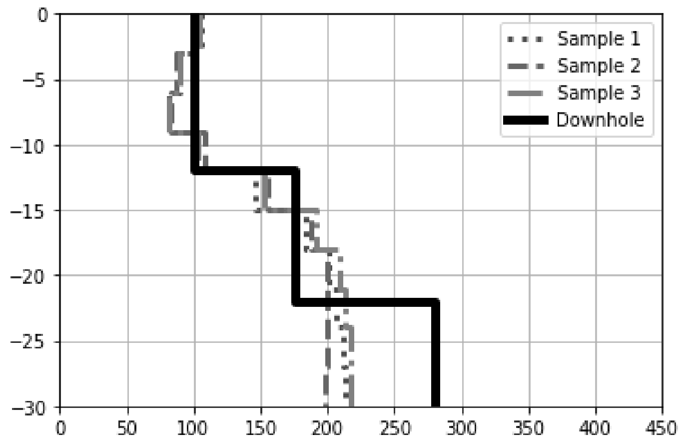
รูปที่ 4.7 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 2 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล



รูปที่ 4.8 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล



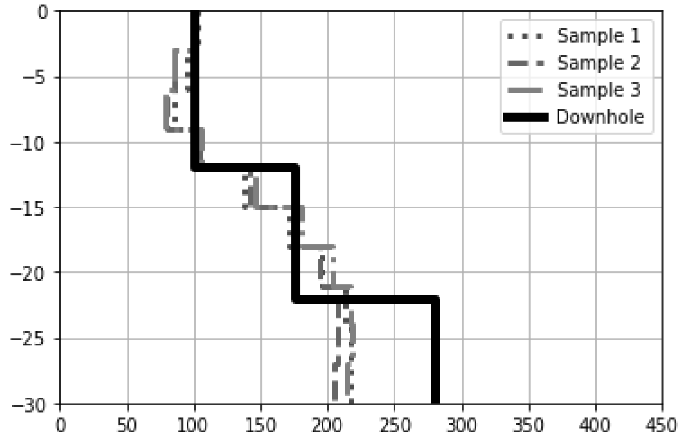
รูปที่ 4.9 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล



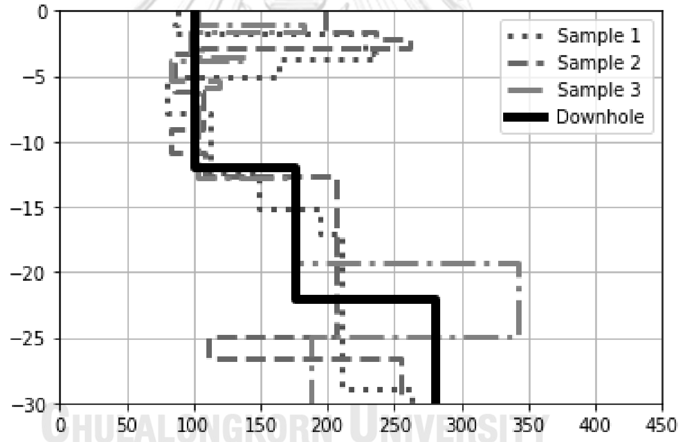
รูปที่ 4.10 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 6 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล

Chulalongkorn University

รูปที่ 4.11 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 6 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล

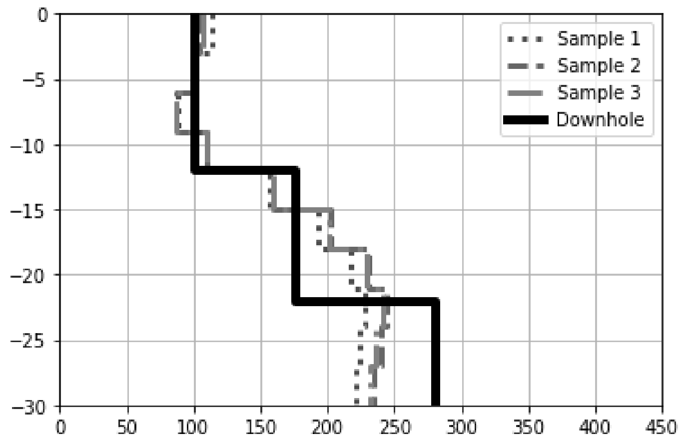


รูปที่ 4.12 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 8 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล

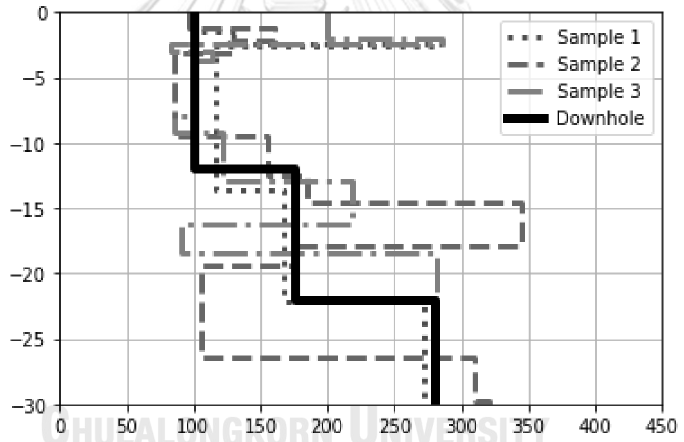


Chulalongkorn University

รูปที่ 4.13 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 8 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล



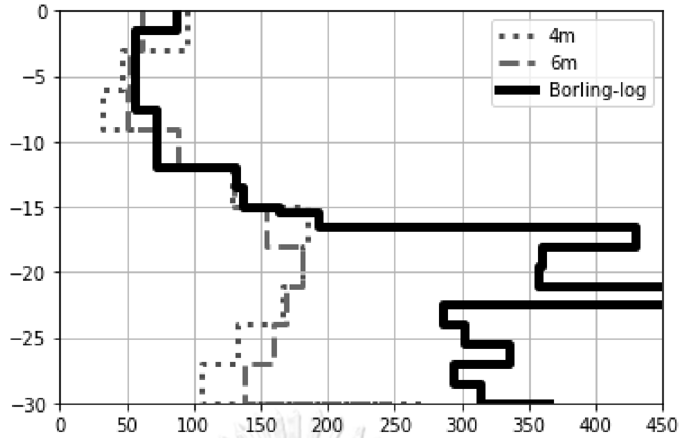
รูปที่ 4.14 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 10 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล



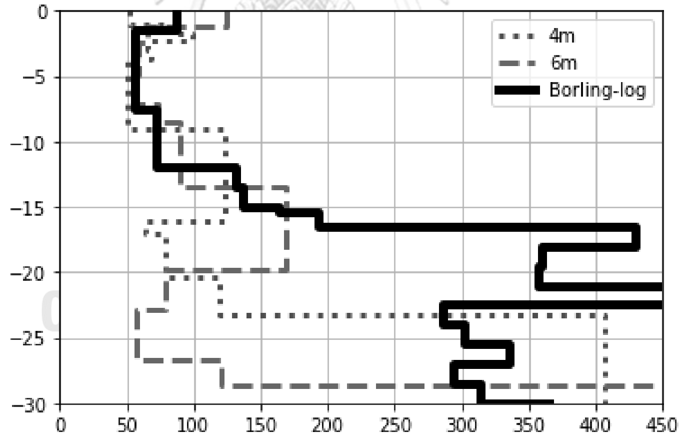
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.15 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 10 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทดสอบดาวน์โฮล

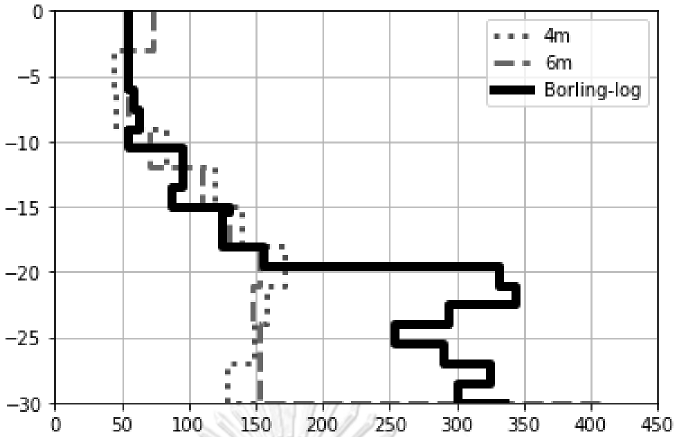
4.2.2 โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล



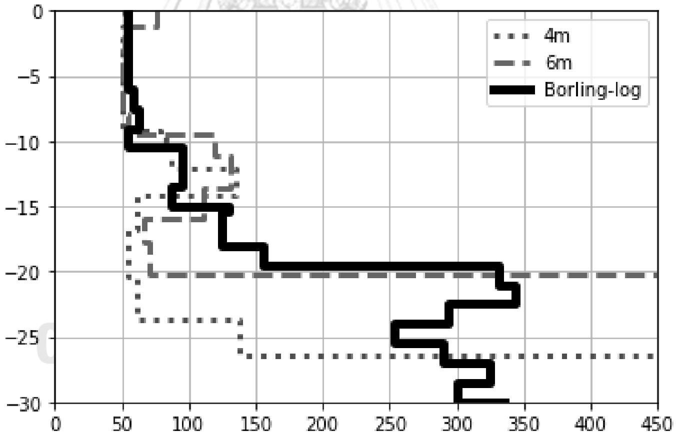
รูปที่ 4.16 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 1 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4 และ 6 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน



รูปที่ 4.17 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 1 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4 และ 6 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน

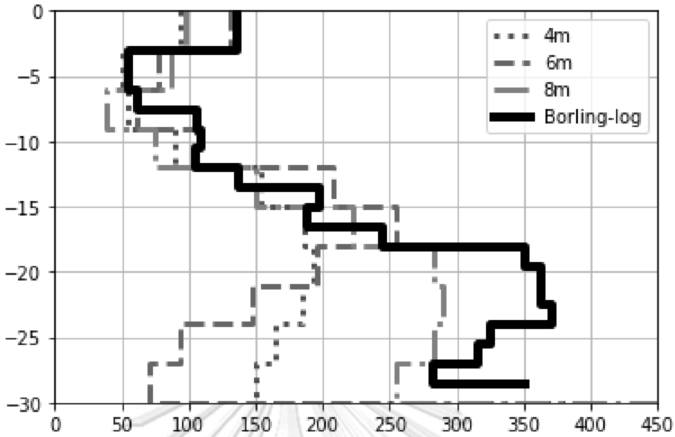


รูปที่ 4.18 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ริมทะเล จุดที่ 2 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4 และ 6 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน

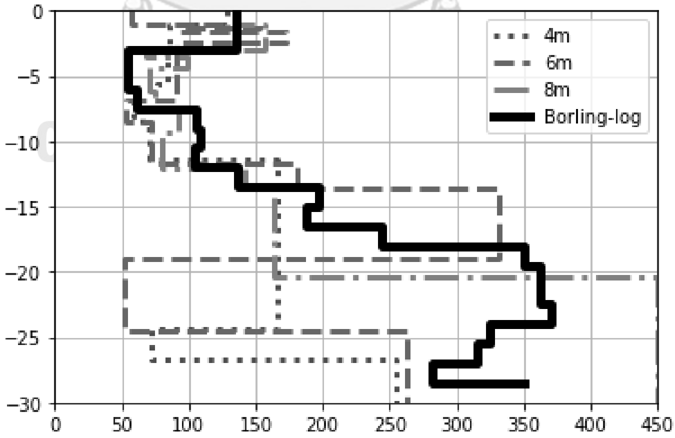


รูปที่ 4.19 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ริมทะเล จุดที่ 2 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4 และ 6 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน

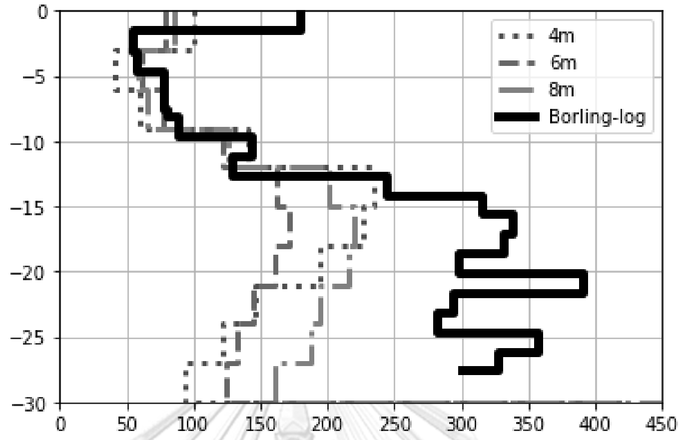
4.2.2 โครงการ บางบอน 5



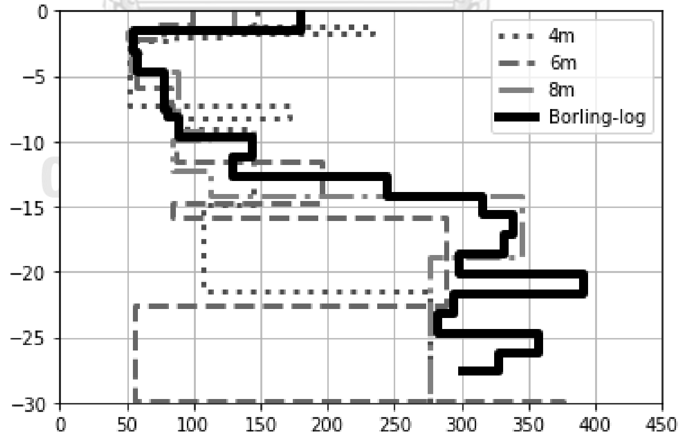
รูปที่ 4.20 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4, 6 และ 8 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน



