

DEVELOPMENT OF ROAD ROUGHNESS MEASUREMENT USING
NON-CONTACT SENSOR

PICHAMOL THIRASUPPASRI



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN AUTOMOTIVE ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023

KMITL-2023-EN-M-037-015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบวัดความขรุขระผิวถนนโดยเซ็นเซอร์แบบไร้สัมผัส
นักศึกษา	นางสาวพิชามญช์ ธีระศุภศรี
รหัสประจำตัว	59610030
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมยานยนต์ (หลักสูตรนานาชาติ)
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐภูมิ เตไปวา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. ฉัตรชัย ศรีสุรางค์กุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	Assoc. Prof. Dr. Masaki Yamakita

บทคัดย่อ

ความขรุขระของผิวถนนคือปัจจัยหลักที่กระทำโดยตรงต่อระบบค้ำซีของยานพาหนะ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสะดวกสบายในการขับขี่ ความปลอดภัยของผู้ใช้รถและถนน ความเสียหายต่อชิ้นส่วนรถยนต์ เนื่องจากความล้าในวัสดุ ตลอดจนค่าบำรุงรักษาผิวทางและยานพาหนะ ดังนั้นการประเมินสภาพผิวทางจึงมีความสำคัญต่อพลศาสตร์ยานยนต์ในหลายด้าน แม้เครื่องมือวัดความขรุขระผิวถนนจะมีหลากหลายประเภทแต่โดยมากอุปกรณ์เหล่านั้นมักสรุปค่าออกมาในรูปของดัชนีความขรุขระสากล (IRI) เพื่อใช้ในการบำรุงรักษาและซ่อมแซมเครือข่ายถนน โดยดัชนีความขรุขระสากลเป็นดัชนีที่ได้รับความนิยมมากแต่อย่างไรก็ตามดัชนีความขรุขระให้ข้อมูลไม่เพียงพอต่อการอธิบายลักษณะของผิวทางได้อย่างถูกต้อง วิทยานิพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการวัดและวิเคราะห์ความขรุขระของผิวถนน โดยระบบวัดประกอบด้วยอุปกรณ์วัดความเร่ง (Accelerometer) เลเซอร์ ระบบนำทางด้วยดาวเทียม (GNSS receiver) และอุปกรณ์อ่านข้อมูลดิจิทัลบนรถยนต์ (OBD reader) โดยข้อมูลจากอุปกรณ์วัดความเร่งและเลเซอร์ถูกนำมาคำนวณลักษณะพื้นผิวถนน (Road profile) ส่วนข้อมูลที่ได้จากระบบนำทางด้วยดาวเทียมจะถูกนำมาใช้ในการระบุตำแหน่งและความเร็วของรถทดสอบซึ่งอุปกรณ์อ่านข้อมูลดิจิทัลบนรถยนต์จะนำข้อมูลความเร็วของรถยนต์มาทดแทนในกรณีที่สัญญาณดาวเทียมขาดหาย การศึกษาประกอบด้วยการศึกษาเก็บข้อมูลจริงจากทางหลวงในประเทศไทย 4 เส้นทาง การวิเคราะห์ด้วยความหนาแน่นสเปกตรัมโดยอ้างอิงด้วยมาตรฐาน ISO8608 ข้อมูลการวิเคราะห์ถูกตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับโปรแกรม ProVAL ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวถนนและข้อมูลดัชนีความขรุขระสากลของกรมทางหลวง จากงานวิจัยนี้จะได้อุปกรณ์ที่สามารถวัดตัวแปรที่สำคัญที่สามารถนำไปจำลองลักษณะพื้นผิวถนนเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาและออกแบบทางด้านพลศาสตร์ยานยนต์ให้เหมาะสมกับสภาพถนนต่างๆได้ต่อไป หวังว่า

งานวิจัยจะเป็นประโยชน์กับผู้อ่านไม่มากก็น้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Development of Road Roughness Measurement Using Non-Contact Sensor
Student	Ms. Pichamol Thirasuppasri
Student ID	59610030
Degree	Master of Engineering
Program	Automotive Engineering (International Program)
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc. Prof.Dr.Nattawoot Depaiwa
Thesis Co-advisor	Dr.-Ing. Chadchai Srisurangkul
Thesis Co-advisor	Assoc. Prof. Dr. Masaki Yamakita

ABSTRACT

Road roughness is a principal excitation to vehicle's chassis system that directly affect ride comfort, road user safety, fatigue damage and maintenance cost. Therefore, its evaluation is necessary in vehicle dynamics study. This thesis aims to provide real road data for road profile synthesis by studying and developing a road profile measurement system, including both device and algorithm. The measurement device adopted the principle of inertial profiler, which is relatively compact, affordable, and provides sufficient measurements. The roadway coordinate was derived through integration of the vehicle's velocity, with the corrected velocity obtained via a relationship established between velocity from the satellite navigation system and velocity from OBD-II. In order to enhance the system's capabilities, the method of "indirect IRI" was introduced, utilizing the correlation between IRI and PSD roughness parameters proposed by KROPÁČ and MÚČKA. This method is useful when real road measurement is not feasible. Instead, third-party IRI data can be utilized to determine PSD roughness and synthesize a road profile. Different Thailand's highway routes were collected and analyzed into PSD roughness parameters and International Roughness Index (IRI). The results were validated with two benchmarks: IRI database from the Department of Highways (Thailand) and the well-known software, ProVAL.

ACKNOWLEDGEMENT

I wish to express my profound gratitude to Dr.-Ing. Chadchai Srisurangkul, my esteemed research advisor, and my co-advisors, Asst. Prof. Dr. Chaiwat Nuthong, Assoc. Prof. Dr. Nattawoot Depaiwa, and Assoc. Prof. Dr. Masaki Yamakita. Without their unwavering guidance, enthusiastic encouragement, and insightful critiques, this work would not have been possible.

I am also deeply indebted to Asst. Prof. Dr. Preecha Karin for his consistent and kind support throughout my graduation, and to Manussanan Saengpenchai and Bongkotchaporn Duangsrikaew for their invaluable assistance and unceasing encouragement.

I would like to express my sincere appreciation to the Thailand Advance Institute of Science and Technology, Tokyo Institute of Technology (TAIST-Tokyo Tech), National Science and Technology Development Agency (NSTDA), and Hino Motors for their generous full scholarship and financial support. Finally, I extend my gratitude to the National Metal and Material Technology Center (MTEC) for providing the necessary instruments for the successful completion of this research.

Pichamol Thirasuppasri

TABLE OF CONTENTS

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT	II
ACKNOWLEDGEMENT	II
TABLE OF CONTENTS	IV
LIST OF TABLES	VI
LIST OF FIGURES	VII
LIST OF SYMBOLS	IX
LIST OF DEFINITIONS	X
CHAPTER 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Research Background.....	1
1.2 Research Objectives.....	2
1.3 Thesis Outlines.....	2
CHAPTER 2 LITERATURE REVIEW	4
2.1 Road Surface Texture and Roughness	4
2.2 Road Roughness Measurement	6
2.3 Roughness Indices	11
2.4 Frequency Analysis of the Road Surface Roughness	14
2.5 Profile Viewer and Analyzer (ProVAL) Software	19
CHAPTER 3 RESEARCH METHODOLOGY	21
3.1 Measurement System.....	21
3.2 Data Collection	24
3.3 Road Surface Profile Determination	26
3.4 Road Elevation Spectrum Parameters Determination	30
3.5 Road Roughness Index Determination	32
CHAPTER 4 RESULTS AND DISCUSSIONS	34
4.1 Relationship Between Vehicle Velocity from GNSS receiver and OBD II	34
4.2 Road Surface Elevation	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3	Road Elevation Spectrum Parameters	39
4.3.1	PSD Overall.....	39
4.3.2	PSD segment	45
4.4	IRI	47
4.4.1	Overall IRI.....	48
4.4.2	Segment IRI.....	49
CHAPTER 5 CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS.....		60
APPENDIX A: VBOX GNSS RECIEVER SPECIFICATION		66
APPENDIX B: ACCELERATOMETER SPECIFICATION		68
APPENDIX C: LASER SPECIFICATION.....		69
APPENDIX E: PROVAL SOFTWARE		70
APPENDIX F: ISO 8608: SMOOTH PSD FREQUENCY BAND.....		72
AUTHOR BIOGRAPHY		74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LIST OF TABLES

Table	Page
Table 2.1 Indices review for road pavement surface evaluation[18]	11
Table 2.2 Road roughness criteria of Department of Highway, Thailand.....	13
Table 2.3 Approximations of road profile roughness spectra[23]	15
Table 3.1 Detail of data collected.....	26
Table 3.2 Golden car parameter	32
Table 4.1 Statistical data of each road profiles	39
Table 4.2 Percentage Error of H1L PSD roughness in comparing to ProVAL.....	40
Table 4.3 Percentage Error of H1R PSD roughness in comparing to ProVAL.....	41
Table 4.4 Percentage Error of H347L PSD roughness in comparing to ProVAL	42
Table 4.5 Percentage Error of H347R PSD roughness in comparing to ProVAL	43
Table 4.6 Spectrum Parameters	45
Table 4.7 Mean of Percentage Error of H347R PSD roughness in comparing to ProVAL	46
Table 4.8 Overall IRI in comparing with DOH and ProVAL.....	49
Table 4.9 Direct Method: Percentage Error of IRI in comparing to DOH and ProVAL... 50	
Table 4.10 Indirect Method: Percentage Error of IRI in comparing to DOH and ProVAL... 55	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LIST OF FIGURES

Figure	Page
Figure 1.1 Effect of pavement roughness on fuel consumption.....	1
Figure 2.1 Longitudinal and transverse profile [8].....	4
Figure 2.2 Road texture wavelength and their effects on vehicle[9]	5
Figure 2.3 The amplification of road surface texture and its wavelength.....	6
Figure 2.4 Measurement techniques	7
Figure 2.5 Dynatest RSP Mark III.....	9
Figure 2.6 ARRB HAWEYE 2000 SERIES[13].....	9
Figure 2.7 The CS8800 Walking Profiler[14].....	10
Figure 2.8 DOH’s equipped vehicle with ROMDAS.....	10
Figure 2.9 International Roughness Index (IRI) scale[19]	13
Figure 2.10 PSD of road profile [23].....	14
Figure 2.11 General behavior of the PSD approximations[24]	16
Figure 2.12 ISO 8608 Road Classification	18
Figure 2.13 ProVAL: Road profile viewer.....	19
Figure 2.14 ProVAL: Ride quality	20
Figure 3.1 Inertial profiler measurement concept.....	21
Figure 3.2 Testing vehicle and installed equipment.....	23
Figure 3.3 Measurement system and wiring	24
Figure 3.4 Tested Route.....	25
Figure 3.5 Photograph of the selected route surface conditions and	26
Figure 3.6 Road surface elevation determination process	27
Figure 3.7 Double integration determination process	28
Figure 3.8 Travelled distance determination process.....	30
Figure 3.9 Road Surface Elevation Determination Process	31
Figure 4.1 Vehicle velocity at nearly constant 60km/h.....	34
Figure 4.2 Vehicle velocity in accelerating state from 60km/h to 100km/h	35
Figure 4.3 Road Surface Elevation of H1L	36
Figure 4.4 Road Surface Elevation of H1R	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 4.5 Road Surface Elevation of H347L	37
Figure 4.6 Road Surface Elevation of H347R.....	37
Figure 4.7 Road Profile of selected routes: H1L (top left), H1R (top right), H347L (bottom left), and H347R (bottom right)	38
Figure 4.8 Percentage error of H1L PSD roughness in comparing to ProVAL	40
Figure 4.9 Percentage error of H1R PSD roughness in comparing to ProVAL	41
Figure 4.10 Percentage error of H347L PSD roughness in comparing to ProVAL	42
Figure 4.11 Percentage error of H347R PSD roughness in comparing to ProVAL	43
Figure 4.12 PSD roughness of H1L and One-straight line fit	44
Figure 4.13 The first section (i =1) of PSD roughness and percentage error in comparing to ProVAL	46
Figure 4.14 The middle section (i =60) of PSD roughness and percentage error in comparing to ProVAL	47
Figure 4.15 The last section (i =119) of PSD roughness and percentage error in comparing to ProVAL	47
Figure 4.16 IRI of H1L and percentage error in comparing with DOH.....	51
Figure 4.17 IRI of H1L and percentage error in comparing with ProVAL	51
Figure 4.18 IRI of H1R and percentage error in comparing with DOH.....	52
Figure 4.19 IRI of H1R and percentage error in comparing with ProVAL	52
Figure 4.20 IRI of H347L and percentage error in comparing with DOH.....	53
Figure 4.21 IRI of H347L and percentage error in comparing with ProVAL	53
Figure 4.22 IRI of H347R and percentage error in comparing with DOH	54
Figure 4.23 IRI of H347R and percentage error in comparing with ProVAL.....	54
Figure 4.24 IRI of H1L and percentage error in comparing to DOH.....	56
Figure 4.25 IRI of H1L and percentage error in comparing to ProVAL	56
Figure 4.26 IRI of H1R and percentage error in comparing with DOH.....	57
Figure 4.27 IRI of H1R and percentage error in comparing to ProVAL	57
Figure 4.28 IRI of H347L and percentage error in comparing with DOH.....	58
Figure 4.29 IRI of H347L and percentage error in comparing to ProVAL.....	58
Figure 4.30 IRI of H347R and percentage error in comparing with DOH	59
Figure 4.31 IRI of H347R and percentage error in comparing to ProVAL.....	59
Figure 5.1 System validation	60