รูปที่ 4.21 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4, 6 และ 8 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน



รูปที่ 4.22 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4, 6 และ 8 เมตร ด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน



รูปที่ 4.23 ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจากผลการตรวจวัดเส้นโค้งการกระจายตัวในพื้นที่โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4, 6 และ 8 เมตร ด้วยชุดโปรแกรม Dinver ซึ่งเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจดิน

4.3 การสรุปผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน

4.3.1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ตารางสรุปผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการตรวจวัดในพื้นที่จุฬาลงกรณ
มหาวิทยาลัย

Site	Radius (m)	Sample Number	Expected depth (m)	Loss (%) at Expected depth		Uncertainty depth (m)		Loss (%) at Uncertainty depth	
				ANN	DINVER	ANN	DINVER	ANN	DINVER
Chulalongkorn University	2	1	13.02	25.09	27.76	15	12	18.31	24.80
		2	11.88	14.93	20.59	22	12	16.88	23.94
		3	11.54	11.84	23.99	22	12	11.90	21.45
	4	1	19.12	11.66	19.73	22	18	11.91	17.73
		2	17.63	11.16	28.54	22	18	11.28	23.00
		3	16.43	10.80	17.96	22	18	9.34	17.4
	6	1	19.29	9.88	20.53	22	18	10.90	12.62
		2	18.96	9.96	22.41	22	18	10.73	19.69
		3	20.41	10.95	6.70	22	18	11.93	6.35
	8	1	18.39	8.16	30.51	22	22	9.44	29.35
		2	18.52	9.87	31.80	22	18	10.73	29.03
		3	19.28	10.96	9.54	22	19	12.04	8.25
	10	1	20.14	11.42	14.81	18	30	10.04	10.39
		2	20.52	11.62	34.88	18	14	8.79	23.66
		3	20.63	12.00	35.74	18	19	9.34	29.68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.2 โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ริมทะเล และ โครงการ บางบอน 5

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการตรวจวัดในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ริมทะเล (MTL) และ โครงการ บางบอน 5 (BB)

Site	Position	Radius (m)	Expected depth (m)	Loss (%) at Expected depth		Uncertainty depth (m)		Loss (%) at Uncertainty depth	
				ANN	DINVER	ANN	DINVER	ANN	DINVER
MTL	1	4	10.63	29.76	30.68	16	9	20.71	23.25
		6	14.00	14.99	18.01	15	15	14.49	18.09
	2	4	8.82	15.38	11.49	19	12	19.70	15.46
		6	12.07	18.74	25.37	19	15	15.84	26.42
BB	1	4	10.18	22.25	33.81	16	16	18.80	30.43
		6	14.381	20.30	45.42	18	14	20.15	44.17
		8	12.85	40.22	22.09	18	14	33.04	21.27
	2	4	11.59	37.27	37.27	14	13	35.31	35.34
		6	12.71	21.60	23.01	13	23	21.96	23.17
		8	15.06	26.39	21.83	13	25	25.99	17.28

4.4 การอภิปรายผลการทดสอบ

4.4.1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- เส้นโค้งการกระจายตัว

เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยมีความใกล้เคียงกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากการแปลงผลสำรวจชั้นดินด้วยวิธีทดสอบดาวน์โฮลน์ โดยเส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดในทุกรัศมีซึ่งได้แก่ 2, 4, 6, 8 และ 10 เมตร มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งการตรวจวัดคลื่นโดยใช้รัศมีที่แคบอย่าง 2 เมตร จะสามารถตรวจวัดคลื่นผิวดินในช่วงความถี่ระหว่าง 3.5 – 10 เฮิรตซ์ ในขณะที่การตรวจวัดโดยวงรัศมีที่กว้างกว่าอย่าง 4, 6, 8 และ 10 เมตร จะสามารถตรวจวัดคลื่นผิวดินในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าได้แต่เนื่องจากจีโอโฟนไม่สามารถที่จะตอบสนองต่อความถี่ที่ต่ำได้จึงทำให้การตรวจวัดในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 4 และ 6 เมตร สามารถที่จะตรวจวัดคลื่นผิวดินในช่วงความถี่ที่กว้างที่สุด

- ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายเส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดโดยใช้รัศมีที่ 2, 4, 6 และ 8 เมตร พบว่ามีความใกล้เคียงกับความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากวิธีดาวน์โฮลในช่วงความลึกตั้งแต่ผิวดิน ไปจนถึง 22 เมตร ในขณะที่เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดโดยใช้รัศมีที่กว้างกว่าอย่าง 10 เมตร โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมสามารถที่จะทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินได้ใกล้เคียงกับวิธีดาวน์โฮลในระดับความลึกไม่เกิน 18 เมตร เนื่องจากการใช้รัศมีทีกว้างมากเกินไปซึ่งไม่สอดคล้องกับการตอบสนองต่อช่วงความถี่ต่ำของจีโอโฟนจึงทำให้จุดสูงสุดของเส้นโค้งการกระจายตัวซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ระหว่าง 2.4 - 3 เฮิรตซ์ นั้นมีความคลาดเคลื่อน

- ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยชุดโปรแกรม Dinver

ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยชุดโปรแกรม Dinver สังเกตได้ว่าในช่วงรัศมีที่แคบอย่าง 2 เมตร ชุดโปรแกรม Dinver สามารถวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินได้ใกล้เคียงกับวิธีทดสอบดาวน์โฮลในระดับความลึกถึง 12 เมตร ในขณะที่รัศมีที่กว้างกว่าอย่าง 4, 6, 8 และ 10 เมตร ชุดโปรแกรม Dinver สามารถวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินได้ใกล้เคียงกับวิธีทดสอบดาวน์โฮลในช่วงระดับความลึก 18 - 20 เมตร แต่ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในช่วงระดับตื้นมีความคลาดเคลื่อนที่สูงโดยเฉพาะรัศมีที่กว้างอย่าง 8 และ 10 เมตร เนื่องจากการใช้รัศมีที่กว้างจะไม่สามารถตรวจวัดคลื่นที่มีความยาวคลื่นที่สั้นได้จากผลกระทบของความไม่ชัดเจนเชิงพื้นที่ซึ่งจะสังเกตุได้ว่าการคำนวณย้อนกลับด้วยชุดโปรแกรม Dinver สามารถวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในระดับความลึกที่ใกล้เคียงกับความลึกคาดหวัง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4.2 โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 1

- เส้นโค้งการกระจายตัว

เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 1 โดยใช้รัศมีการตรวจวัด 4, 6, 8 และ 10 เมตร นั้นมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากการแปลงผลการเจาะสำรวจ แต่การตรวจวัดโดยใช้รัศมี 6 เมตรนั้นมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ซึ่งจะสังเกตุได้ว่าชั้นดินของโครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล นั้นเป็นดินที่ค่อนข้างอ่อนจึงทำให้รัศมีการตรวจวัดที่กว้างอย่าง 8 และ 10 เมตร นั้นได้รับผลกระทบจากทั้งช่วงความถี่ที่ต่ำซึ่งจีโอโฟนไม่สามารถที่จะตอบสนองได้ และ ช่วงความถี่ที่สูงซึ่งเกิดความไม่ชัดเจนเชิงพื้นที่ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำนาย ในงานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวด้วยรัศมีที่ 4 และ 6 เมตร เท่านั้น

- ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายเส้นโค้งการกระจายตัวในรัศมีที่ 4 และ 6 เมตร พบว่ามีความใกล้เคียงกับผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการแปลงผลการเจาะสำรวจ ในขณะที่ความลึกตั้งแต่ 16 เมตร ลงไปชั้นดินเปลี่ยนเป็นดินแข็งซึ่งต้องอาศัยจีโอโฟนที่สามารถตอบสนองช่วงความถี่ต่ำกว่าจึงทำให้โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมไม่สามารถที่จะทำนายได้

- ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยชุดโปรแกรม Dinver

ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยชุดโปรแกรม Dinver ในรัศมีที่แคบกว่าอย่าง 4 เมตร ชุดโปรแกรม Dinver สามารถที่จะวิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการแปลงผลการเจาะสำรวจถึงระดับความลึก 9 เมตร ในขณะที่รัศมีที่กว้างกว่าอย่าง 6 เมตร ชุดโปรแกรม Dinver สามารถที่จะทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินได้ใกล้เคียงกับผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการแปลงผลการเจาะสำรวจถึงระดับความลึก 15 เมตร ซึ่งจะสังเกตุได้ว่าการคำนวณย้อนกลับด้วยชุดโปรแกรม Dinver สามารถวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในระดับความลึกที่ใกล้เคียงกับความลึกคาดหวัง

4.4.3 โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 2

- เส้นโค้งการกระจายตัว

เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามในพื้นที่โครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 2 โดยใช้รัศมีการตรวจวัด 4, 6, 8 และ 10 เมตร นั้นมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากการแปลงผลการเจาะสำรวจ โดยที่การตรวจวัดในรัศมีที่ 6 เมตร มีความเหมาะสมและ ใกล้เคียงเส้นโค้งการกระจายตัวจากการแปลงผลเจาะสำรวจดินมากที่สุดเนื่องจากที่รัศมีแคบกว่าอย่าง 4 เมตร ไม่สามารถที่จะตรวจวัดคลื่นผิวดินในช่วงความถี่ที่ต่ำได้ ในขณะที่รัศมีที่กว้างกว่าอย่าง 8 และ 10 เมตร เส้นโค้งการกระจายตัวในช่วงความถี่สูงจะถูกยกตัวขึ้นเนื่องจากรัศมีที่กว้างไม่สอดคล้องกับความยาวคลื่นที่สั้นซึ่งจะพบได้ในดินที่อ่อน หรือ มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ต่ำเช่นเดียวกับ จุดที่ 1 ในงานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวด้วยรัศมีที่ 4 และ 6 เมตร เท่านั้น

- ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายเส้นโค้งการกระจายตัวในรัศมีที่ 4 และ 6 เมตร พบว่ามีความใกล้เคียงกับผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการแปลงผลการเจาะสำรวจจนถึงระดับความลึกที่ 19 เมตร ซึ่งเป็นระดับความลึกที่ดินมีการเปลี่ยนแปลงชั้นดินอย่างชัดเจน

- ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยชุดโปรแกรม Dinver

ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยชุดโปรแกรม Dinver ในรัศมีที่แคบกว่าอย่าง 4 เมตร นั้นจะสามารถวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินได้ใกล้เคียงกับผลการแปลงจากการเจาะสำรวจดินที่ความลึก 12 เมตร ในขณะที่รัศมีการตรวจวัดที่กว้างกว่าอย่าง 6 เมตร ชุดโปรแกรม Dinver สามารถที่จะวิเคราะห์ชั้นดินได้ไกลเคียงกับผลการแปลงจากการเจาะสำรวจดินที่ความลึก 15 เมตร

4.4.4 โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1

- เส้นโค้งการกระจายตัว

เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามในโครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4, 6, 8 และ 10 เมตร นั้นมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากการแปลงผลการเจาะสำรวจโดยเฉพาะการตรวจวัดด้วยรัศมี 6 และ 8 เมตร โดยการตรวจวัดด้วยรัศมีที่แคบกว่าอย่าง 4 เมตร ในช่วงความถี่ต่ำนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในขณะที่รัศมีที่กว้างกว่าอย่าง 10 เมตร เส้นโค้งการกระจายมีความคลาดเคลื่อนที่สูงซึ่งการใช้รัศมีที่กว้างอย่าง 10เมตร นั้นไม้หมาะสำหรับการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กในพื้นที่ดินอ่อนโดยในงานวิจัยนี้จึงได้ทำนายและ วิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวด้วยรัศมีที่ 4, 6 และ 8 เมตร เท่านั้น

- ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายเส้นโค้งการกระจายตัวโดยใช้รัศมี 4, 6 และ 8 เมตร มีแนวโน้มใกล้เคียงกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจชั้นดินไปจนถึงระดับความลึก 18 เมตร ซึ่งเป็นระดับความลึกที่ชั้นดินมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชั้นเจนโดยเฉพาะผลการทำนายเส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดโดยใช้รัศมี 8 เมตร ที่โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมพยายามที่จะคาดเดาความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในระดับที่ลึกกว่า 18 เมตร

- ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยชุดโปรแกรม Dinver

ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยชุดโปรแกรม Dinver จากเส้นโค้งการกระจายตัวที่ตรวจวัดโดยใช้รัศมีที่ 4, 6 และ 8 เมตร นั้นสามารถวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินได้ใกล้เคียงกับผลการแปลงจากการเจาะสำรวจดินที่ความลึก 12 เมตร เท่ากันทั้ง 3 รัศมี

4.4.5 โครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2

- เส้นโค้งการกระจายตัว

เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดภาคสนามในโครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 โดยใช้รัศมีการตรวจวัดที่ 4, 6 และ 8 เมตร นั้นใกล้เคียงกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากการแปลงผลการเจาะสำรวจโดยที่ในช่วงรัศมี 4 และ 6 เมตร ในช่วงความถี่สูงตั้งแต่ 3.5 เฮิรตซ์ นั้นมีความคลาดเคลื่อนจากการแปลงผลการเจาะสำรวจเล็กน้อย

- ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายด้วยโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการทำนายเส้นโค้งการกระจายตัวโดยใช้รัศมี 4, 6 และ 8 เมตร มีแนวโน้มใกล้เคียงกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจชั้นดินไปจนถึงระดับความลึก 13 เมตร ซึ่งเป็นระดับความลึกที่ชั้นดินมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชั้นเจน

- ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยชุดโปรแกรม Dinver

ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินจากการคำนวณย้อนกลับด้วยชุดโปรแกรม Dinver จากเส้นโค้งการกระจายตัวที่ตรวจวัดโดยใช้รัศมีที่แคบกว่าอย่าง 4 เมตร ชุดโปรแกรม Dinver สามารถวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวได้ใกล้เคียงกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจชั้นดินถึงระดับความลึก 13 เมตร ในขณะที่รัศมีที่กว้างกว่าอย่าง 6 และ 8 เมตร เมตร ชุดโปรแกรม Dinver สามารถวิเคราะห์เส้นโค้งการกระจายตัวได้ใกล้เคียงกับความเร็วคลื่นเฉือนจากการแปลงผลเจาะสำรวจชั้นดินถึงระดับความลึก 23 และ 25 เมตร ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5 การทดสอบคุณภาพสัญญาณคลื่นผิวดิน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบคุณภาพของสัญญาณที่อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้สามารถที่จะตรวจวัดได้เปรียบเทียบกับชุดอุปกรณ์ในเชิงพาณิชย์ซึ่งประกอบไปด้วยโมดูลตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือน และ เสียง National Instrument NI-9234 และ ชุดควบคุม National Instrument cRIO-9063 ทำการเปรียบเทียบโดยใช้เส้นโค้งการกระจายตัวจากวิธี Power of Phase จากข้อมูลรูปคลื่นที่ถูกตรวจวัดในแต่ละอุปกรณ์ และ พิจารณาสาเหตุของความคลาดเคลื่อนจากรูปคลื่น โดยที่ Dispersion curve integrity คือ ความสมบูรณ์ของเส้นโค้งการกระจายตัวในขณะที่ Cause คือสาเหตุที่เส้นโค้งการกระจายตัวเกิดความไม่สมบูรณ์ซึ่งพิจารณาจากรูปคลื่น โดยผลสรุปคุณภาพของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในพื้นที่จังหวัดโคราช และ จังหวัดชลบุรี แสดงดังตารางที่ 4.3 ผลสรุปคุณภาพของสัญญาณคลื่นผิวดินที่ตรวจวัดในพื้นที่จังหวัดโคราช และ ตารางที่ 4.4 ผลสรุปคุณภาพของสัญญาณคลื่นผิวดินที่ตรวจวัดในพื้นที่จังหวัดชลบุรี ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ผลสรุปคุณภาพของสัญญาณคลื่นผิวดินที่ตรวจวัดในพื้นที่จังหวัดโคราช

Site	Position	Device	Sample	Dispersion curve integrity	Cause	Reference	Usable sample (%)
Korat	1	NI	Korat 1-1	✓	-	รูปที่ 6.26	100.00
			Korat 1-2	✓	-	รูปที่ 6.27	
		Raspberry Pi	Korat 1-1	×	Noise	รูปที่ 6.32 รูปที่ 6.28	42.85
			Korat 1-2	×	Noise	รูปที่ 6.33	
			Korat 1-3	×	Noise	รูปที่ 6.34	
			Korat 1-4	×	Noise	รูปที่ 6.35	
			Korat 1-5	✓	-	รูปที่ 6.36	
			Korat 1-6	✓	-	รูปที่ 6.37	
			Korat 1-7	✓	-	รูปที่ 6.38	
	2	Ni	Korat 2-1	✓	-	รูปที่ 6.28	100.00
			Korat 2-2	✓	-	รูปที่ 6.30	
		Raspberry Pi	Korat 2-1	×	Noise	รูปที่ 6.39	25.00
			Korat 2-2	×	Noise	รูปที่ 6.40	
			Korat 2-3	×	Noise	รูปที่ 6.41	
			Korat 2-4	✓	-	รูปที่ 6.42	
	3	Ni	Korat 3-1	✓	-	รูปที่ 6.30	100.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

			Korat 3-2	✓	-	รูปที่ 6.31	
		Raspberry Pi	Korat 3-1	✗	Sensor 2 improper installation	รูปที่ 6.43	
			Korat 3-2	✗	Sensor 2 improper installation	รูปที่ 6.44	0.00
			Korat 3-3	✗	Sensor 2 improper installation	รูปที่ 6.45	

ตารางที่ 4.4 ผลสรุปคุณภาพของสัญญาณคลื่นผิวดินที่ตรวจวัดในพื้นที่จังหวัดชลบุรี

Site	Position	Device	Sample	Dispersion curve integrity	Cause	Reference	Usable sample (%)
Chonburi	BH 3	NI	BH 3-1	✓	-	รูปที่ 6.46	100.00
			BH 3-2	✓	-	รูปที่ 6.47	
		Raspberry Pi	BH 3-1	✗	Noise	รูปที่ 6.52	0.00
			BH 3-2	✗	Noise	รูปที่ 6.53	
			BH 3-3	✗	Noise	รูปที่ 6.54	
			BH 3-4	✗	Noise	รูปที่ 6.55	
	BH 13	NI	BH 13-1	✓	-	รูปที่ 6.48	100.00
			BH 13-2	✓	-	รูปที่ 6.49	
		Raspberry Pi	BH 13-1	✓	-	รูปที่ 6.56	100.00
			BH 13-2	✓	-	รูปที่ 6.57	
			BH 13-3	✓	-	รูปที่ 6.58	
	BH 15	NI	BH 15-1	✓	-	รูปที่ 6.50	100.00
		Raspberry Pi	BH 15-1	✓	-	รูปที่ 6.59	100.00
			BH 15-2	✓	-	รูปที่ 6.60	
			BH 15-3	✓	-	รูปที่ 6.61	
			BH 15-4	✓	-	รูปที่ 6.62	
	HUAYYAI	NI	HUAYYAI 1	✓	-	รูปที่ 6.51	100.00
		Raspberry Pi	HUAYYAI 1	✓	-	รูปที่ 6.63	100.00
			HUAYYAI 2	✓	-	รูปที่ 6.64	

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ซึ่งจะสังเกตได้ว่าชุดอุปกรณ์ในเชิงพาณิชย์อย่าง NI-9234 สามารถที่จะตรวจวัดสัญญาณรูปคลื่นผิวดินได้อย่างสมบูรณ์แบบในขณะที่อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นผิวดินซึ่งถูกพัฒนางานวิจัยนี้ไม่

สามารถที่จะตรวจวัดสัญญาณรูปคลื่นได้ในทุกครั้งซึ่งสาเหตุหลักที่เกิดขึ้นได้แก่สัญญาณรบกวน (Noise) ซึ่งสามารถที่จะสังเกตได้จากรูปคลื่นที่มีเส้นตรงแนวตั้งในขณะที่รูปคลื่นที่มีลักษณะ Baseline ไม่เป็นเส้นตรงเกิดจากการสายไฟเชื่อมต่อกับจีโอโฟนไม่ครบวงจรซึ่งเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถคำนวณเส้นโค้งการกระจายตัวได้ถูกต้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

วิธีการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็ก (Microtremor) เป็นวิธีการตรวจวัดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของชั้นดินผ่านการเคลื่อนที่ของคลื่นผิวดินที่กำเนิดจากสภาพแวดล้อม (Ambient noise) ทั้งจากปรากฏการทางธรรมชาติ และ ที่มนุษย์สร้างขึ้น ซึ่งข้อดีของวิธีการตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนขนาดเล็กนั้น คือ สามารถทำการตรวจวัดได้ง่าย รวดเร็ว ไม่จำเป็นต้องมีแหล่งกำเนิดคลื่น รวมถึงไม่จำเป็นต้องทำการเจาะหลุมสำรวจเหมือน วิธีทดสอบดาวน์โฮล และ วิธีทดสอบครอสโฮล ซึ่งทำให้วิธีการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กมีราคาที่ถูก สามารถที่จะทำการตรวจวัดคลื่นผิวดินในพื้นที่ที่เข้าถึงยาก ซึ่งข้อดีที่กล่าวมานั้นทำให้วิธีการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กเหมาะสำหรับการตรวจวัดเพื่อสำรวจแนวโน้มของชั้นดินในพื้นที่ขนาดใหญ่ แต่เนื่องจากชุดอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนในเชิงพาณิชย์อย่างโมดูลตรวจวัดคลื่น และ เครื่องบันทึกข้อมูลแบบอิเล็กทรอนิกซ์นั้นมีราคาที่สูงจึงทำให้บริษัท และ ศูนย์วิจัยขนาดเล็กนั้นไม่สามารถที่จะจัดหาอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนที่ทันสมัย หรือ มีจำนวนที่เพียงพอได้

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบ และ ประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กซึ่งใช้ไมโครคอมพิวเตอร์อย่างราสเบอร์รี่พาย 3 บี เป็นส่วนประมวลผลกลางซึ่งพบว่าอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนในงานวิจัยนี้สามารถที่จะคำนวณเส้นโค้งการกระจายตัวได้ใกล้เคียงกับเส้นโค้งการกระจายตัวจากวิธีการสำรวจชั้นดินที่ใช้กันโดยทั่วไปอย่าง วิธีทดสอบดาวน์โฮล และ วิธีเจาะสำรวจดินในพื้นที่กรุงเทพมหานครโดยที่ต้นทุนของอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กในงานวิจัยนี้มีราคาที่ต่ำกว่า 5,000 บาท ซึ่งจะทำให้บริษัท หรือ ศูนย์วิจัยขนาดเล็กนั้นสามารถที่จะประหยัดงบประมาณลงได้ ซึ่งปัญหาต่อมาก็คือการวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินนั้นจำเป็นที่จะต้องคำนวณย้อนกลับซึ่งวิธีการคำนวณย้อนกลับที่ใช้โดยทั่วไปอย่าง ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดผ่านการวนซ้ำ (Iterative method) นั้นใช้ระยะเวลา และ ทรัพยากรในการคำนวณที่สูงซึ่งไม่เหมาะกับอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนในเชิงพาณิชย์จึงทำให้การคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีทั่วไปนั้นจำเป็นที่จะต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณสูง ทำให้การวิเคราะห์ความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในพื้นที่ทดสอบนั้นมีความยุ่งยาก

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning, DL) อย่างโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) มาใช้สำหรับการคำนวณย้อนกลับทำให้อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนในงานวิจัยนี้สามารถที่จะทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินได้ภายในไม่

ถึง 1 นาที หลังจากการคำนวณเส้นโค้งการกระจายตัวซึ่งทำให้อุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนขนาดเล็กที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้สามารถที่จะทำนายความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินได้ภายในพื้นที่ตรวจวัด โดยการเปรียบเทียบผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินระหว่างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ และ ชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร พบว่าโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมมักจะสามารถทำนายผลความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินได้ลึก และ แม่นยำมากกว่าชุดโปรแกรม Dinver เมื่อเปรียบเทียบกับผลความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีดาวน์โฮล และ การแปลงผลเจาะสำรวจดินเนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมสามารถที่จะเรียนรู้แนวโน้มของความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในระดับที่ลึกกว่าความลึกประสิทธิผลได้ แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านพื้นที่ในการตรวจวัด และ การตอบสนองต่อช่วงความถี่ต่ำของจีโอโฟนจึงทำให้คลื่นผิวดินที่ตรวจวัดได้ไม่ครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต่ำการใช้จีโอโฟนที่ตอบสนองต่อความถี่ในช่วงที่เหมาะสม และ การใช้รัศมีที่สอดคล้องกับความถี่ที่สามารถตรวจวัดได้จะสามารถทำให้เส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดนั้นมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

โดยข้อจำกัดของอุปกรณ์ตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนในงานวิจัยนี้คืออ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวนซึ่งอาจจะทำให้ไม่สามารถที่จะคำนวณเส้นโค้งการกระจายตัวได้สมบูรณ์ จึงทำให้ผู้ใช้งานจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบความสมบูรณ์ของเส้นโค้งการกระจายตัวรวมถึงรูปคลื่นเพื่อคาดการณ์สาเหตุที่ทำให้เส้นโค้งการกระจายตัวไม่สมบูรณ์จึงทำให้การตรวจวัดคลื่นผิวดินในแต่ละจุดตรวจวัดจะต้องทำการตรวจวัดหลายรอบซึ่งอาจจะทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการตรวจวัดคลื่นไหวสะเทือนมากยิ่งขึ้น