LIST OF SYMBOLS

λ	Wavelength [m]
n	Spatial Frequency [cycle/m]
ω	Angular Frequency ($=2\pi f$) [rad/s]
Ω	Angular Spatial Frequency ($=2\pi\eta$) [rad/m]
G_d	Displacement PSD
C	Roughness Coefficient
w	waviness



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LIST OF DEFINITIONS

IRI	International Roughness Index
PSD	Power Spectral Density
DOH	Department of Highway
FHWA	Federal Highway Administration
Pavement Texture	Deviation of a pavement surface from a true planar surface within the specific wavelength ranges according to ISO 13473-1
Profile	A two-dimensional representation of a surface which consists of two coordinates: one along the surface plane and the other in a direction normal to the surface plane.



CHAPTER 1

INTRODUCTION

1.1 Research Background

Road surface roughness is a principal excitation to vehicle's chassis system that affect ride comfort, vehicle handling, wear of vehicle components, vehicle operating cost, travel speed and increase of pavement structure deterioration rate.[1][2][3][4][5][6] Therefore, it is an important information for both road management system and suspension design development. Transportation agency uses roughness indices as a primary factor for road maintenance planning and construction approval, whereas automotive industry uses roughness information for vehicle dynamic study and suspension design development. Relationship between International Roughness Index (IRI) and change in fuel consumption in each type of vehicles are shown in Figure 1.1.

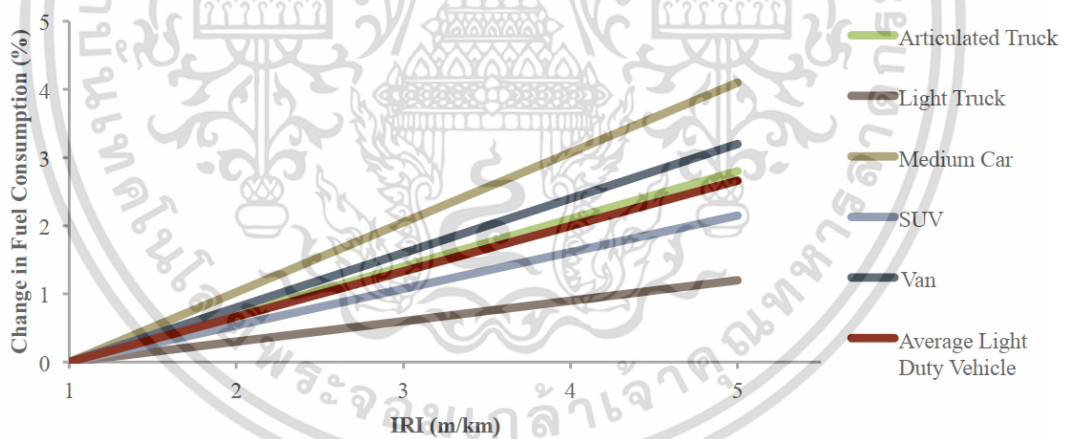


Figure 1.1 Effect of pavement roughness on fuel consumption

In the present time, most car manufactures go into production with being tested in simulations which is not only introduce the standard solution of development processes but also efficient to reduce product cost. The PSD of road roughness comes to enhance in this process for virtual road generation. The sufficient and accurate result

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

can be implemented in various applications such as vehicle fatigue assessment and suspension design.

Most of commercial road profile measurement systems appear in fully equipped instrument vehicles which delicate and expensive. And, some compact devices require permanent modification e.g., bumper drilling for installation. These limit equipment usage within centralized authority and specialize organization. Moreover, the measured roughness information is generally summarized into indices which are convenient for pavement management but does not provide sufficient detail for engineering tasks.

This research presents a non-contact road roughness measurement system consisting of three main sensors including an accelerometer, a point laser and GNSS receiver. Selected road routes in Thailand were collected. Then, straight-line approximations were used to determine degree of unevenness and waviness. Finally, analyzed data were summarized into International Roughness Index (IRI) and validated with ProVAL software and IRI's recorded by department of highway, Thailand. This system will be beneficial to vehicle design development especially for autonomous vehicles which can automatically adjust suspension characteristics in advance when road condition is known.

1.2 Research Objectives

1. To study road roughness and measuring practices.
2. To develop a road roughness measuring system.
3. To analyze road roughness from measured data.
4. To determine degree of roughness and waviness of selected road routes in Thailand.

1.3 Thesis Outlines

The thesis outlines start with the background and important of this research topic. This part introduces general background of road roughness, scope of work, and objectives.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The second part of outline reviews definition of road roughness, road roughness measurement, roughness indices, frequency analysis and profile viewer and analyzer (ProVAL) software.

In the next chapter is represent the methodologies used in this research, including details of measurement system, data collection method, road profile determination, road elevation spectrum parameters determination and roughness index calculation.

Chapter 4 is shown the test result and discussion. This chapter split into 4 parts. First, relationship between vehicle velocity from GNSS receiver and OBD II. The next section is road surface elevation calculation. Then, road elevation spectrum parameters. And lastly, the international roughness Index (IRI).

Chapter 5 provides the conclusion of this study and recommendation which hopefully will be beneficial to people who interested in road profile measurement and analysis.

CHAPTER 2

LITERATURE REVIEW

2.1 Road Surface Texture and Roughness

Nowadays, road surface is one of the most significant factors in road management system and suspension design development. Various characteristics of road pavements create interactions between the road surface and vehicle tires that can have an impact on aspects of road safety, road maintenance, and its efficiency that are both directly and indirectly related. As a result, the geometry of the road surface is an important consideration

Road surface is usually presented in a two-dimensional representation, called road profile. The road profile consists of two coordinates: one along the surface plane, called distance, and the other in a direction perpendicular to the surface plane, called vertical displacement. The distance relates to the travel direction on a pavement and can be measured in the longitudinal or transverse direction.[7] Thus, the road profile can be depicted as shown in Figure 2.1

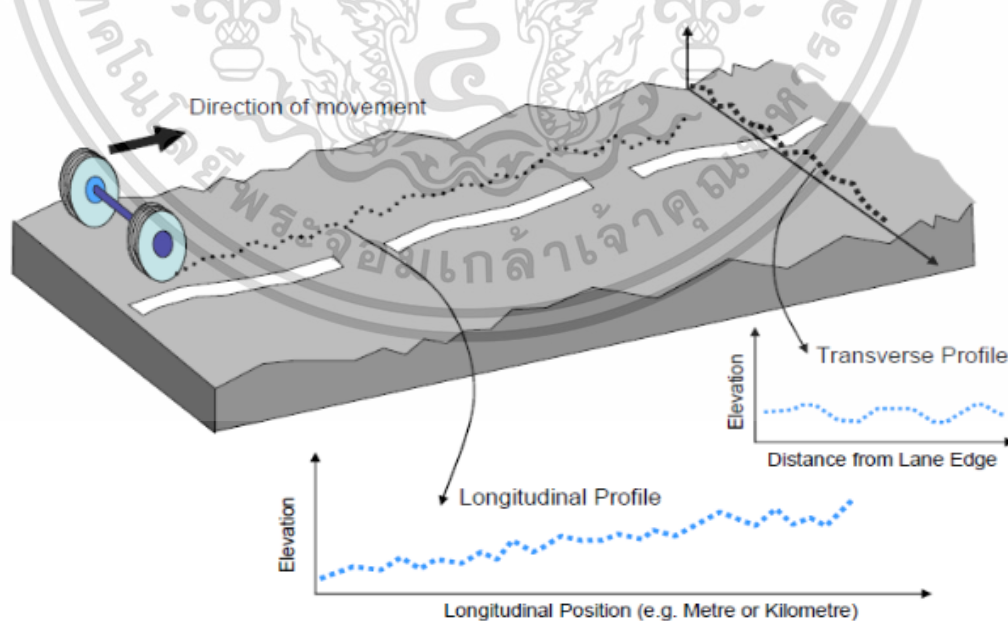


Figure 2.1 Longitudinal and transverse profile [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

According to the World Road Association (PIARC), road surface texture is defined as the deviation of a pavement surface from a true planar surface, which can be classified by wavelength (λ) of irregularities into four categories.

Firstly, microtexture has a wavelength less than 0.5 mm, influencing tire wear and tire/road friction. Secondly, Macrotexture with a wavelength of 0.5 to 50 mm can affect tire and road friction, rolling resistance, and noise. Thirdly, megatexture with a wavelength of 50 to 500 mm is usually created by potholes or ripples in the surface, which have influences on rolling resistance, vehicle wear, and noise. Lastly, Roughness, or mostly called unevenness in Europe, with a wavelength greater than 500 mm, or the range of 0.5 m to 50 m, has an influence on road users' perception of discomfort, vehicle wear, and rolling resistance.

As shown in Figure 2.2., the road geometry, especially surface texture wavelength, is an essential role to display the interaction between the surface and vehicles, which influences both desirable and undesirable phenomena. Thus, studying road surfaces can be a threshold that assists in designing appropriate road infrastructures that can portray the balance of the opposing performance in each wavelength field, reducing unacceptable phenomena and increasing acceptable ones.[9]

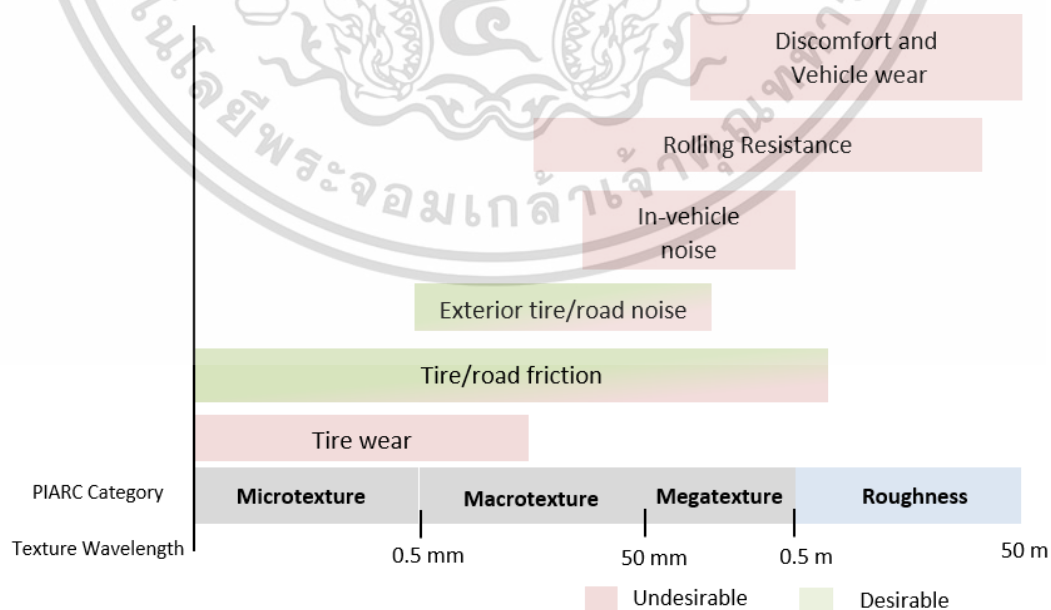


Figure 2.2 Road texture wavelength and their effects on vehicle[9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

According to Figure 2.3, the relationship between road texture, wavelength, and actual road surface is displayed. megatexture is presented at 50 times of magnification, meanwhile, microtexture is noticeable at 5 times of magnification from megatexture.