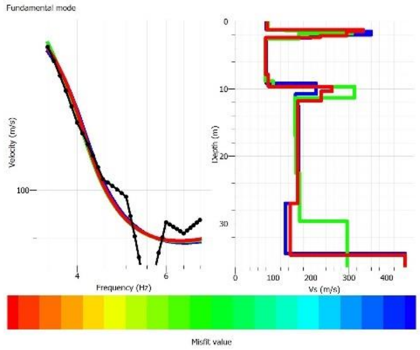
การศึกษาพฤติกรรมการเรียนรู้ของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม, การใช้อัลกอริทึมในการเลือกโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมที่มีไฮเปอร์พารามิเตอร์ที่เหมาะสม, การพิจารณาโหมดที่สูงกว่าของคลื่นผิวดิน รวมถึง การนำชุดข้อมูลเส้นโค้งการกระจายตัวจากการตรวจวัดจริงมาฝึกฝน และประเมิณผลโมเดลจะทำให้โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการทำนายผลมากยิ่งขึ้น

ในส่วนของอุปกรณ์นั้นการใช้เทคโนโลยีในการตรวจจับสัญญาณรบกวน, การกำจัดสัญญาณรบกวน, การเพิ่มระสิทธิภาพของอุปกรณ์ รวมถึง การประยุกต์ใช้วิธีการทางสถิติในการปรับปรุงสัญญาณรูปคลื่น และ การเลือกใช้ช่วงวินโดวที่มีสัญญาณรบกวนต่ำมาคำนวณเส้นโค้งการกระจายตัวจะสามารถทำให้เส้นโค้งการกระจายตัวมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

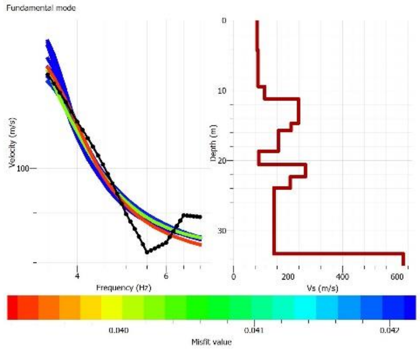
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6 ภาคผนวก

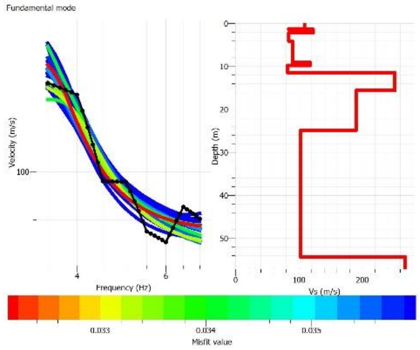


รูปที่ 6.1 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 2 เมตร ตัวอย่างที่ 1

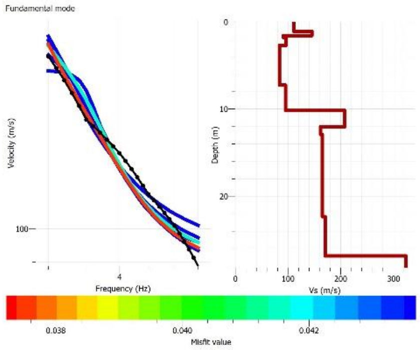


รูปที่ 6.2 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 2 เมตร ตัวอย่างที่ 2

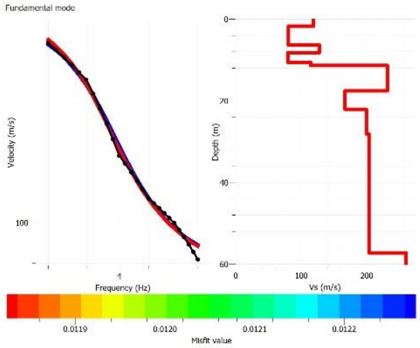
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 6.3 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 2 เมตร ตัวอย่างที่ 3

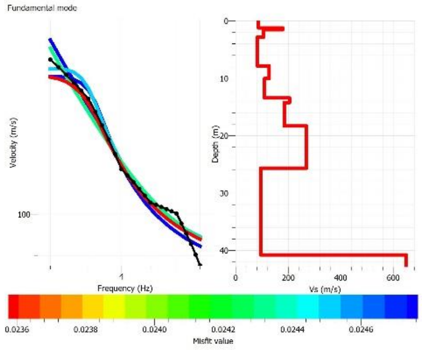


รูปที่ 6.4 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 4 เมตร ตัวอย่างที่ 1

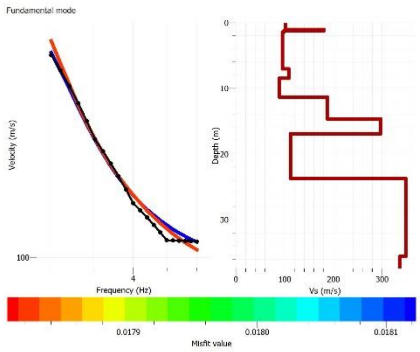


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

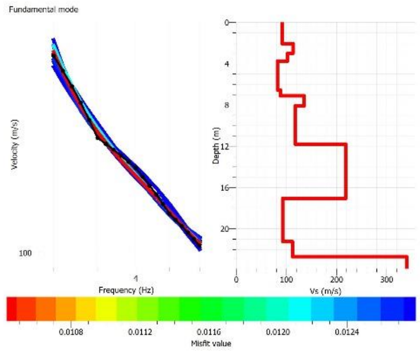
รูปที่ 6.5 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 4 เมตร ตัวอย่างที่ 2



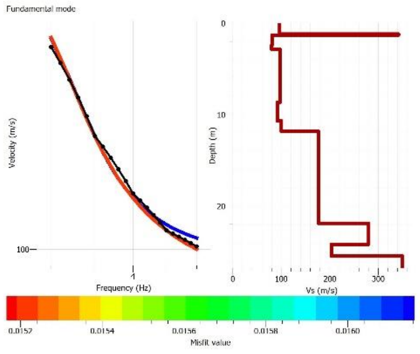
รูปที่ 6.6 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 4 เมตร ตัวอย่างที่ 3



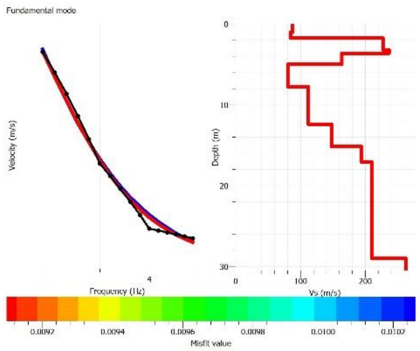
รูปที่ 6.7 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 6 เมตร ตัวอย่างที่ 1



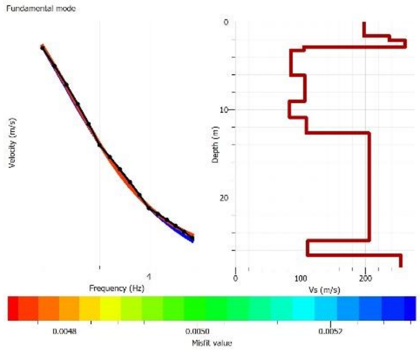
รูปที่ 6.8 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 6 เมตร ตัวอย่างที่ 2



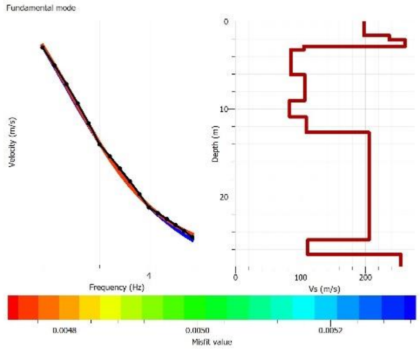
รูปที่ 6.9 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 6 เมตร ตัวอย่างที่ 3



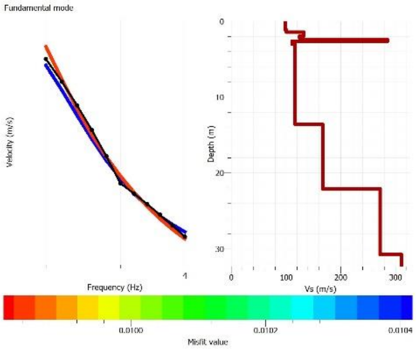
รูปที่ 6.10 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 8 เมตร ตัวอย่างที่ 1



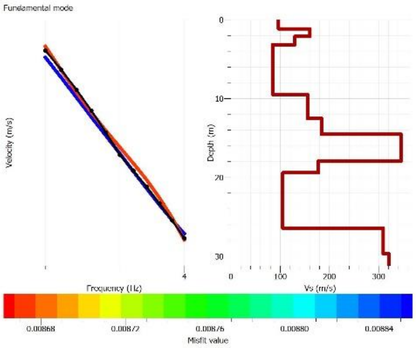
รูปที่ 6.11 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 8 เมตร ตัวอย่างที่ 2



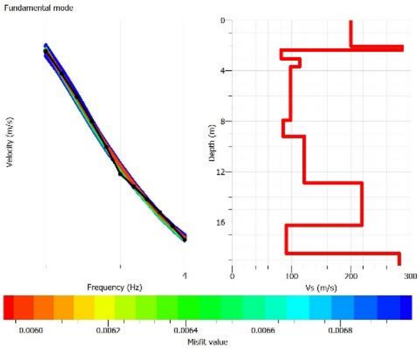
รูปที่ 6.12 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 8 เมตร ตัวอย่างที่ 3



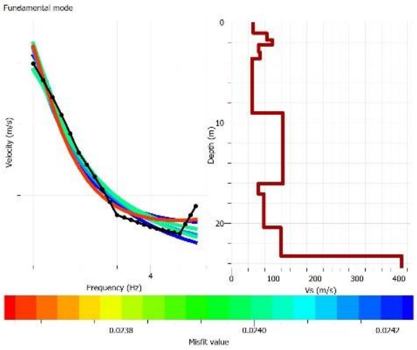
รูปที่ 6.13 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 10 เมตร ตัวอย่างที่ 1



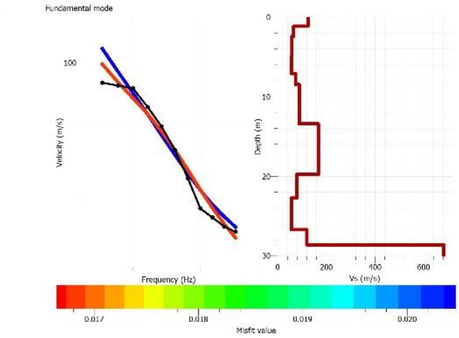
รูปที่ 6.14 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 10 เมตร ตัวอย่างที่ 2



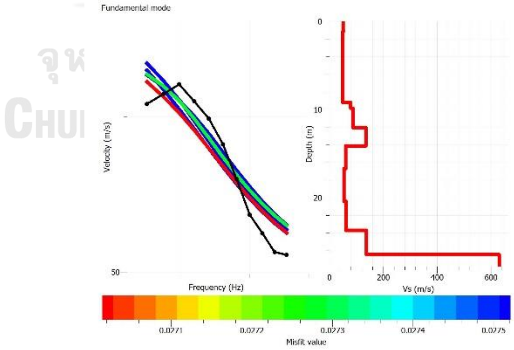
รูปที่ 6.15 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยด้วยรัศมี 10 เมตร ตัวอย่างที่ 3



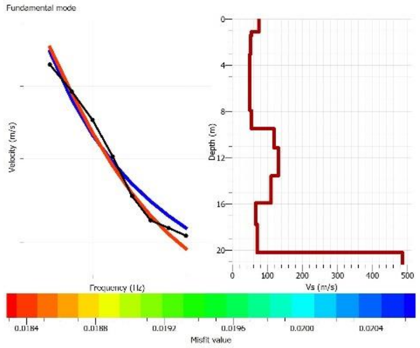
รูปที่ 6.16 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 1 (MTL-1) ด้วยรัศมี 4 เมตร



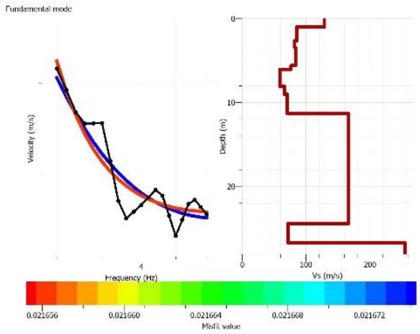
รูปที่ 6.17 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 1 (MTL-1) ด้วยรัศมี 6 เมตร



รูปที่ 6.18 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 2 (MTL-2) ด้วยรัศมี 4 เมตร

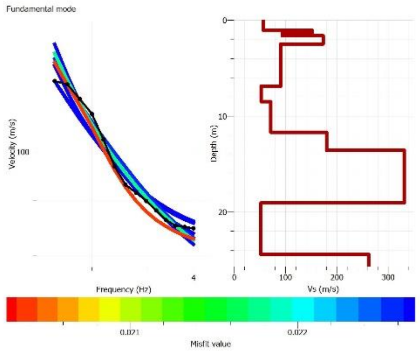


รูปที่ 6.19 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ มัณฑนา บางขุนเทียน-ชายทะเล จุดที่ 2 (MTL-2) ด้วยรัศมี 6 เมตร

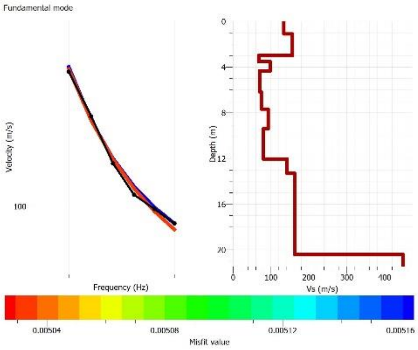


รูปที่ 6.20 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1 (BB-1) ด้วยรัศมี 4 เมตร