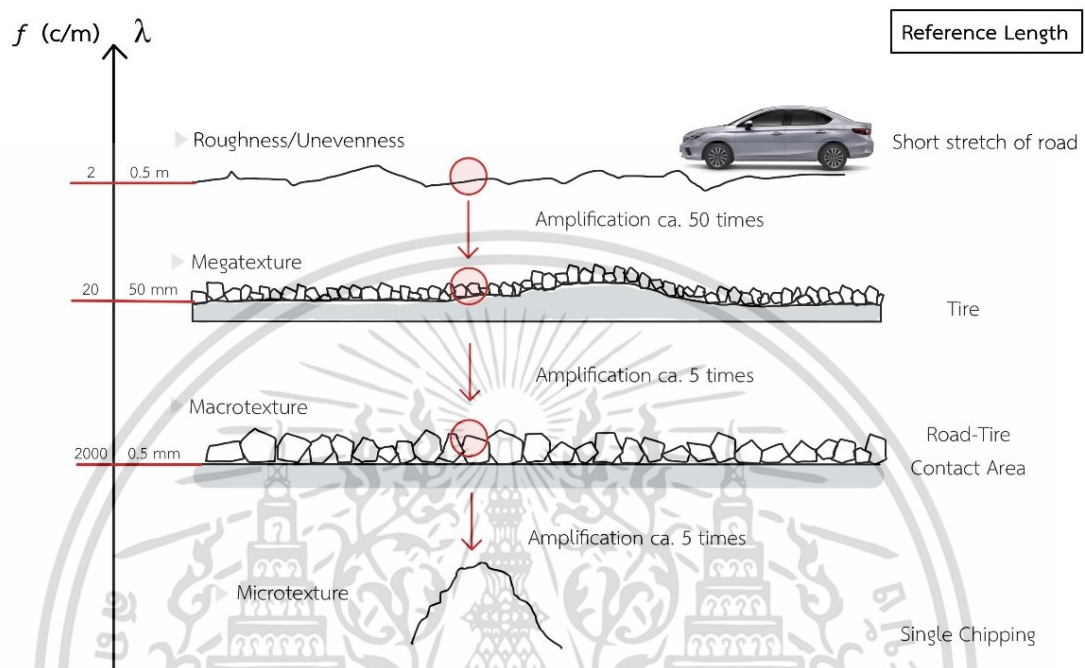


Figure 2.3 The amplification of road surface texture and its wavelength

2.2 Road Roughness Measurement

The important indicator of road condition and ride quality is road roughness. Road roughness measurement is crucial to both car manufacturers and government agencies. For the production and testing of vehicles, Road roughness is a factor in the creation of virtual roads, which can produce results that are sufficient and accurate for use in a variety of applications such as vehicle fatigue assessment and suspension design.

The measuring of road roughness also benefits the government agencies by assisting them in assessing road conditions and manage road maintenance in a timely manner. This preventive work helps government agencies lower expenditures associated with poor road conditions, such as car accidents, fuel efficiency and vehicle maintenance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In the past, pavement monitoring was time-consuming, partly due to the lack of available technology in monitoring systems. Furthermore, the pavement monitoring procedure was also expensive and insufficiently accurate. However, the growth of information and sensing technologies during the middle of 20th century led to the development of advanced monitoring systems.[10]

There are many equipment and techniques for roughness data collection. There are five main categories of road roughness measurement techniques as shown in Figure 2.4

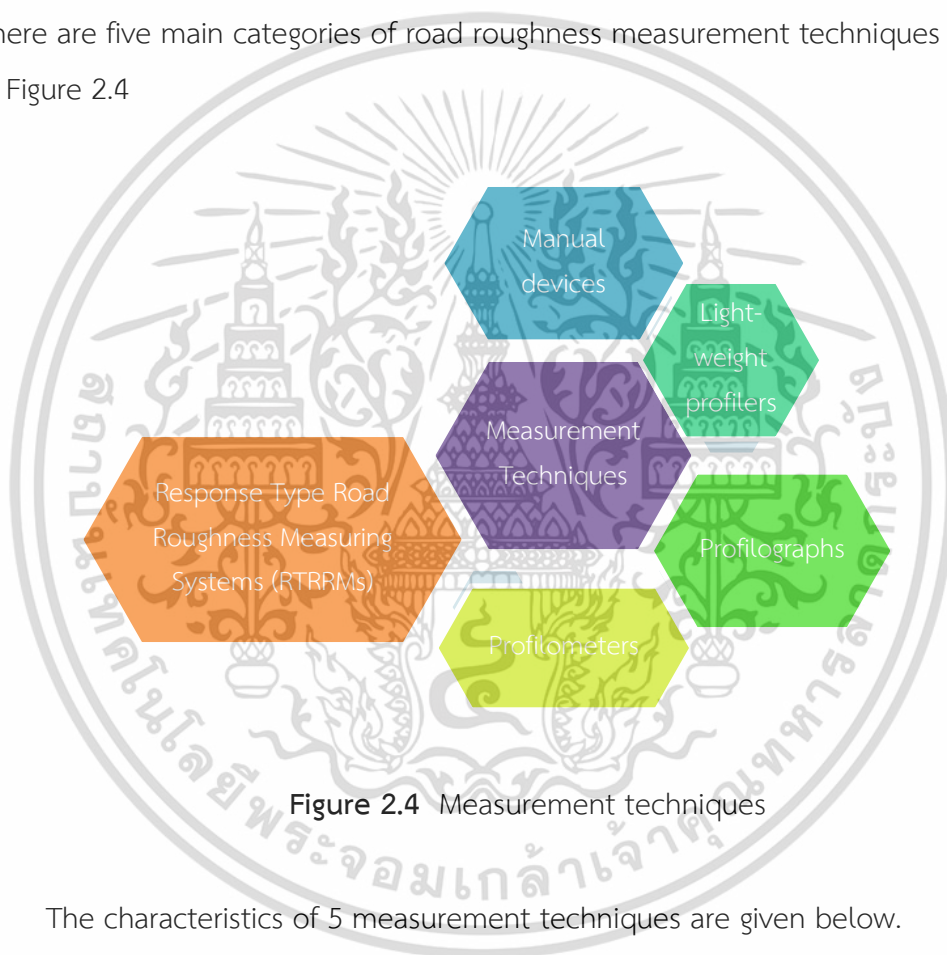


Figure 2.4 Measurement techniques

The characteristics of 5 measurement techniques are given below.

1. **Manual devices:** A section road profile data is typically collected by manual devices such as a road and level survey, an ARRB walking profiler, a dipstick etc. it is used to be verified by road profilers.
2. **Light-weight profilers:** The profiling equipment as same as high-speed profilers is installed on vehicle (e.g., terrain vehicle, golf car). It is used to evaluate new constructions.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. **Profilographs:** it consists of a sensing wheel system that is mounted to provide free vertical movement on the frame. The deviation against a reference plane is automatically recorded on graph paper by the sensors. These devices are applied to provide accurate and complete reproductions of the pavement profile within a certain range.
4. **Profilometers or Inertial Profiler:** it was invented by South Dakota Transportation in 1980s.[11] the device basically consists of height sensors, accelerometers, and distance measurement system. The most often non-contact height sensor for roughness data on highway networks are ultrasonic, infrared, spot laser or laser sensors. They are suitable to collect roughness data on highway network.
5. **Response Type Road Roughness Measuring Systems (RTRRMs):** RTRRMs, also known as "road metres," are sufficient for routinely monitoring a pavement network and giving a broad overview of the network's condition and maintenance requirements. The system provides a strip chart plot of the actual axle body movement versus the time of travel.

In Thailand, aside from visual inspection, Department of Highway (DOH) use four roughness measurement devices comprising of Dynatest Road Surface Profiler Mark III, ARRB HAWKEYE 2000 SERIES, walking profiler SSI CS 8800, and ROMDAS.

Dynatest Road Surface Profiler (RSP) Mark III the device is designed to provide advanced, automated, high-quality pavement longitudinal and transverse profile measurements. The RSP Mark III can assess longitudinal profile, International Roughness Index (IRI), Ride Number (RN), transverse profile, rut depth, macro texture, and road geometrics (crossfall, curvature, and gradient) in real-time continuous highway speed. It can also record GNSS data and digital photo logs.[12]



Figure 2.5 Dynatest RSP Mark III

ARRB HAWKEYE 2000 SERIES The system is customized and made up of a geometry module, asset and pavement cameras, a vehicle-mounted profiler that can capture longitudinal profile, rutting, roughness (IRI), and macrotexture (MPD and SMTD) data. The Bang Pa-In-Nakhon Ratchasima Intercity Motorway (M6), one of DOH's new expressways intended to increase road accessibility and user safety, is monitored by the Hawkeye systems.[13]



Figure 2.6 ARRB HAWKEYE 2000 SERIES[13]

The CS8800 Walking Profiler it is an inclinometer-based system with high repeatability. Compared to a unit mounted on a vehicle, the walking platform allows the user more control while moving more slowly. The CS8800's repeatability exceeds 99% on a variety of surface types, which is necessary for a benchmark profiler.[14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Figure 2.7 The CS8800 Walking Profiler[14]

ROMDAS It is a modular system developed by Data Collection Ltd. (DCL). The system is designed to collect asset, pedestrian, and road data, for instance roughness, rutting, cracking, and road geometry, by using laser projectors and advanced options to create a high-resolution 3D image. The device can accommodate traffic lanes with widths of up to 4 m. ROMDAS can operate on both paved roads and unpaved roads.[15]



Figure 2.8 DOH's equipped vehicle with ROMDAS

Source: shorturl.at/lptX5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 Roughness Indices

One of the criteria used to evaluate the quality of pavement is roughness. There are three main categories can be used to classify the standard unit. First, a profile numeric which is derived directly from the absolute profile of road surface elevations in one or more-wheel paths by using a mathematical function. However, there will be some inaccuracy when the profile is measured dynamically. The second is a summary numeric which is measured by using response type systems calibrated to a profile or other numeric by correlation. The third category is subjective ratings of riding quality or pavement serviceability which are often conducted by a group of raters using a scale that is determined by subjective descriptors.[16]

The most approved measurements used to depict a general or unusual quality of the road pavement are the Pavement Condition Index (PCI), International Roughness Index (IRI), Ruth Depth (RD), and Pavement Serviceability Index (PSI). Each type of index applied different measurement methods in order to evaluate and represent various conditions of road surface as shown in Table 2.1.[17]

Table 2.1 Indices review for road pavement surface evaluation[18]

Index	Information	Measurement	Survey Method
PCI	Pavement surface	Type, severity, amount of distress	Visual inspection
IRI	Ride quality	Roughness	Road profile
RD	Deformation	Longitudinal pavement deflection	Road profile
PSI	Ride quality	Functional performance	Visual inspection

The Pavement Condition Index (PCI) assesses pavement integrity and surface operational condition on a scale of 100, with 100 representing perfect conditions and 0 denoting failed conditions. The method, developed by the U.S. Army Corps of Engineers, has been adopted as standard procedure by many organizations worldwide. It ensures consistent and reliable outcomes but requires extremely exact input data. Additionally, it requires a lot of time and is susceptible to the human capacity for distress detection.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Rut Depth (RD) measures the longitudinal pavement deflection along the wheel path as a consequence of the accumulation of visco plastic deformations in layers and subgrade. It is a significant indicator that is related to road safety, because, during rainy weather conditions, a high rutting level can facilitate the hydroplaning phenomenon and loss of vehicle control. Although RD measuring is straightforward, good data capture accuracy is required. It can be estimated from profiles that are obtained using any legitimate measurement technique, from high-speed inertial profiling devices to static rod and level measuring equipment.

The Present Serviceability Index (PSI) is a measure used to describe how well the pavement functions in terms of ride quality. It gives an assessment of the road's capacity to handle traffic and considers a number of road-related factors, including slope variance, rut depth, cracking, and patching surface.

The International Roughness Index (IRI) was developed by the World Bank in 1980 as a standardized roughness measurement providing a ride quality classification in terms of the longitudinal profile traveled by a wheel path. The IRI is defined as the filtered ratio of the accumulated deviation of the vehicle's suspension divided by the traveled distance. Because pavement roughness is one of the factors that contribute to load loss incidents, it has a direct impact on ride quality, comfort, and safety. A higher IRI value indicates a rougher road surface. Relationship between estimated ranges of IRI and road type is shown in Figure 2.9. In the 1990s, The ASTM E1926 standard put forward a method to evaluate IRI from pavement roughness. The simulation of a quarter vehicle traveling at an average speed of 80 km/h is used to calculate IRI from pavement roughness by recording the motions of the vehicle's suspension system along the vertical direction using displacement measurement equipment.[18]

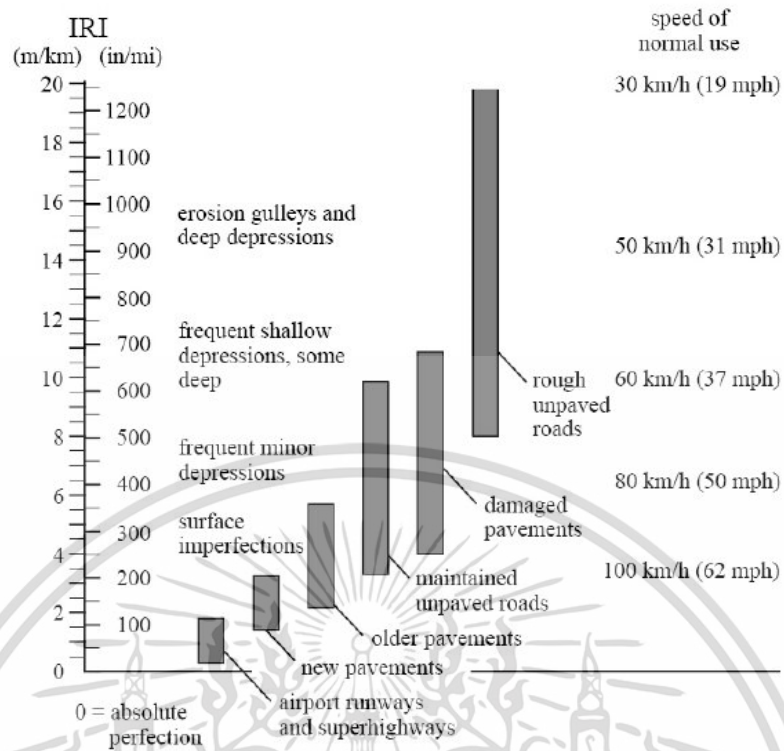


Figure 2.9 International Roughness Index (IRI) scale[19]

In Thailand, the Department of Highway adopts IRI as an indicator for road maintenance and construction approval. According to Table 2.3, the criteria of road roughness are used to evaluate the surface condition. For asphalt concrete, maintenance is required when IRI is higher than 2.0 m/km, whereas concrete requires upkeep at 2.5 m/km. For newly constructed, the IRI have to be lower than 2.0 m/km for asphalt concrete and 2.5 m/km for concrete.[20]

Table 2.2 Road roughness criteria of Department of Highway, Thailand

Road Roughness Evaluation	
IRI (m/km)	Condition Term
1.0 – 2.0	Very Good
2.0 – 3.0	Good
3.0 – 3.5	Fair
> 3.5	Poor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 Frequency Analysis of the Road Surface Roughness

The road surface roughness, as a stochastic process, is typically described by the power spectral density (PSD) function in a frequency domain, and is typically thought of as a zero-mean stationary (or isotropic) and ergodic Gaussian process in engineering practice [21]. The Fourier transform can be adjusted such that it shows how the variance of the profile is distributed over a set of sinusoids. When adjusted in this way, the transform is called a power spectral density (PSD). [22]

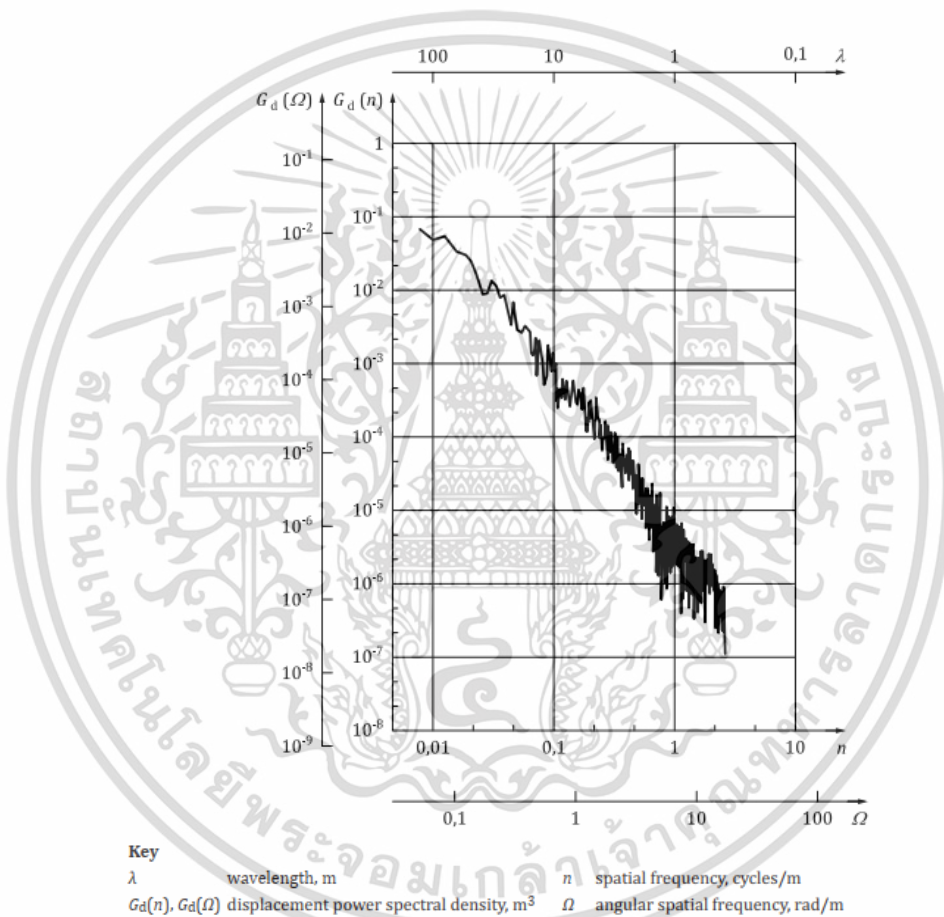


Figure 2.10 PSD of road profile [23]

Figure 2.10 shows the PSD of road profile (G_d) in three different domains: wavelength (λ) m, spatial frequency (n) cycle/m and angular spatial frequency (Ω) rad/m. The relationship between PSD of road profile in spatial frequency (n) and angular spatial frequency (Ω) is expressed in (2.1).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_d(n_0) = 2\pi G_d(\Omega_0) \cdot \left(\frac{\Omega_0}{2\pi n_0}\right)^2 = 16G_d(\Omega_0) \quad (2.1)$$

Where G_d = PSD of road profile
 n_0 = Reference spatial frequency, is equal to 0.1 cycle/m
 Ω_0 = Reference angular spatial frequency, is equal to 1 rad/m

The PSD approximation is a useful description of road roughness level because of conciseness. Although it is usually simply approximated using only a few parameters, the PSD can be used directly in vehicle dynamics and as a basis for road profile generation.[24] All approximations to the PSD found in the literature was presented in Table 2.3. And, the general behavior of all presented approximations is illustrated in Figure 2.11.

Table 2.3 Approximations of road profile roughness spectra[24]

Name	PSD approximation	Wavenumber
ISO (1995-09-01)	$G_d(n) = Cn^{-w}$	$0 \leq n \leq \infty$
BSI (1972)	$G_d(n) = \begin{cases} Cn^{-w_1} \\ Cn^{-w_2} \end{cases}$	$0 \leq n \leq n_0$ $n_0 \leq n \leq \infty$
Two Split	$G_d(n) = \begin{cases} Cn^{-w_1} \\ Cn^{-w_2} \\ Cn^{-w_3} \end{cases}$	$0 \leq n \leq n_1$ $n_1 \leq n \leq n_2$ $n_2 \leq n \leq \infty$
Sayers (1986)	$G_d(n) = C_1/n^2 + C_2/n^2 + C_3$	$0 \leq n \leq \infty$
Gillespie (1985)	$G_d(n) = C(1 + (0.066/n)^2)/n^2$	$0 \leq n \leq \infty$
Marcondes et al. (1991)	$G_d(n) = \begin{cases} C_1 \exp(-kn^p) \\ C_2(n-n_0)^q \end{cases}$	$0 \leq n \leq n_0$ $n_0 \leq n \leq \infty$
Sussman (1974)	$G_d(n) = \frac{C}{\alpha^2 + n^2}$	$0 \leq n \leq \infty$
Macvean (1980)	$G_d(n) = \frac{C}{(\alpha^2 + n^2)^2}$	$0 \leq n \leq \infty$
Sussman (1974)	$G_d(n) = \frac{C(n^2 + \alpha^2 + \beta^2)}{(n^2 + \alpha^2 + \beta^2)^2 + 4n^2\alpha^2}$	$0 \leq n \leq \infty$
Xu et al. (1992)	$G_d(n) = A/2a \exp(-n^2/(2a)^2)$	$0 \leq n \leq \infty$
Kozin and Bogdanoff (1961)	$G_d(n) = A/a \exp(-n^2/a^2)$	$0 \leq n \leq \infty$

Note: $C, C_1, C_2, C_3, p, k, q, \alpha$ and β are real positive constants

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

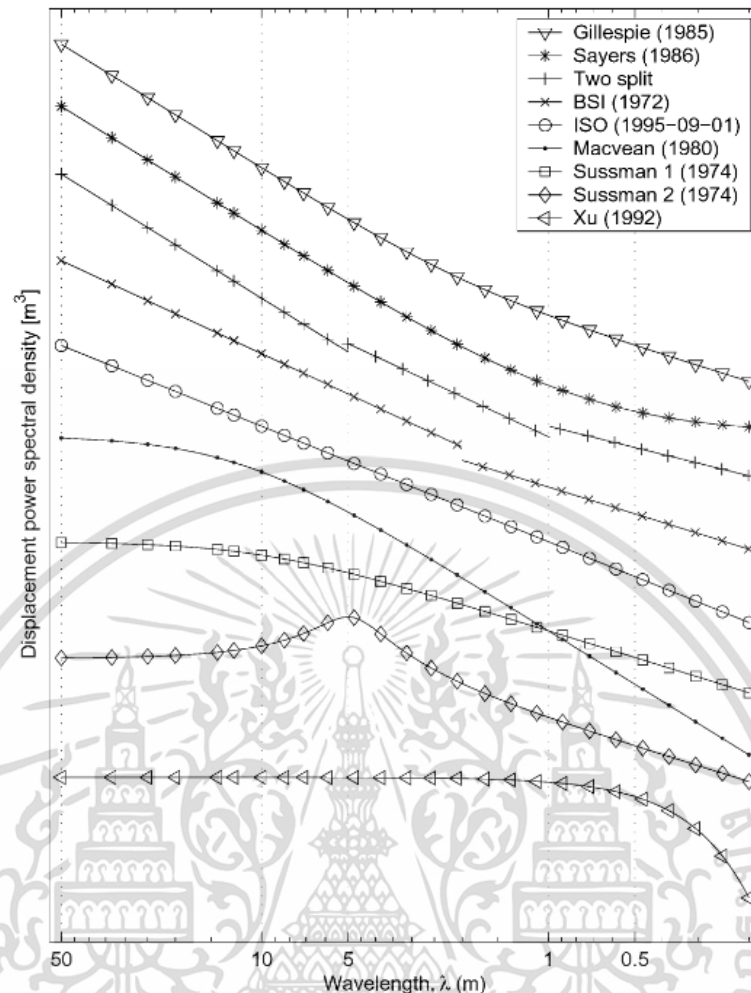


Figure 2.11 General behavior of the PSD approximations[24]