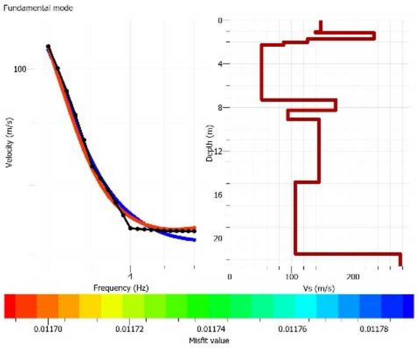
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.21 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1 (BB-1) ด้วยรัศมี 6 เมตร

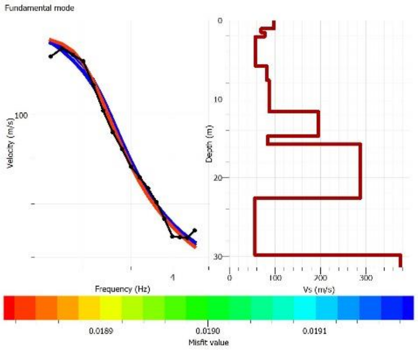


รูปที่ 6.22 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ บางบอน 5 จุดที่ 1 (BB-1) ด้วยรัศมี 8 เมตร

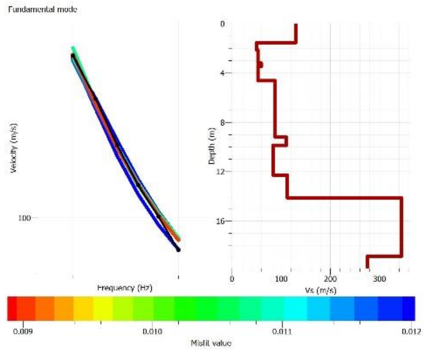


รูปที่ 6.23 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 (BB-2) ด้วยรัศมี 4 เมตร

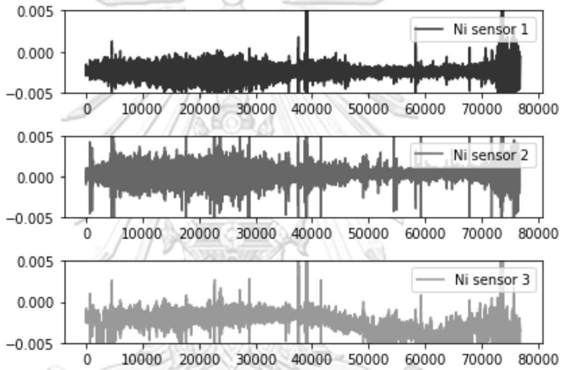
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.24 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 (BB-2) ด้วยรัศมี 6 เมตร

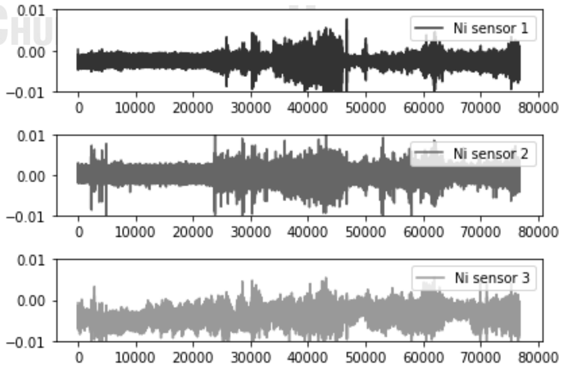


รูปที่ 6.25 ผลการคำนวณย้อนกลับของเส้นโค้งการกระจายตัวจากชุดโปรแกรม Dinver ในพื้นที่ทดสอบโครงการ บางบอน 5 จุดที่ 2 (BB-2) ด้วยรัศมี 8 เมตร

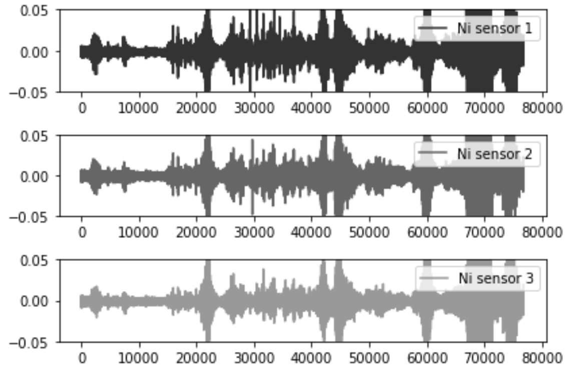


รูปที่ 6.26 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 1

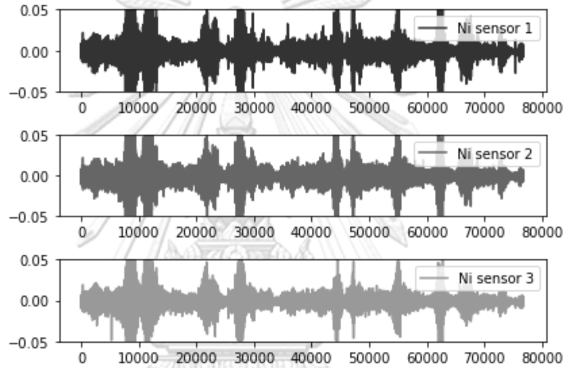
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.27 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 2

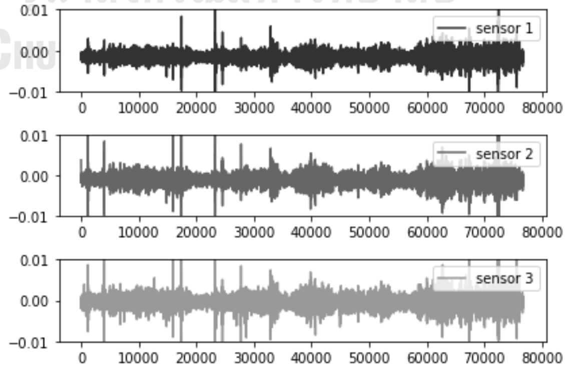


รูปที่ 6.28 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 1

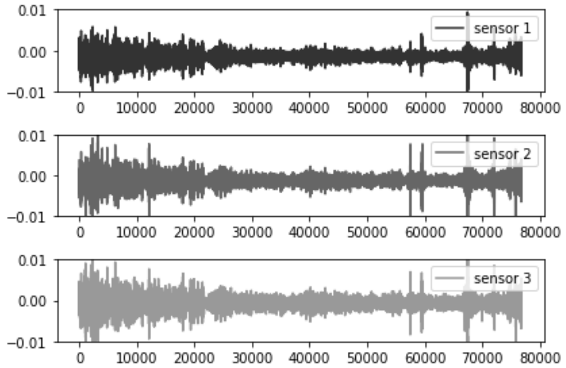


รูปที่ 6.29 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 2

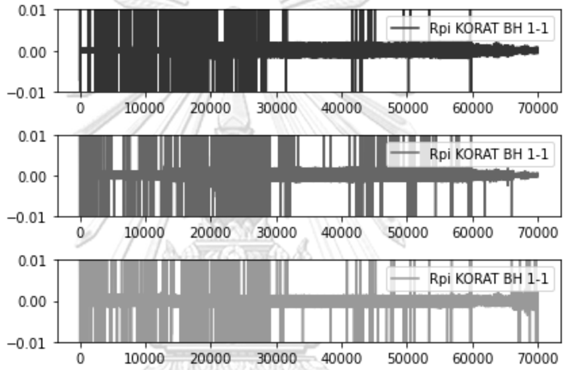
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.30 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 3 ตัวอย่างที่ 1

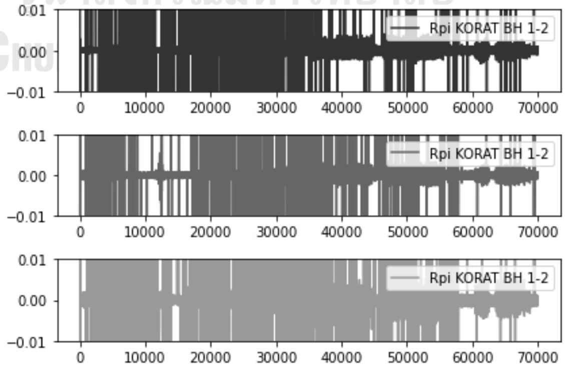


รูปที่ 6.31 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 3 ตัวอย่างที่ 2

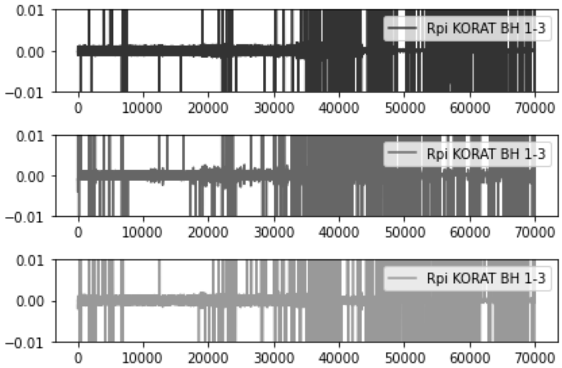


รูปที่ 6.32 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 1

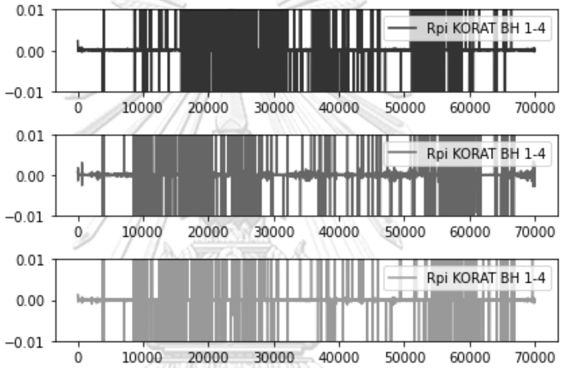
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



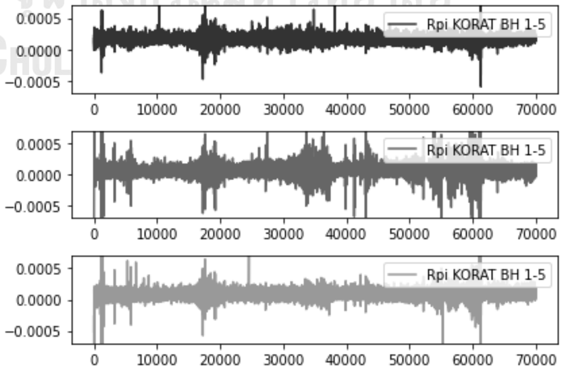
รูปที่ 6.33 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 2



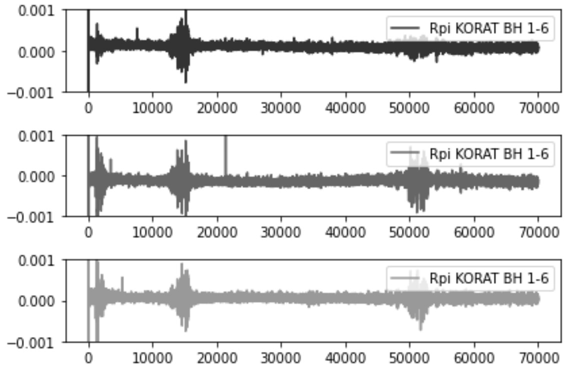
รูปที่ 6.34 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 3



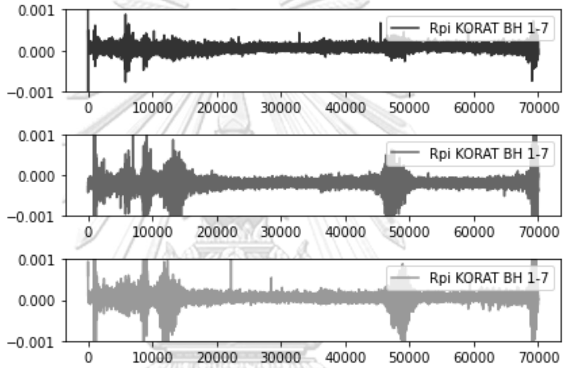
รูปที่ 6.35 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 4



รูปที่ 6.36 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 5

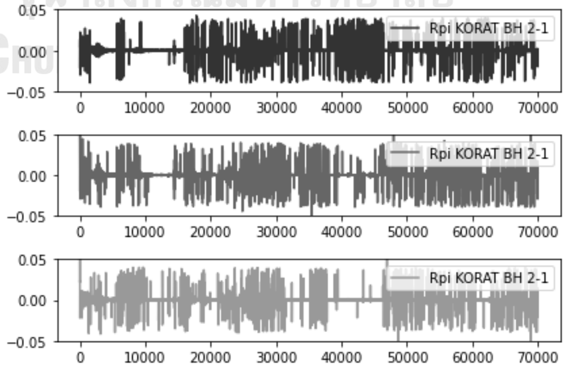


รูปที่ 6.37 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 6

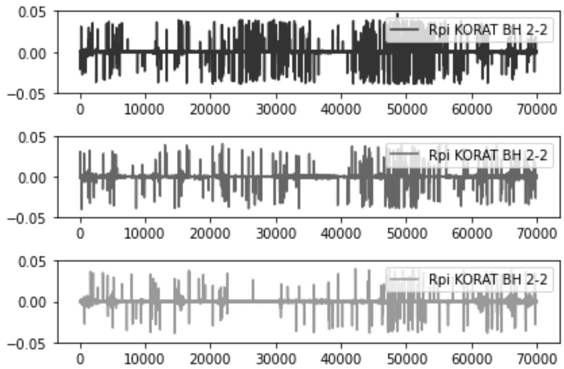


รูปที่ 6.38 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 1 ตัวอย่างที่ 7