In the reviewed literature, the percentage of authors that use and the British Standard Institution (BSI) proposal can be estimated at 10-20% in 27 randomly selected scientific papers.[24] The majority still follows the International Standardization Organization (ISO) because of its simplicity. Similar to the BSI, the ISO proposal characterized by two spectrum parameters called unevenness index (C), referred by ISO with degree of roughness, and waviness (w). The unevenness index (C) is proportional to the roughness of the surface, and waviness (w) indicates the wavelength content of the pavement surface. Both BSI and ISO use constant waviness of 2.0 to classify road roughness.[25]

The ISO or ISO 8608 standard was developed to provide standardized method of comparing longitudinal road profile in term of PSD. The relationship between the threshold values of the unevenness index (C) and waviness (w) can be shown as a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

straight line in a log plot, namely fitted PSD, with the assumption that the vehicle travel at a constant speed. The ISO also suggests approximating the PSD with specific frequency bands consisting of one-third, one-twelve and one octave bands in the range of 0.0014 – 8.2344 cycle/m to avoid over-emphasizing the fluctuations of the PSD at high frequencies when it being plotted in a log-log diagram. The fitted PSD value at reference frequency, 0.1 cycle/m or 1 rad/m, is defined as the unevenness index (C). ISO 8608 used unevenness index (C) to classify road roughness level into classes: A – F. The A-class road is the smoothest while the F-class is the roughest.[23] The relationship between road classes and unevenness index (C) is shown in Table 2.4 and ISO 8608 road classification in a log-log diagram is shown in Figure 2.12.

Table 2.4 ISO 8608 values of $G_d(n_0)$ and $G_d(\Omega_0)$

Road Class	$G_d(n_0) (10^{-6} m^3)$		$G_d(\Omega_0) (10^{-6} m^3)$	
	Lower Limit	Upper Limit	Lower Limit	Upper Limit
A	-	32	-	2
B	32	128	2	8
C	128	512	8	32
D	512	2048	32	128
E	2048	8192	128	512
F	8192	32768	512	2048
G	32768	131072	2048	8192
H	131072	-	8192	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

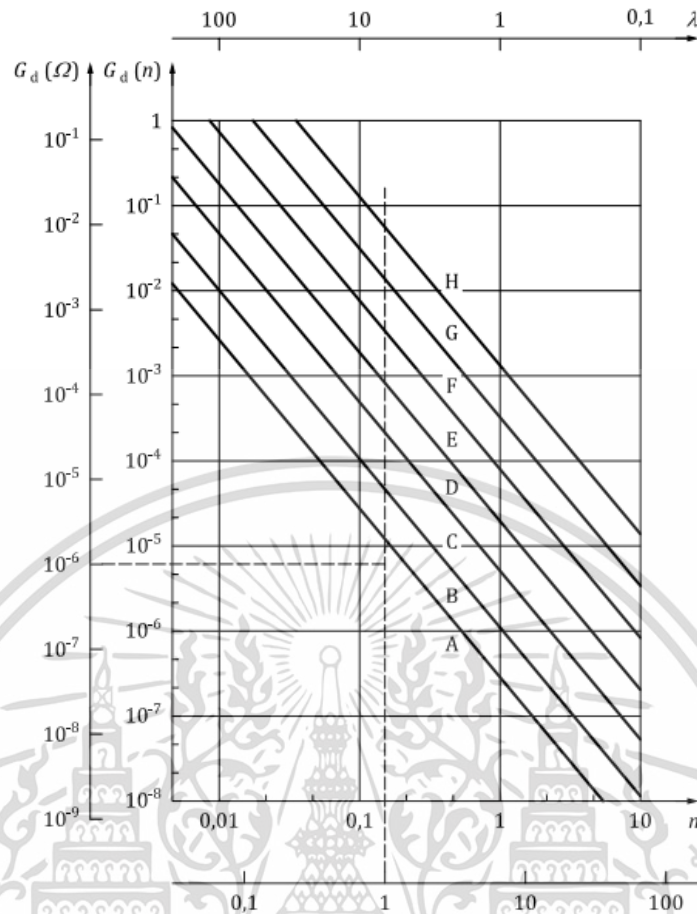


Figure 2.12 ISO 8608 Road Classification

Although the International Roughness Index (IRI) is the most popular used, especially for the road network maintenance management systems, it cannot provide sufficient information for analytical description. Therefore, power spectral density (PSD) of road roughness is still required. KROPÁČ and MÚČKA studied and proposed relationship between IRI and roughness spectrum parameters based on simulation. The relationship is represented in equation(2.2). [26][27]

$$\text{IRI} = 2.21 * \sqrt{C} * \exp(-0.35\Delta w + 0.13(\Delta w)^2) \quad (2.2)$$

Where

- IRI = Estimated IRI
- C = Unevenness index
- w = waviness
- Δw = $w - 2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 Profile Viewer and Analyzer (ProVAL) Software

Profile Viewer and Analyzer (ProVAL) is a free engineering software application sponsored by the Federal Highway Administration (FHWA) in the US. The software is developed to assist user to view and quickly analyze road profile characteristics including ride quality indices and power spectral density (PSD) with Butterworth filter. However, the software has limitation. The software could import only road profile data and cannot approximate PSD to determine unevenness index (C) and waviness (w). Therefore, raw data from road roughness measurement sensors such as laser and accelerometer are needed to be processed in other software to calculate road profile before importing to the software. And, PSD approximation is needed to be done in other software too if unevenness index (C) and waviness (w) are required. Figure 2.13 and Figure 2.14 show appearances of the software in road profile viewing and IRI analysis window, respectively. Further detail of ProVAL can be found in appendix E.

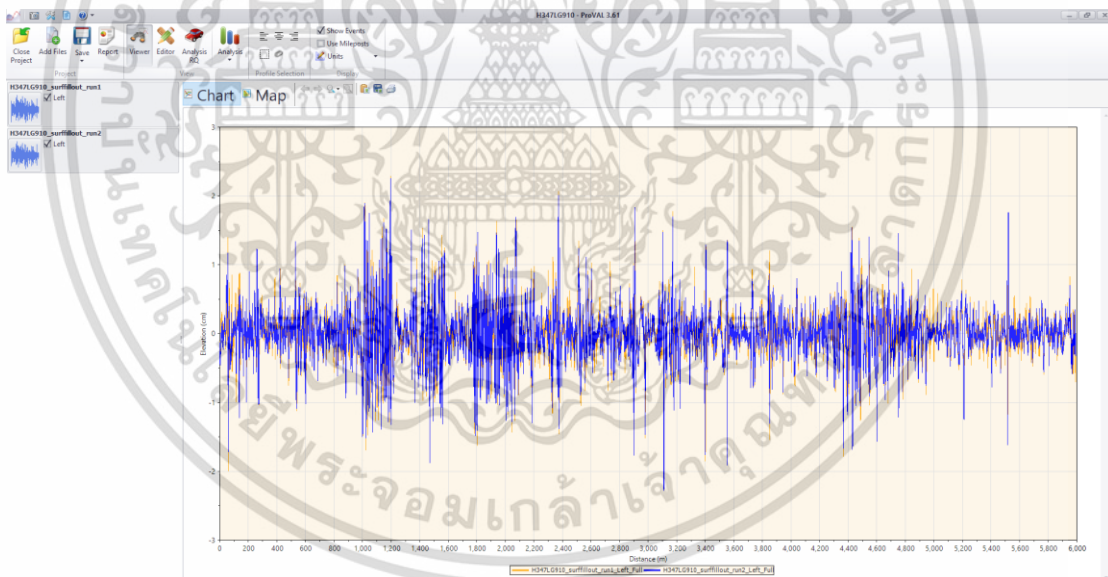


Figure 2.13 ProVAL: Road profile viewer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

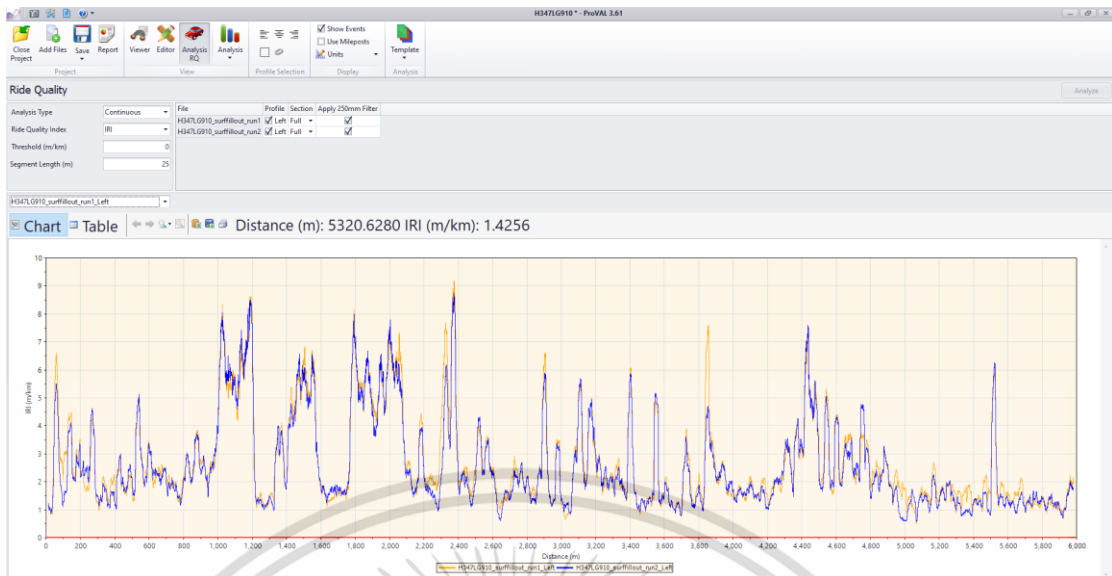


Figure 2.14 ProVAL: Ride quality

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHAPTER 3

RESEARCH METHODOLOGY

This research divided into 5 sections: measurement system, data collection, road surface profile determination, road elevation spectrum parameters determination, and road roughness index determination. Each section is explained in detail in the following subsection.