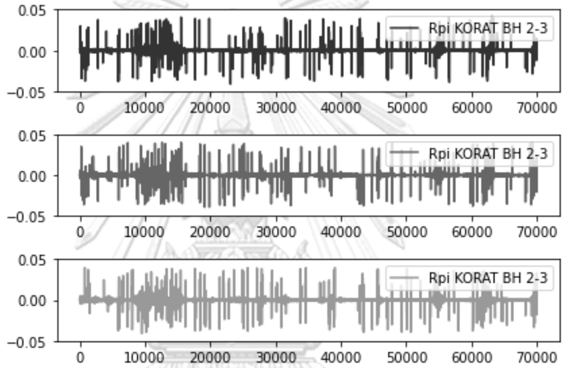
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.39 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 2 ตัวอย่างที่ 1

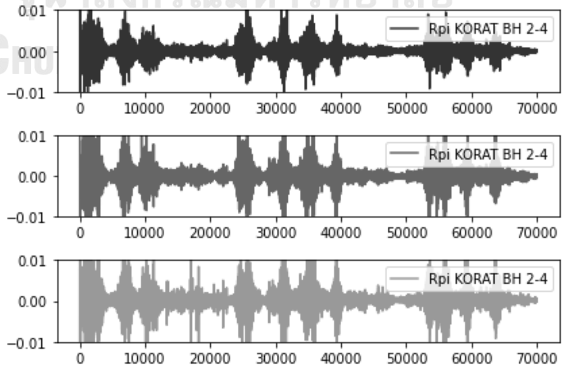


รูปที่ 6.40 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุด ที่ 2 ตัวอย่างที่ 2

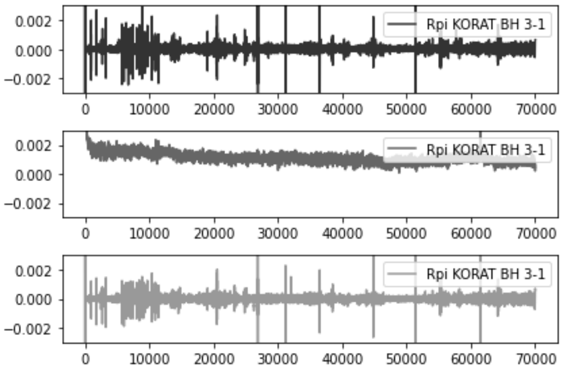


รูปที่ 6.41 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุด ที่ 2 ตัวอย่างที่ 3

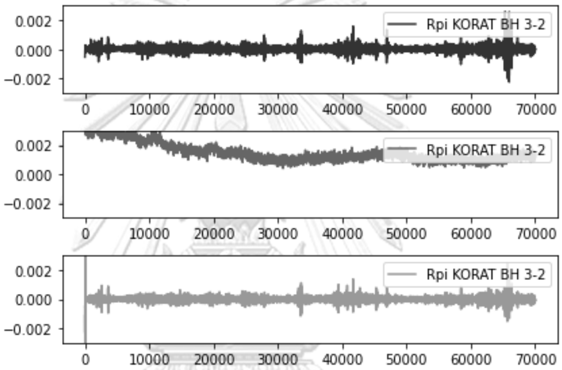
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



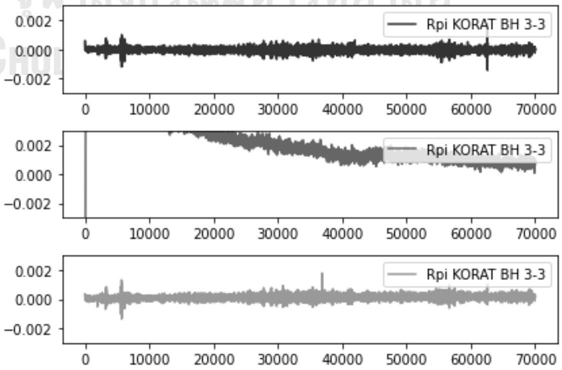
รูปที่ 6.42 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุด ที่ 2 ตัวอย่างที่ 4



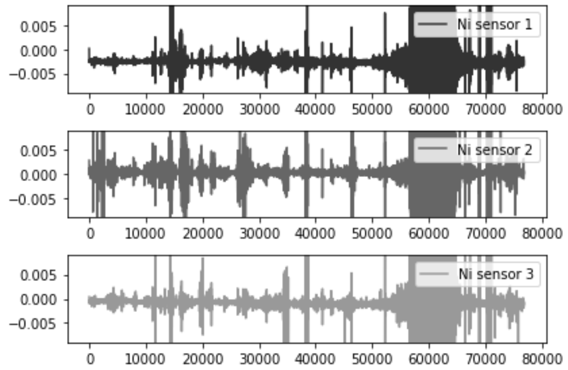
รูปที่ 6.43 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 3 ตัวอย่างที่ 1



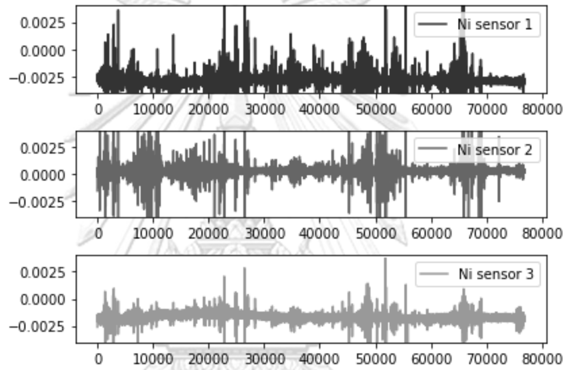
รูปที่ 6.44 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 3 ตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 6.45 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราชจุดที่ 3 ตัวอย่างที่ 3

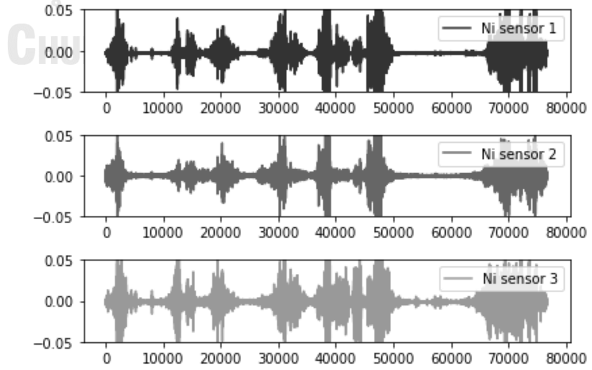


รูปที่ 6.46 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3 ตัวอย่างที่ 1

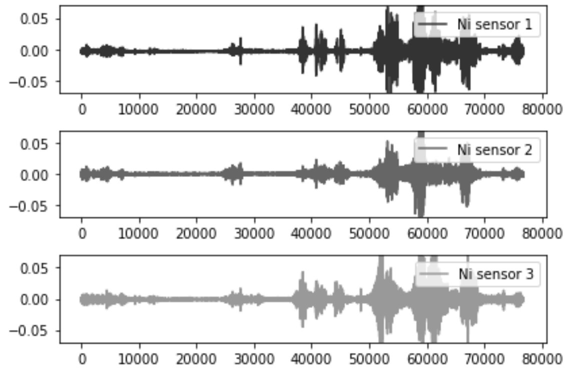


รูปที่ 6.47 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3 ตัวอย่างที่ 2

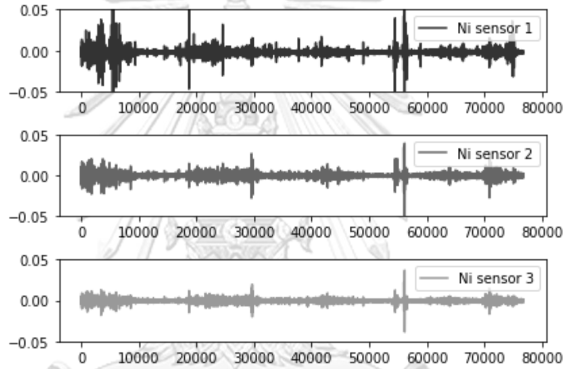
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.48 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-13 ตัวอย่างที่ 1

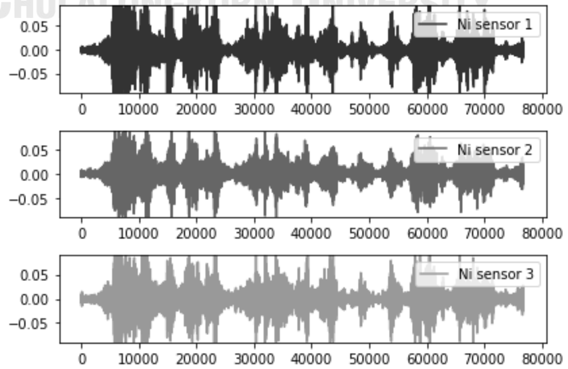


รูปที่ 6.49 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-13 ตัวอย่างที่ 2

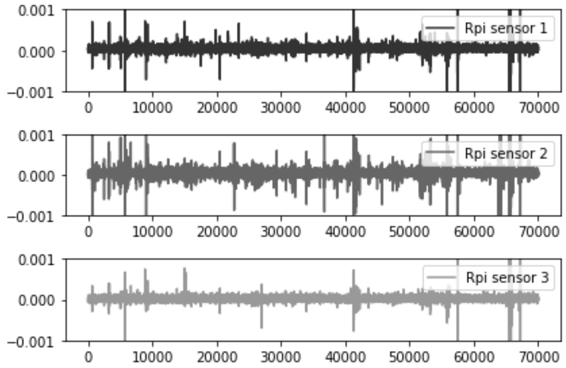


รูปที่ 6.50 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-15 ตัวอย่างที่ 1

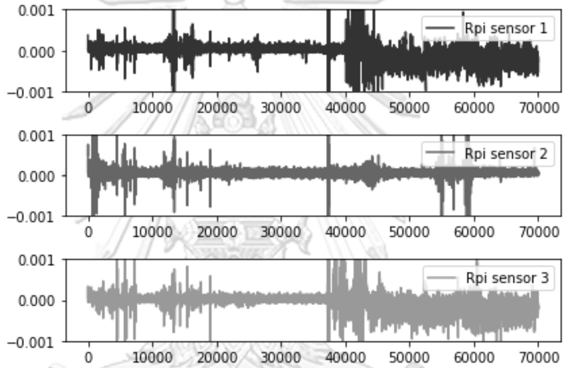
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 6.51 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ HUAYYOD ตัวอย่างที่ 1

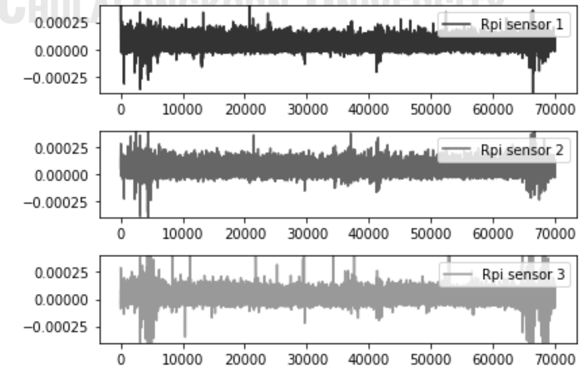


รูปที่ 6.52 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3 ตัวอย่างที่ 1

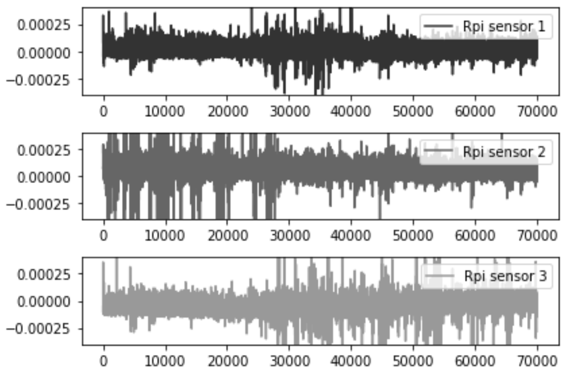


รูปที่ 6.53 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3 ตัวอย่างที่ 2

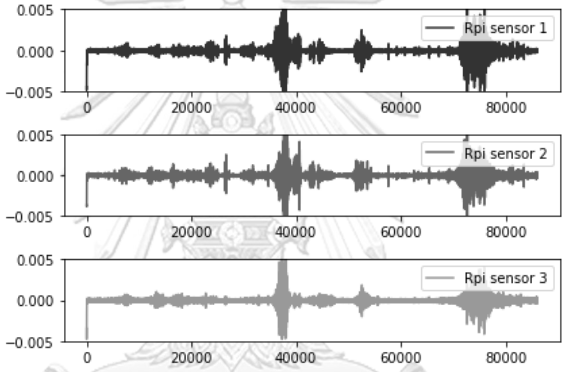
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 6.54 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3 ตัวอย่างที่ 3

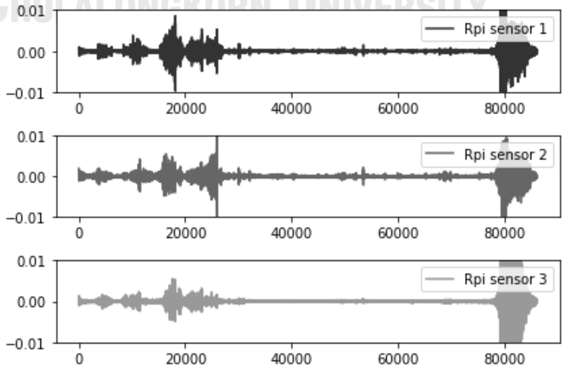


รูปที่ 6.55 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3 ตัวอย่างที่ 4

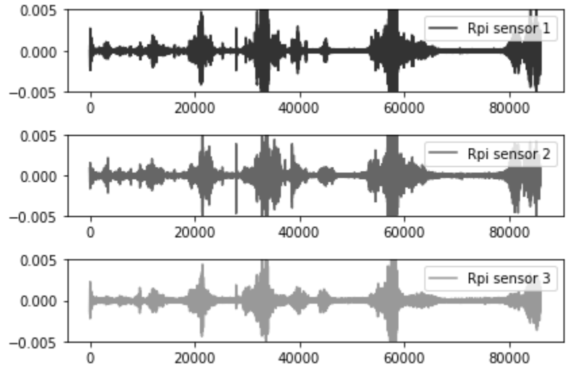


รูปที่ 6.56 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-13 ตัวอย่างที่ 1

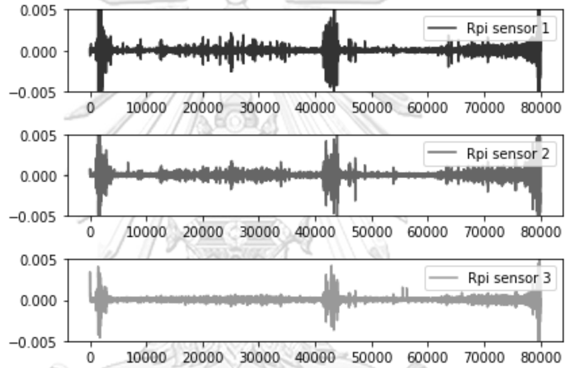
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 6.57 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-13 ตัวอย่างที่ 2

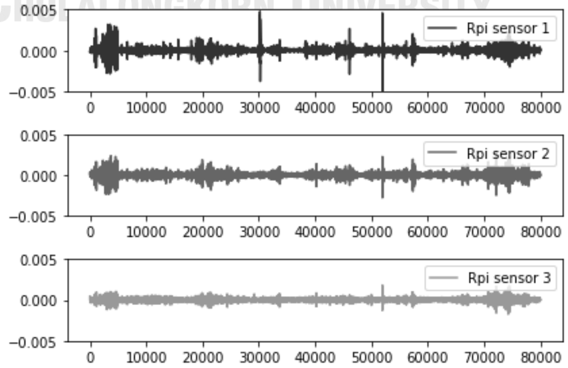


รูปที่ 6.58 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-13 ตัวอย่างที่ 3

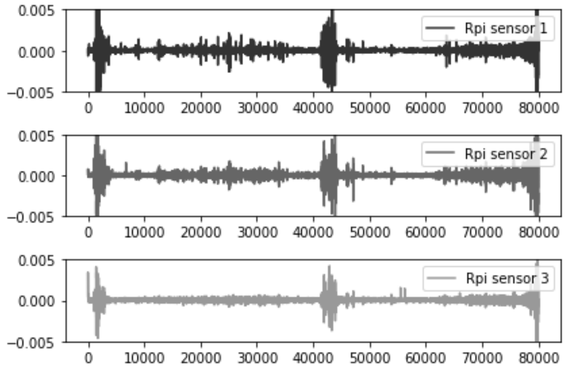


รูปที่ 6.59 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-15 ตัวอย่างที่ 1

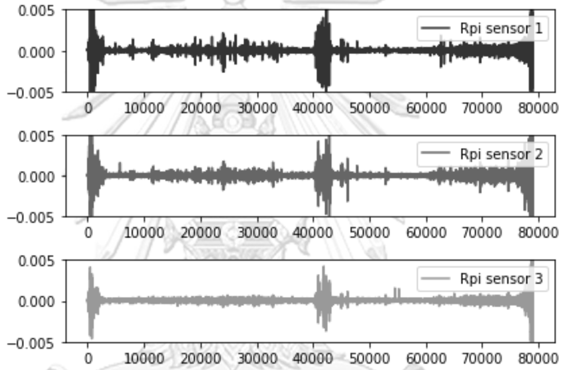
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 6.60 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-15 ตัวอย่างที่ 2

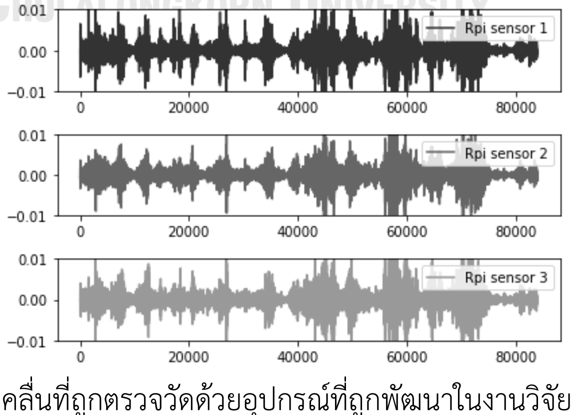


รูปที่ 6.61 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-15 ตัวอย่างที่ 3

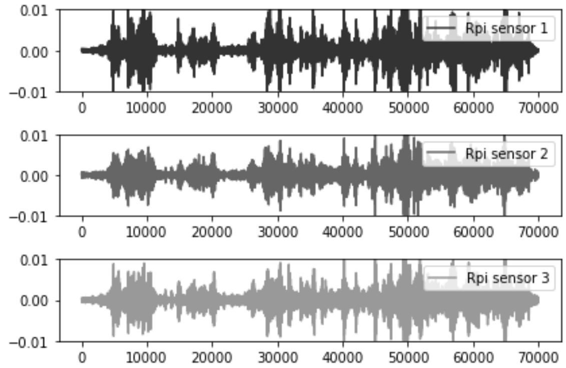


รูปที่ 6.62 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-15 ตัวอย่างที่ 4

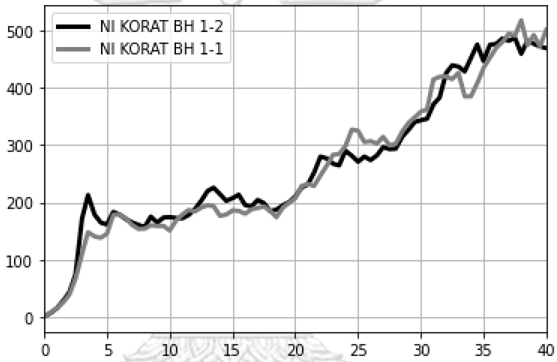
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 6.63 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ HUAYYOD ตัวอย่างที่ 1

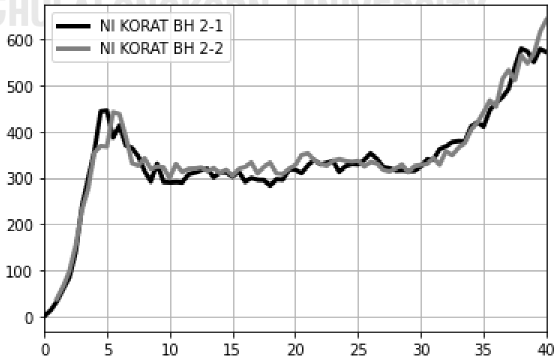


รูปที่ 6.64 รูปสัญญาณคลื่นที่ถูกตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ HUAYYOD ตัวอย่างที่ 2

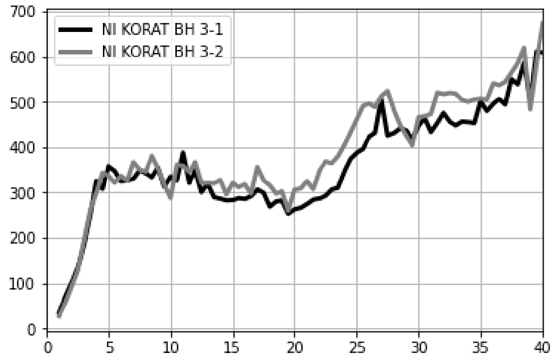


รูปที่ 6.65 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราช จุดที่ 1

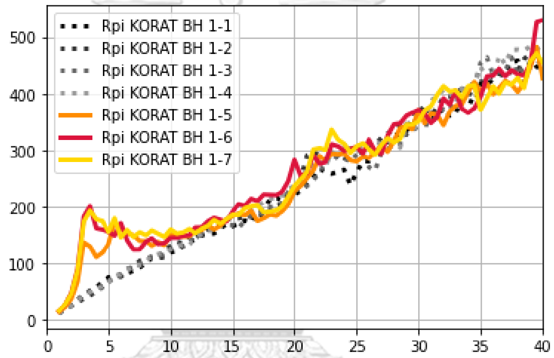
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



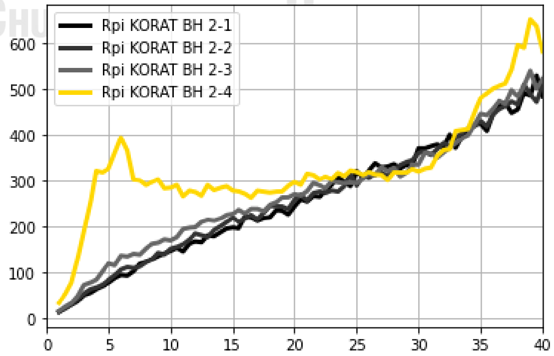
รูปที่ 6.66 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราช จุดที่ 2



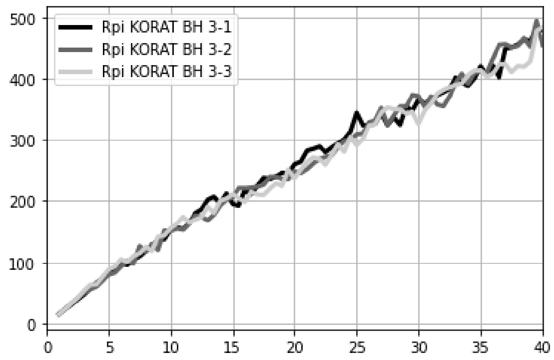
รูปที่ 6.67 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดโคราช จุดที่ 3



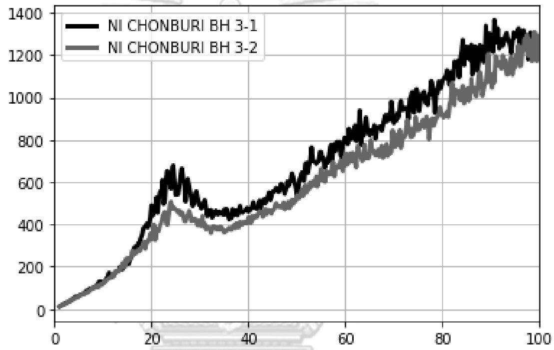
รูปที่ 6.68 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราช จุดที่ 1



รูปที่ 6.69 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราช จุดที่ 2

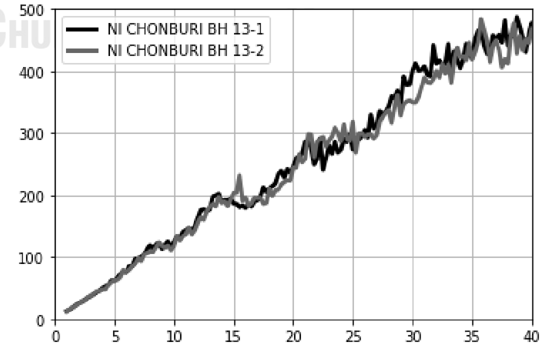


รูปที่ 6.70 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดโคราช จุดที่ 3

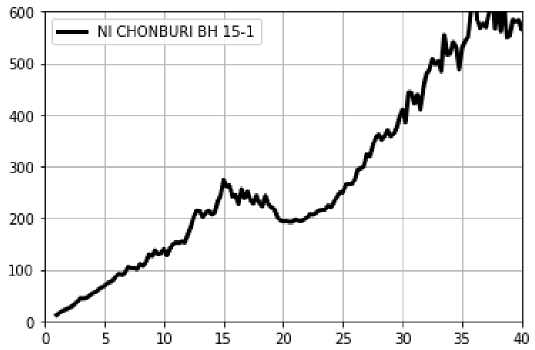


รูปที่ 6.71 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



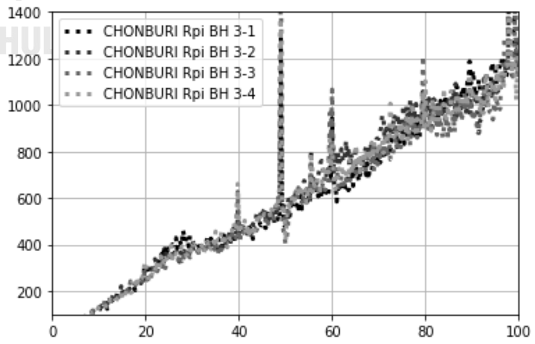
รูปที่ 6.72 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-13