3.1 Measurement System

The inertial profiler's principle is adopted in this research prototype as it is an efficient measurement method in both performance and cost. The availability of a wide range of accelerometers and lasers is also convenient. The principle can be explained by a simple situation where vehicles respond to a step on the road surface. The vehicle body keeps its balance at a slight elevation above the road surface before interacting with the profile step. The wheel is raised together with the car body when it comes into contact with the step. The body adopts a damped periodic motion until it once more reaches its equilibrium position, depending on the characteristics of the vehicle suspension.[11]

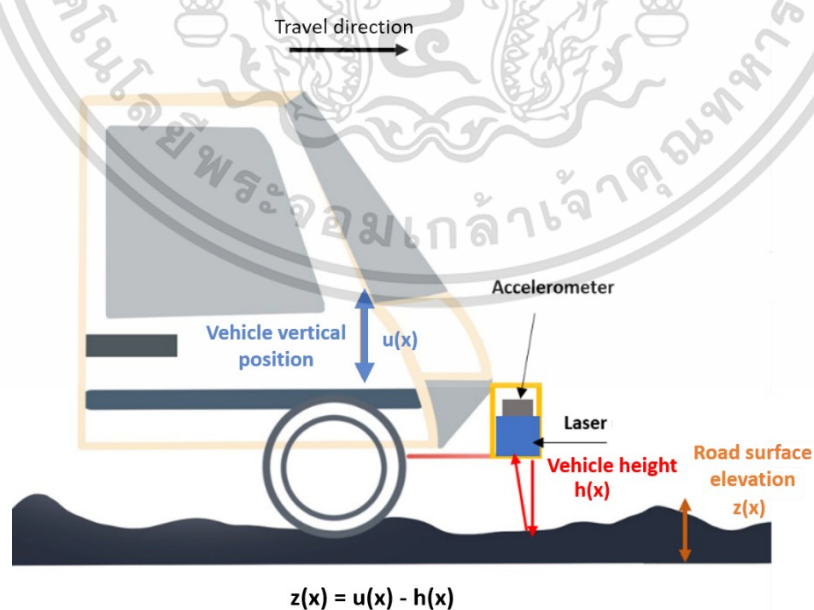


Figure 3.1 Inertial profiler measurement concept

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Overview of road profile measurement concept is presented in Figure 3.1. The curve, $u(x)$, where x is the roadway distance coordinate, represents the record of the vehicle's vertical position. The gap between the vehicle reference point and the road surface, or the vehicle height above pavement, $h(x)$, is dependent on both the profile and the mobility of the vehicle. The height is the equilibrium distance before the step is encountered; from the moment the reference point is above the step until the vehicle's periodic motion is entirely damped, the height changes and is influenced by both the height of the profile step and the response of the vehicle. Eventually, the equilibrium height is once again reached. The road surface elevation $z(x)$ can be computed using formula, as shown in equation (3.1), if both $u(x)$ and $h(x)$ can be measured.

$$z(x) = u(x) - h(x) \quad (3.1)$$

where

$z(x)$	= road surface elevation
$u(x)$	= vehicle vertical position
$h(x)$	= vehicle height

Technically, vehicle's vertical position $u(x)$ cannot be directly measured. Instead, the method used accelerometer to measure vehicle's vertical acceleration and then using numerical integration method to obtain vehicle's vertical position $u(x)$. The further detail of the method is explained in section 3.3.

A 2012 Honda City was used in this experiment. Sensor installations and measurement system wiring are shown in Figure 3.2 and Figure 3.3, respectively. The sensor module was installed 45 cm above the front left wheel path, outside the vehicle. A point laser and a z-axis accelerometer were placed perpendicularly flat and completely fixed inside the sensor module so that the accelerometer would fully reflect the sprung vibration of the car. Antennas were placed on the vehicle's roof, providing vehicle speed and localization. OBD II port was plugged for data logging. The system is powered by a 12-volt DC battery.

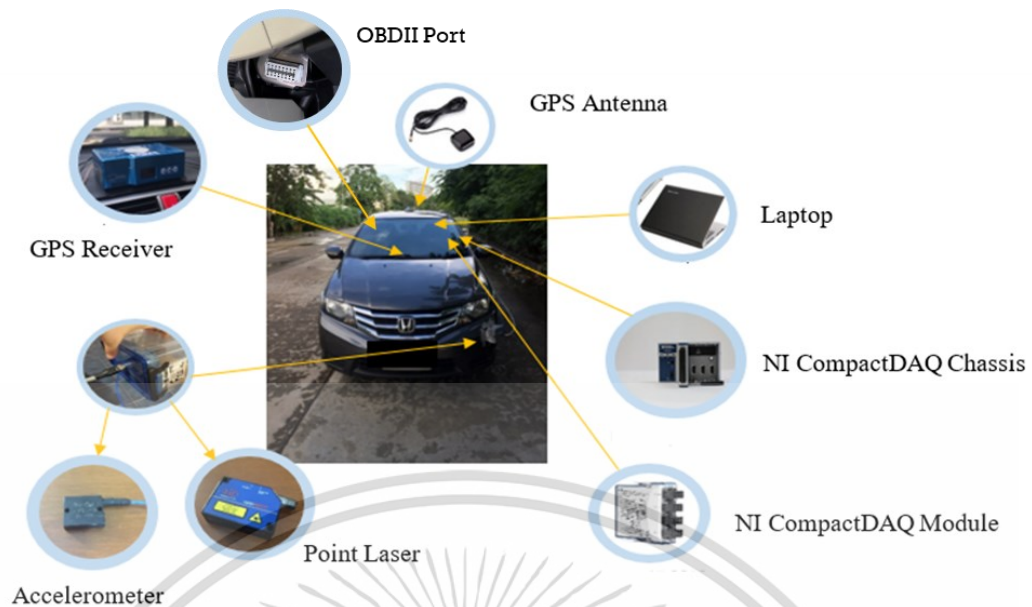


Figure 3.2 Testing vehicle and installed equipment

The parameters selected for retrieval are presented along with justification for installed equipment selection as the following.

The vehicle speed is a key parameter to be associated with the roadway distance coordinate, or travel distance. In this study, two different sources were used to obtain vehicle speed: GNSS-based equipment (VB20SL3) and the vehicle's embedded speed sensor. VB20SL3 is a doppler effect-based equipment with a 20Hz update rate, while the vehicle speed sensor calculates speed based on the rotation speed of the vehicle wheels, which is reported directly from the vehicle engine through the Controller Area Network (CAN) protocol. Theoretically, the vehicle's embedded speed sensor data can be retrieved by using the On-Board Diagnostics (OBD) system (version II), called OBD-II. When there is no GNSS signal, for example, due to atmospheric disturbances, GNSS antenna failure, or electromagnetic interference, the OBD-II port keeps the system gaining vehicle speed.

Vehicle height above the road surface is measured by a 600-mm measurement range laser, ILD 1402-600. The accelerometer, PCB piezotronics model 3741B122G, with $\pm 2g$ measurement range and 1000 mV/g is used to obtain vehicle vertical position. These parameters are used to estimate the road surface elevation. Data from all devices was recorded to the computer via NI chassis (NI 9874) and NI modules.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Information from accelerometers and lasers was logged with analog modules: NI 9205 and NI 9219, respectively, whereas data from the GNSS receiver and OBD II were logged via the CAN module (NI 9862).

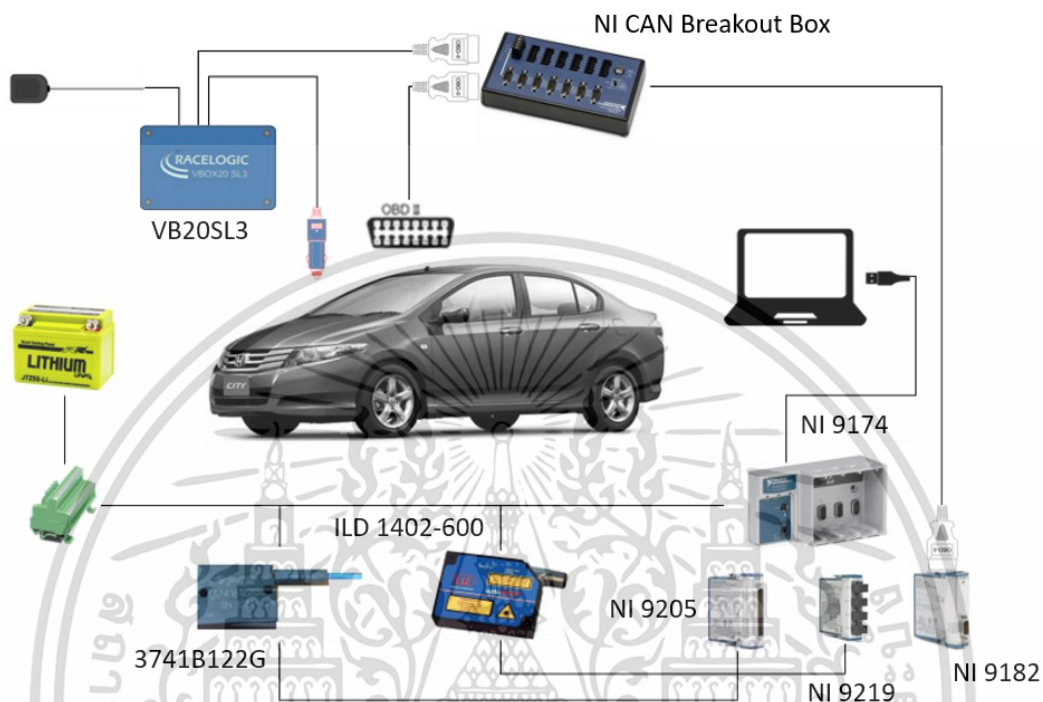
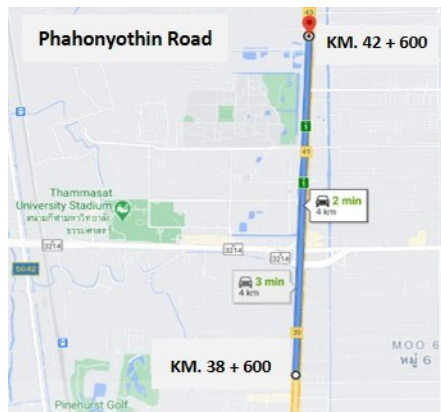


Figure 3.3 Measurement system and wiring

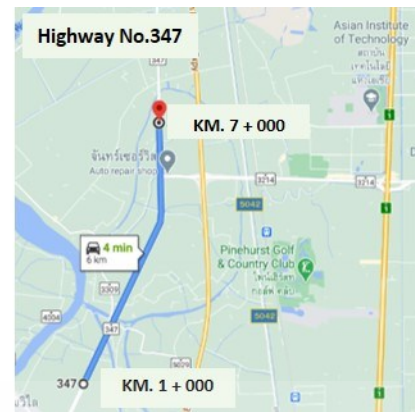
3.2 Data Collection

In Thailand, heavy vehicles typically use the left lane, and the amount of traffic is correlated with how quickly the road surface are deteriorated. As a result, the left lane is usually the one that has the highest damage. According to this assumption, the left lanes of two national highways in Pathum Thani province were chosen for the experiment, including Highway 1 (Phaholyothin Road) from 39+000 km to 42+000 km or H1L, Highway 1 from 42+000 km to 39+000 km or H1R, Highway 347 from 1+000 km to 7+000 km or H347L, and Highway 347 from 7+000 km to 1+000 km or H347R. The Highway 1 (H1) is one of the major highways connecting Bangkok to outlying regions, while the Highway 347 (H347) is a secondary highway connecting one province to another. The tested routes are shown in Figure 3.4.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) Route H1L and H1R

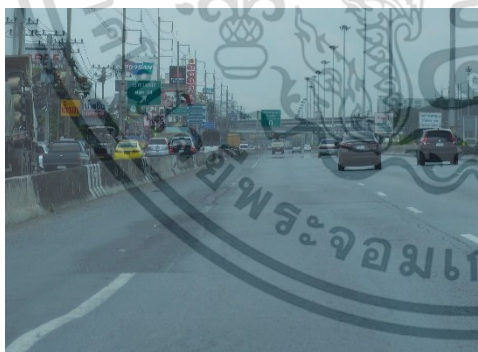


(b) Route H347L and H347R

Figure 3.4 Tested Route

Source: Google. (n.d.). [Google map of Data collecting route]. Retrieved April 26, 2022, from https://www.google.com/maps/d/u/1/edit?hl=th&mid=1gs93_krjkUw0eM0hs7JkhK_L2C-ajF5d&ll=14.062363485339219%2C100.59513055236886&z=14

All of the selected routes are made of asphalt concrete and are under the responsibility of the Department of Highways (DOH), Thailand. From September 2019 to February 2020, experiments were conducted with a nearly constant speed of 60 km/h and a 1 kHz sampling frequency. The road surface and normal traffic conditions of each route are displayed in Figure 3.5.



(a) Route H1L



(b) Route H1R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) Route H347L



(d) Route H347R

Figure 3.5 Photograph of the selected route surface conditions and traffics of each route

The distances of route H1 (H1L, H1R) and H347 (H347L, H347R) are 3 and 6 kilometers, respectively. The experiment with each route was repeated three times. The details of data collecting are shown in Table 3.1 .

Table 3.1 Detail of data collected

Testing Route	H1L	H1R	H347L	H347R	Total
Road Name	Highway 1	Highway 1	Highway 347	Highway 347	
Start of route (Km)	39+000	42+000	1+000	7+000	
End of route (Km)	42+000	39+000	7+000	1+000	
Number of repetitions	3	3	2	3	11
Distance (km)	3	3	6	6	48

However, it was found that one of the three data sets for H347L was unsuccessfully collected because of an unexpected error in the measurement system, which was acknowledged later in the processing process. Therefore, only two data sets of H347L can be used for road surface profile determination and other analysis in the next steps.

3.3 Road Surface Profile Determination

When measured data were imported into MATLAB, data preprocessing was proceeded first. The process includes missing data replacement and noise removing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Butterworth filter were used and cut-off frequencies were designed according to relationship between frequency and speed, as shown in equation (3.2). Spatial frequency (n) is an inverse of road roughness wavelength, which is in the range of 0.5 – 50m. Travel speed (V) is the vehicle speed while collecting data. And, frequency (f) is cut-off frequencies used to filter out unwanted information.

$$f = n \cdot V \quad (3.2)$$

Where f = Frequency (Hz)
 V = Travel speed (m/s)
 n = Spatial frequency (cycle/m)

Secondly, the vehicle's vertical position $u(t)$ was calculated from filtered vehicle's vertical acceleration $a(t)$ by using cumulative trapezoidal numerical integration method. Next, vehicle height $h(t)$ and vehicle's vertical position $u(t)$ were transformed from time domain to roadway coordinate (x), called spatial domain, by using travel distance. Then, road profile $z(x)$ can be estimated by removing vehicle height $h(x)$ from vehicle's vertical position $u(x)$. The process details for road profile determination can be described in Figure 3.6

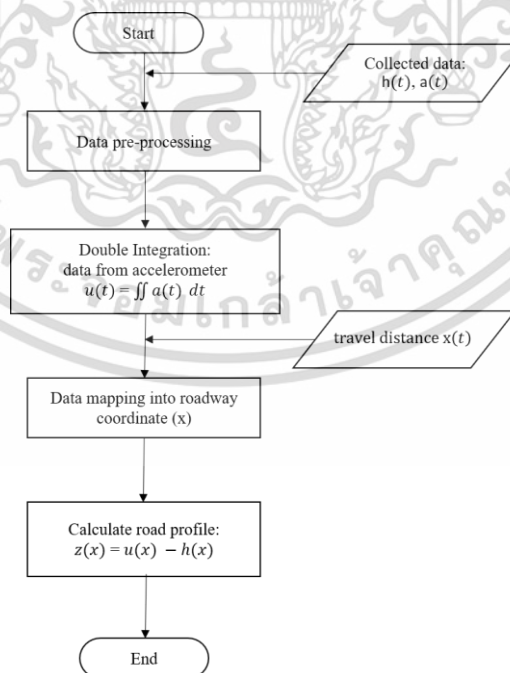


Figure 3.6 Road surface elevation determination process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

As mentioned, cumulative trapezoidal numerical integration method was used to calculate vehicle's vertical position from vehicle's vertical acceleration. In theory, however, applying numerical double-integration directly to acceleration data usually results in a non-linear accumulated error during integration.[28] Therefore, high pass filter and detrending were necessary and carefully used to reduce the error in each process of integration. The cumulative trapezoidal numerical integration method can be shown in Figure 3.7.

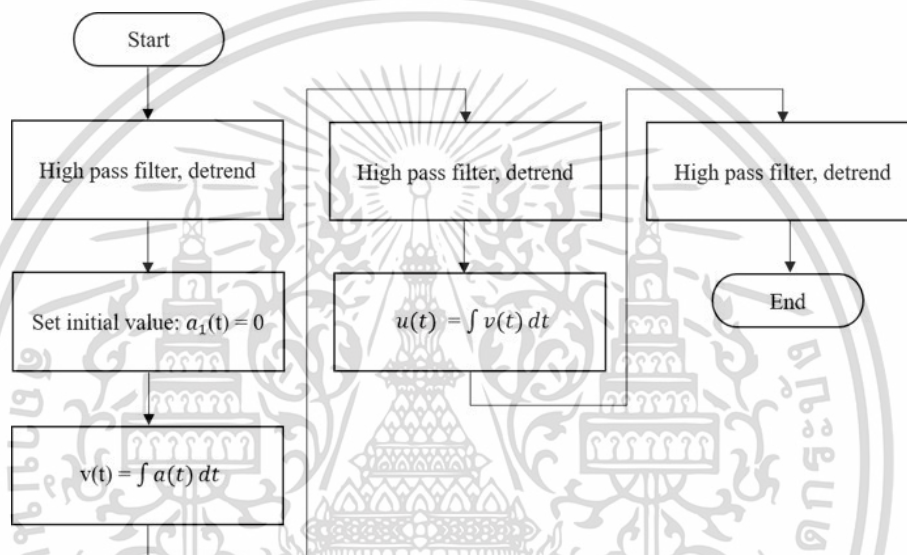


Figure 3.7 Double integration determination process

In a road profile study, data are commonly represented in distance domain, and travelled distance can be calculated by integrating vehicle speed. This system obtained vehicle velocity from two sources: GNSS receiver and via OBD II port. Vehicle speed measured by GNSS receiver is estimated based on the position of the vehicle, meanwhile vehicle velocity logged from the vehicle engine via OBD II port based on the rotation speed of the vehicle wheels. Decoding raw CAN bus to physical values can be challenging. Auto maker doesn't publicly reveal the dbc file and CAN database detail which are needed to identify the data within the CAN frame. The dbc file of commercial car are usually provided by company specializes in CAN-bus based equipment such as RACELOGIC and CSS Electronics. However, with lack of CAN database detail, the velocity logged via OBD II port can be either directly from wheel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

speed sensor or odometer, which the latter is normally set a little higher than vehicle speed. Therefore, vehicle velocity from GNSS receiver and OBD II port were compared and it confirmed that the latter has to be corrected before using.

Experiments were conducted to investigate the relationship between velocity from GNSS receiver (V_{GPS}) and velocity logged through OBDII (V_{OBD}). Honda City year 2012 was used for the experiment at two conditions: nearly constant velocity at 60 km/h and in an accelerating state from 50 – 100 km/h. A positive linear relationship was found in both conditions, as the Pearson correlation coefficient was greater than 0.90. Therefore, corrected factor (a) can be estimated by solving a linear equation and V_{OBD} can be used during the incident of GPS loss by using equation (3.3)

$$V_{corrected} = a \cdot V_{OBD} \quad (3.3)$$

Where

$V_{corrected}$	= Corrected velocity
V_{GPS}	= Vehicle velocity from GNSS receiver (VB20SL3)
V_{OBD}	= Vehicle velocity received through OBDII
a	= Corrected factor

According to the relationship found between the two aforementioned vehicle velocity methods, the system was designed. Satellite signal blockage occurrence was firstly checked by number of detected satellites. If there is no signal loss, V_{GPS} will be used in the next step. Otherwise, $V_{corrected}$ will be used instead. Using the vehicle velocity from the previous process, the traveled distance was then calculated applying the cumulative trapezoidal numerical integration method. Unlike double-integration, the accuracy of numerical single-integration was acceptable, and no further numerical correction was needed. The flowchart of this process is shown in Figure 3.8

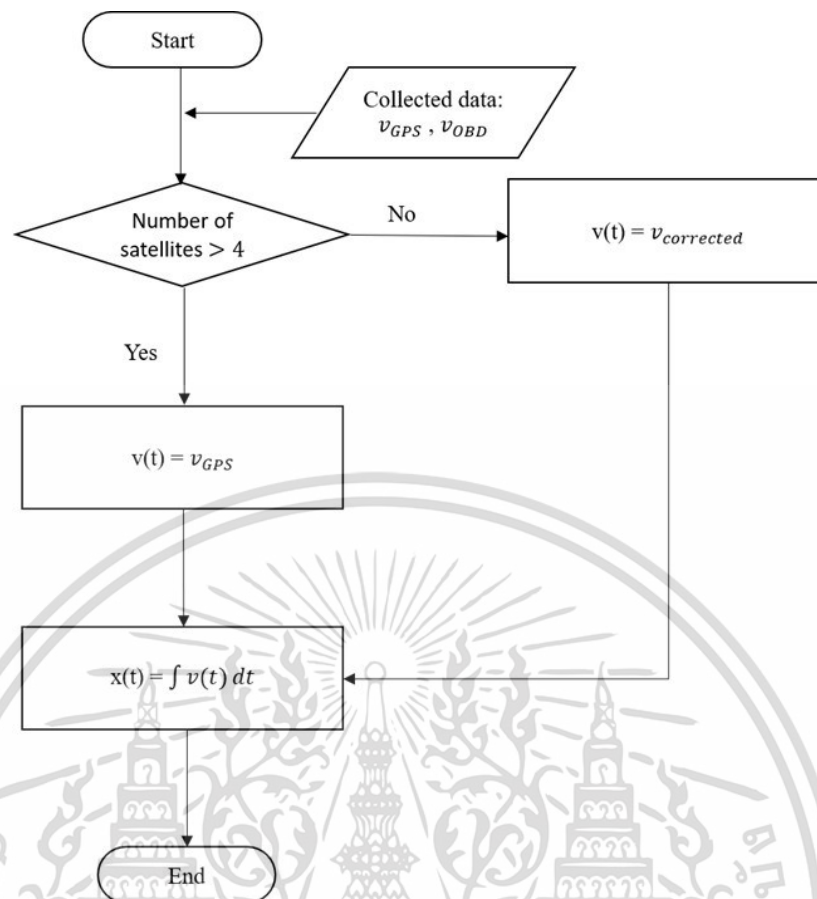


Figure 3.8 Travelled distance determination process

3.4 Road Elevation Spectrum Parameters Determination

The road profile $z(x)$ obtained in section 3.3 was analyzed in spectral analysis by using tool in MATLAB called pwelch. The tool based on averaging overlapped segment known as Welch's technique to reduce variance of the periodogram. Pwelch was set with Hanning window and 50% overlapping. Number of discrete Fourier transform (DFT) points defined according to data length. The frequency of estimated PSD was according to ISO 8608 smooth PSD with specific frequency bands consisting of one-third, one-twelve and one octave bands in the range of 0.0014 – 8.2344 cycle/m. The frequency table is shown in appendix F.

Straight-line approximation based on least square error was performed to simplify PSD into two parameters: unevenness index (C) and waviness (w). According to ISO 8608, unevenness index (C) is the PSD value at reference frequency 0.1 cycle/m or 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

rad/m in angular spatial frequency. The mathematic model is expressed in equation (3.4) and equation (3.5).

$$G_d(n) = C \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w}, \quad C = G_d(n_0) \quad (3.4)$$

$$G_d(\Omega) = C \cdot \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-w}, \quad C = G_d(\Omega_0) \quad (3.5)$$

Where

- G_d = Displacement PSD (m^3)
- n_0 = Reference spatial frequency, is equal to 0.1 cycle/m
- Ω_0 = Reference angular spatial frequency, is equal to 1 rad/m
- w = Exponent of fitted PSD, also called waviness
- C = Unevenness index or roughness coefficient