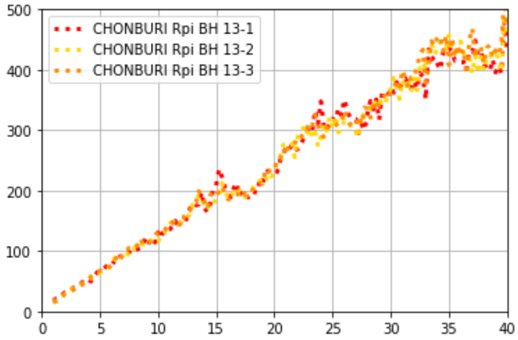
รูปที่ 6.73 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-15

รูปที่ 6.74 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยโมดูล National Instrument NI-9234 ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ HUAYYOD

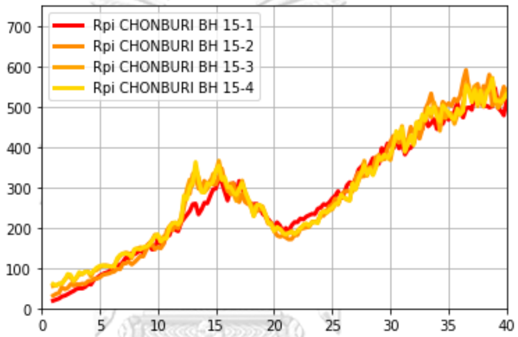
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



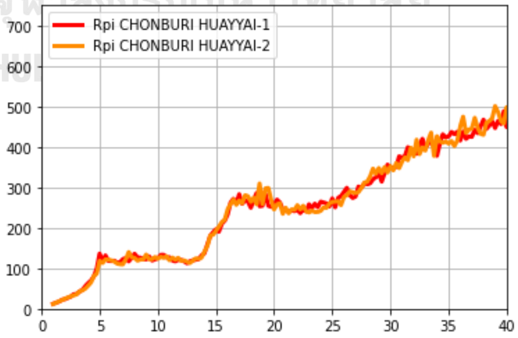
รูปที่ 6.75 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-3



รูปที่ 6.76 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-13



รูปที่ 6.77 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ BH-15



รูปที่ 6.78 เส้นโค้งการกระจายตัวที่ถูกคำนวณจากสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ในพื้นที่จังหวัดชลบุรี หลุมเจาะ HUAYYOD

บรรณานุกรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Mannor, S., Peleg, D., & Rubinstein, R. (2005, August). The cross entropy method for classification. In *Proceedings of the 22nd international conference on Machine learning* (pp. 561-568).

Abd, G., M., A., & M., E.-S. (2014). A Comparative Study of Meta-heuristic Algorithms for Solving Quadratic Assignment Problem. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, *5*(1), 1–6. https://doi.org/10.14569/ijacsa.2014.050101

Agarap, A. F. (2018). Deep learning using rectified linear units (relu). *arXiv preprint arXiv:1803.08375*.

Akaike, H. (1998). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In *Selected papers of hirotugu akaike* (pp. 199-213). Springer, New York, NY.

Alzahrani, R. A., & Parker, A. C. (2020, July). Neuromorphic circuits with neural modulation enhancing the information content of neural signaling. In *International Conference on Neuromorphic Systems 2020* (pp. 1-8).

Annealing, S. (1988). Simulated annealing: Theory and applications. *Mathematics and Computers in Simulation*, *30*(1–2), 200.

ASTM D4428/D4428M-14. (2014). Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing

Balamurugan, R., Natarajan, A. M., & Premalatha, K. (2015). Stellar-mass black hole optimization for biclustering microarray gene expression data. *Applied Artificial Intelligence*, *29*(4), 353-381.

Beaty, K. S., Schmitt, D. R., & Sacchi, M. (2002). Simulated annealing inversion of multimode Rayleigh wave dispersion curves for geological structure. *Geophysical Journal International*, *151*(2), 622-631.

Booth, D. E. (2008). The cross-entropy method.

ASTM D7400–08. (2008). Standard test methods for downhole seismic testing

Dal Moro, G., Pipan, M., & Gabrielli, P. (2007). Rayleigh wave dispersion curve inversion via genetic algorithms and marginal posterior probability density estimation. *Journal of Applied Geophysics*, *61*(1), 39-55.

Devilee, R. J. R., Curtis, A., & Roy-Chowdhury, K. (1999). An efficient, probabilistic neural network approach to solving inverse problems: inverting surface wave velocities for Eurasian crustal thickness. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *104*(B12), 28841-28857.

Dreyfus, S. E. (1990). Artificial neural networks, back propagation, and the Kelley-Bryson gradient procedure. *Journal of guidance, control, and dynamics*, *13*(5), 926-928.

Duchi, J. C., Bartlett, P. L., & Wainwright, M. J. (2012, December). Randomized smoothing for (parallel) stochastic optimization. In *2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)* (pp. 5442-5444). IEEE.

Foti, S. (2000). *Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves* (p. 229). na.

Foti, S., Lai, C. G., Rix, G. J., & Strobbia, C. (2014). *Surface wave methods for near-surface site characterization*. CRC press.

Ganji, V., Gucunski, N., & Nazarian, S. (1998). Automated inversion procedure for spectral analysis of surface waves. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, *124*(8), 757-770.

Geman, S., Bienenstock, E., & Doursat, R. (1992). Neural networks and the bias/variance dilemma. *Neural computation*, *4*(1), 1-58.

Glover, F. (1989). Tabu search—part I. *ORSA Journal on computing*, *1*(3), 190-206.

Goh, A. T. (1995). Back-propagation neural networks for modeling complex systems. *Artificial intelligence in engineering*, *9*(3), 143-151.

Gunantara, N., & Nurweda Putra, I. (2019). The characteristics of metaheuristic method in selection of path pairs on multicriteria ad hoc networks. *Journal of Computer Networks and Communications*, *2019*.

Holland, John H. (2019). The Optimal Allocation of Trials. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, *2*(2), 88–105

Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press.

Hopfield, J. J. (1988). Artificial neural networks. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, *4*(5), 3-10.

Hsu, Y. C., Lv, Z., Schlosser, J., Odom, P., & Kira, Z. (2019). Multi-class classification without multi-class labels. *arXiv preprint arXiv:1901.00544*.

Hu, J., Qiu, H., Zhang, H., & Ben‐Zion, Y. (2020). Using deep learning to derive shear‐wave velocity models from surface‐wave dispersion data. *Seismological Research Letters*, *91*(3), 1738-1751.

Hunaidi, O. (1998). Evolution-based genetic algorithms for analysis of non-destructive surface wave tests on pavements. *NDT & e International*, *31*(4), 273-280.

Jain, A. K., Mao, J., & Mohiuddin, K. M. (1996). Artificial neural networks: A tutorial. *Computer*, *29*(3), 31-44.

Ketkar, N. (2017). Introduction to deep learning. In *Deep learning with Python* (pp. 1-5). Apress, Berkeley, CA.

Kingma, D., & Adam, B. J. (2015). A Method for Stochastic Optimization. In Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR).

Krogh, A. (2008). What are artificial neural networks? *Nature biotechnology*, *26*(2), 195-197.

Likitlersuang, S., & Kyaw, K. (2010). A study of shear wave velocity correlations of Bangkok subsoil. *Obras y Proyectos: Revista de Ingenieria Civil*, *7*(1), 27-33.

Lomax, A., & Snieder, R. (1995). The contrast in upper mantle shear-wave velocity between the East European Platform and tectonic Europe obtained with genetic algorithm inversion of Rayleigh-wave group dispersion. *Geophysical Journal International*, *123*(1), 169-182.

Loo, P. H., & Leong, E. C. (2018). Discussion of "Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils". *Canadian Geotechnical Journal*, *55*(10), 1510-1511.

Chulalongkorn University

Martínez, M. D., Lana, X., Olarte, J., Badal, J., & Canas, J. A. (2000). Inversion of Rayleigh wave phase and group velocities by simulated annealing. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *122*(1-2), 3-17.

Meier, U., Curtis, A., & Trampert, J. (2007). Global crustal thickness from neural network inversion of surface wave data. *Geophysical Journal International*, *169*(2), 706-722.

Miller, R. D., Xia, J., Park, C. B., & Ivanov, J. M. (1999). Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *The Leading Edge*, *18*(12), 1392-1396.

Montavon, G., Orr, G., & Müller, K. R. (Eds.). (2012). *Neural networks: tricks of the trade* (Vol. 7700). springer.

Nazarian, S., Stokoe II, K. H., & Hudson, W. R. (1983). *Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems* (No. 930).

Okada, H., & Suto, K. (2003). *The microtremor survey method*. Society of Exploration Geophysicists.

Wiggins, R. A. (1972). The general linear inverse problem: Implication of surface waves and free oscillations for earth structure. *Reviews of Geophysics*, *10*(1), 251-285.

Park, C. B. (2011). Imaging dispersion of MASW data—Full vs. selective offset scheme. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, *16*(1), 13-23.

Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods. *The leading edge*, *26*(1), 60-64.

Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, *64*(3), 800-808.

Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1998* (pp. 1377-1380). Society of Exploration Geophysicists.

Patel, A. (2019). *Geotechnical investigations and improvement of ground conditions*. Woodhead Publishing.

Rix, G. J. (1995). *Accuracy and resolutions of surface wave inversion*. Georgia Institute of Technology.

Rubinstein, R. (1999). The cross-entropy method for combinatorial and continuous optimization. *Methodology and computing in applied probability*, *1*(2), 127-190.

Ruder, S. (2016). An overview of gradient descent optimization algorithms. *arXiv preprint arXiv:1609.04747*.

Ruby, U., & Yendapalli, V. (2020). Binary cross entropy with deep learning technique for image classification. *Int. J. Adv. Trends Comput. Sci. Eng*, *9*(10).

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., & Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *nature*, *323*(6088), 533-536.

Chulalongkorn University

Rutenbar, R. A. (1989). Simulated annealing algorithms: An overview. *IEEE Circuits and Devices magazine*, *5*(1), 19-26.

Sambridge, M., & Drijkoningen, G. (1992). Genetic algorithms in seismic waveform inversion. *Geophysical Journal International*, *109*(2), 323-342.

Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm—I. Searching a parameter space. *Geophysical journal international*, *138*(2), 479-494.

Sambridge, M. (1999). Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm—II. Appraising the ensemble. *Geophysical Journal International*, *138*(3), 727-746.

Sen, M. K., & Stoffa, P. L. (1990). Nonlinear seismic waveform inversion in one dimension using simulated annealing. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1990* (pp. 1119-1122). Society of Exploration Geophysicists.

Shannon, C. E. (1951). Prediction and entropy of printed English. *Bell system technical journal*, *30*(1), 50-64.

Sharma, S., Sharma, S., & Athaiya, A. (2017). Activation functions in neural networks. *towards data science*, *6*(12), 310-316.

Soler-Llorens, J. L., Galiana-Merino, J. J., Giner-Caturla, J., Jauregui-Eslava, P., Rosa-Cintas, S., & Rosa-Herranz, J. (2016). Development and programming of Geophonino: A low cost Arduino-based seismic recorder for vertical geophones. *Computers & Geosciences*, *94*, 1-10.

Soler-Llorens, J. L., Galiana-Merino, J. J., Giner-Caturla, J. J., Rosa-Cintas, S., & Nassim-Benabdeloued, B. Y. (2019). Geophonino-W: A wireless multichannel seismic noise recorder system for array measurements. *Sensors*, *19*(19), 4087.

Srinivas, M., & Patnaik, L. M. (1994). Genetic algorithms: A survey. *computer*, *27*(6), 17-26.

Stoffa, P. L., & Sen, M. K. (1991). Nonlinear multiparameter optimization using genetic algorithms: Inversion of plane-wave seismograms. *Geophysics*, *56*(11), 1794-1810.

Tan, H. H., & Lim, K. H. (2019, June). Vanishing gradient mitigation with deep learning neural network optimization. In *2019 7th international conference on smart computing & communications (ICSCC)* (pp. 1-4). IEEE.

Tsoumakas, G., & Katakis, I. (2007). Multi-label classification: An overview. *International Journal of Data Warehousing and Mining (IJDWM)*, *3*(3), 1-13.

Vinther, R., & Mosegaard, K. (1996). Seismic inversion through Tabu Search 1. *Geophysical prospecting*, *44*(4), 555-570.

Wathelet, M., Jongmans, D., & Ohrnberger, M. (2004). Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. *Near surface geophysics*, *2*(4), 211-221.

Wathelet, M. (2005). Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion. *PhD Diss., Liége University*, *161*.

Wathelet, M. (2008). An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, *35*(9).

Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research*, *30*(1), 79-82.

Wythoff, B. J. (1993). Backpropagation neural networks: a tutorial. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *18*(2), 115-155.

Xia, J., Miller, R. D., & Park, C. B. (1999). Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, *64*(3), 691-700.

Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., Hunter, J. A., & Harris, J. B. (2000). Comparing shear-wave velocity profiles from MASW with borehole measurements in unconsolidated sediments, Fraser River Delta, BC, Canada. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, *5*(3), 1-13.

Yamanaka, H. (2005). Comparison of performance of heuristic search methods for phase velocity inversion in shallow surface wave method. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, *10*(2), 163-173.

Yilmaz, Ö. (2001). *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Society of exploration geophysicists.

Yuan, D., & Nazarian, S. (1993). Automated surface wave method: inversion technique. *Journal of geotechnical engineering*, *119*(7), 1112-1126.

Zeiler, M. D. (2012). Adadelta: an adaptive learning rate method. *arXiv preprint arXiv:1212.5701*.

Hochreiter, S. (1998). The vanishing gradient problem during learning recurrent neural nets and problem solutions. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, *6*(02), 107-116.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University