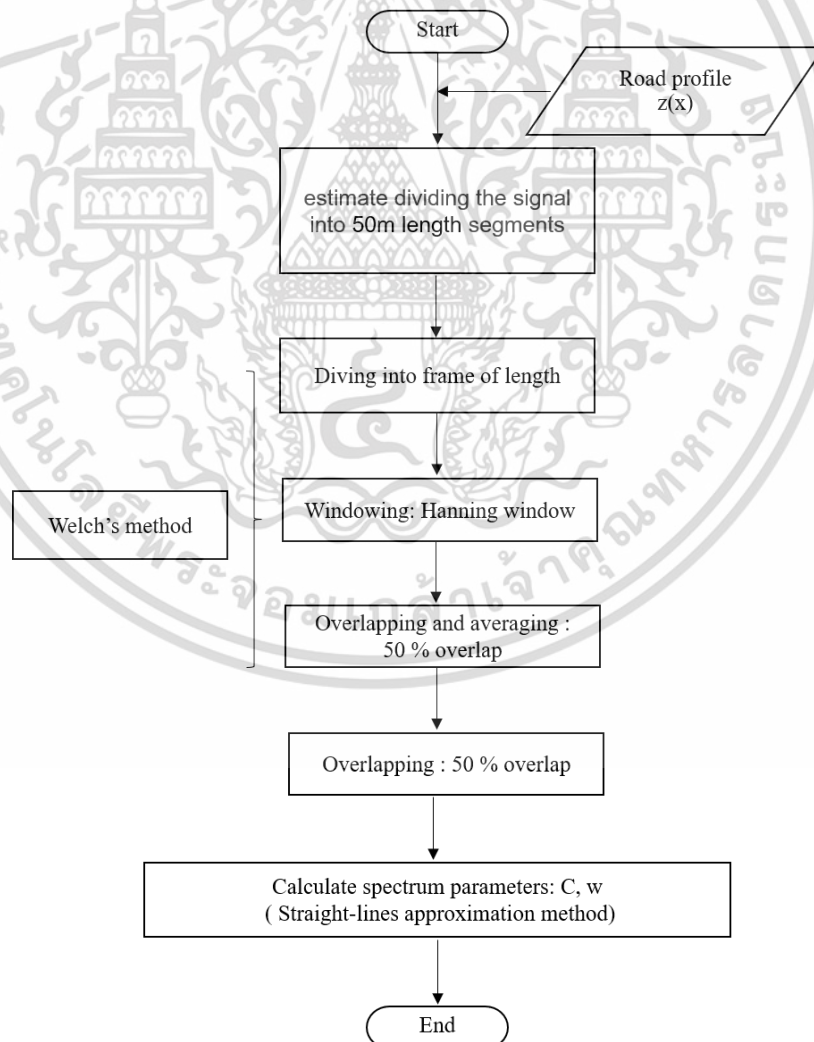


Figure 3.9 Road Surface Elevation Determination Process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The road profile $z(x)$, result from section 3.3, were imported to a well-known software, ProVAL for validation. The comparison of the PSD result between this paper algorithm and ProVAL were presented in section 4.3

3.5 Road Roughness Index Determination

Two methods of IRI calculation, direct and indirect method, were performed. Direct method is the method to calculate IRI from road profile $z(x)$, obtained in section 3.3.

Direct method calculates IRI based on Newton's laws of motion of a quarter-car model with "Golden Car" parameter. The "Golden Car" is a set of parameters Gillespie and Sayers originally proposed to be used as a correlation for response-type road roughness measuring system. However, it is generally used in present day. The "Golden Car", shown in Table 3.2, includes fractions of suspension damping rate (c_s), suspension spring rate (k_s), tire spring rate (k_t), sprung mass (m_s), and unsprung mass (m_u).

Table 3.2 Golden car parameter

Parameter	Value
m_u/m_s	0.15
c_s/m_s	6.0
k_t/m_s	653
k_s/m_s	63.3

First, the road profile $z(x)$ was smoothed by a 250mm length box filter. Then, Newton's laws of motion of a quarter-car model was solved and IRI was determined. The IRI is defined as the simulated motion of the sprung and unsprung masses normalized by the length of the profile and can be expressed in equation (3.6).

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^{L/V} |z_s - z_u| dt \quad (3.6)$$

Where L = Profile length

V = Vehicle simulated speed defined as 80 km/h

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \dot{Z}_s &= \text{Derivative of height of sprung mass} \\ \dot{Z}_u &= \text{Derivative of height of unsprung mass} \end{aligned}$$

Although the PSD of road profile is the main desire in this study, because it provides the most complete information of road characteristic, the relationship between roughness indices was studied with the purpose to elaborate the use of PSD road profile. A simulation based mathematical model proposed by KROPÁČ and MÚČKA was examined and called indirect method. The model expressing relationship between road elevation spectrum parameters and IRI is shown in equation (3.7). Unevenness index (C) and waviness (w) determined by least square error in section 3.4, were substituted into the equation. Then, road profile's IRI can be estimated.

$$IRI = 2.21 * \sqrt{C} * \exp(-0.35\Delta w + 0.13(\Delta w)^2) \quad (3.7)$$

Where

- IRI = Estimated IRI
- C = Unevenness index
- w = waviness
- Δw = $w - 2$

The IRI result from both direct method and indirect method were validate with ProVAL software and IRI data provided by Department of Highway (DOH), Thailand. The IRI data provided by DOH have different resolutions; 5m interval for route H1L and H1R and 25m interval for H347L and H347R. In order to validate the result, the IRI were calculated respective to the DOH's resolutions.

CHAPTER 4

RESULTS AND DISCUSSIONS

4.1 Relationship Between Vehicle Velocity from GNSS receiver and OBD II

As explained in section 3.3, collected vehicle velocities from GNSS receiver and via OBD II were studied at a nearly constant 60 km/h and in an accelerating state ranging from 50 km/h to 100 km/h. The Pearson correlation coefficient was greater than 0.9 in both cases, indicating positive linear relationship. Therefore, the corrected factor (a), as mentioned in equation (3.3), can be calculated by solving linear equation. Figure 4.1 shows the GPS loss incident as the vehicle velocity received from VB20SL3 (V_{GPS}) sharply dropped to zero while the vehicle velocity received via OBDII (V_{OBD}) was still at around 60 km/h. $V_{corrected}$ calculated by using equation (3.3) was shown to be sufficient as a substitute of V_{GPS} while satellite signal blockage occurs.

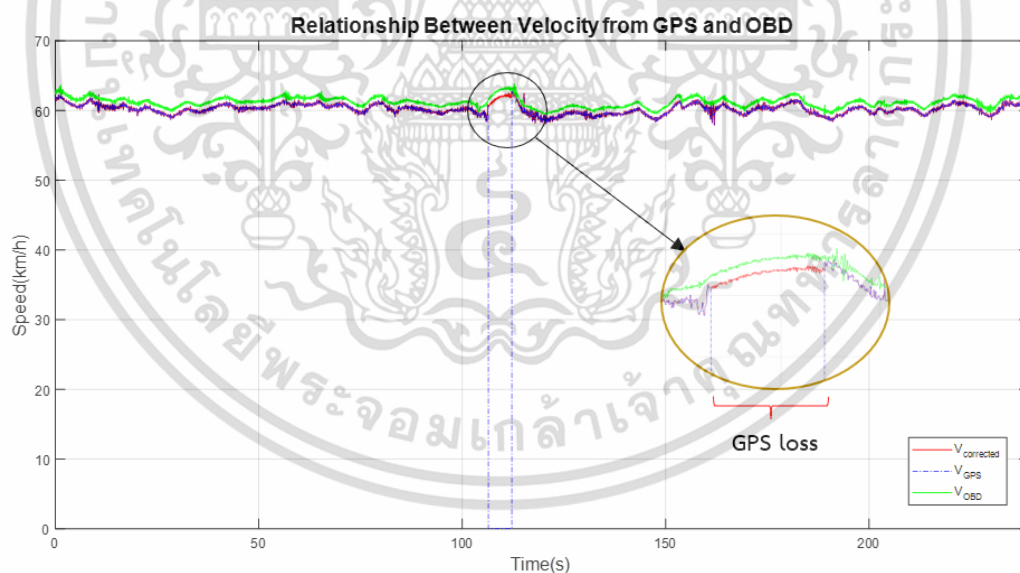


Figure 4.1 Vehicle velocity at nearly constant 60km/h

Figure 4.2 shows V_{GPS} and V_{OBD} in accelerating state from 60 km/h to 100 km/h. $V_{corrected}$ can also well represent V_{GPS} in this scenarios case.

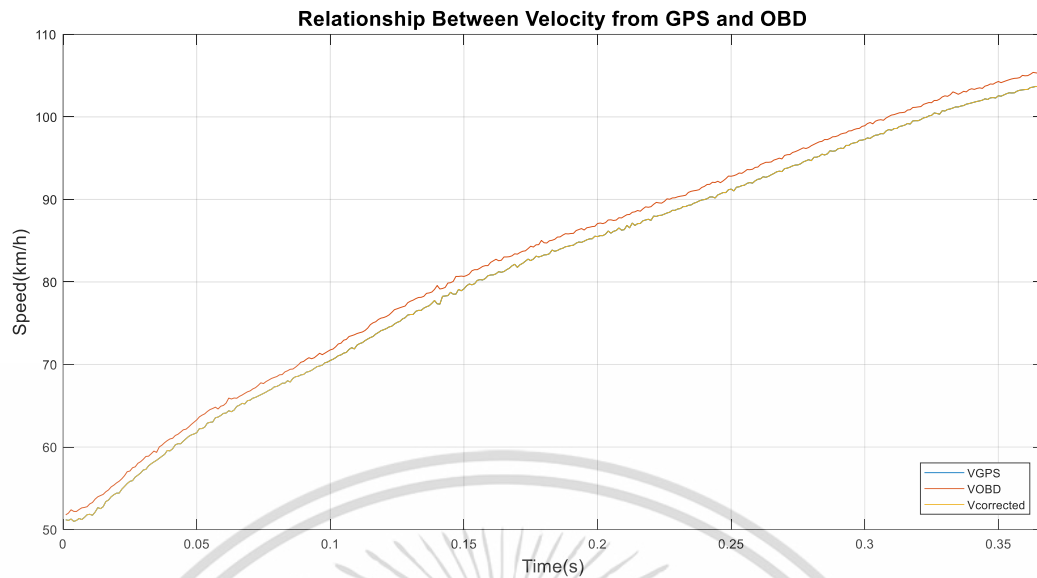


Figure 4.2 Vehicle velocity in accelerating state from 60km/h to 100km/h

4.2 Road Surface Elevation

The road surface elevation of each selected routes (H1L, H1R, H347L and H347R), collected from the experiment explained in Section 3.2, were used to estimate the road profile following the calculation process presented in Section 3.3. Although ensuring identical vehicle paths for repeated test runs is difficult, the pattern of plotted profiles of each route is identical as shown in graphs: Figure 4.3, Figure 4.4, Figure 4.5, and Figure 4.6.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

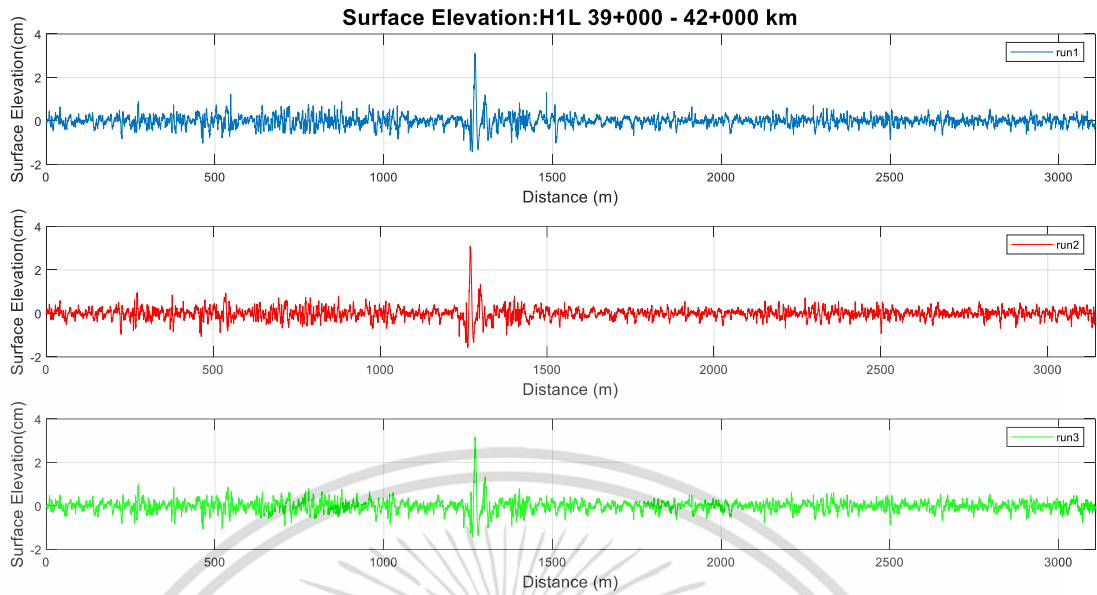


Figure 4.3 Road Surface Elevation of H1L

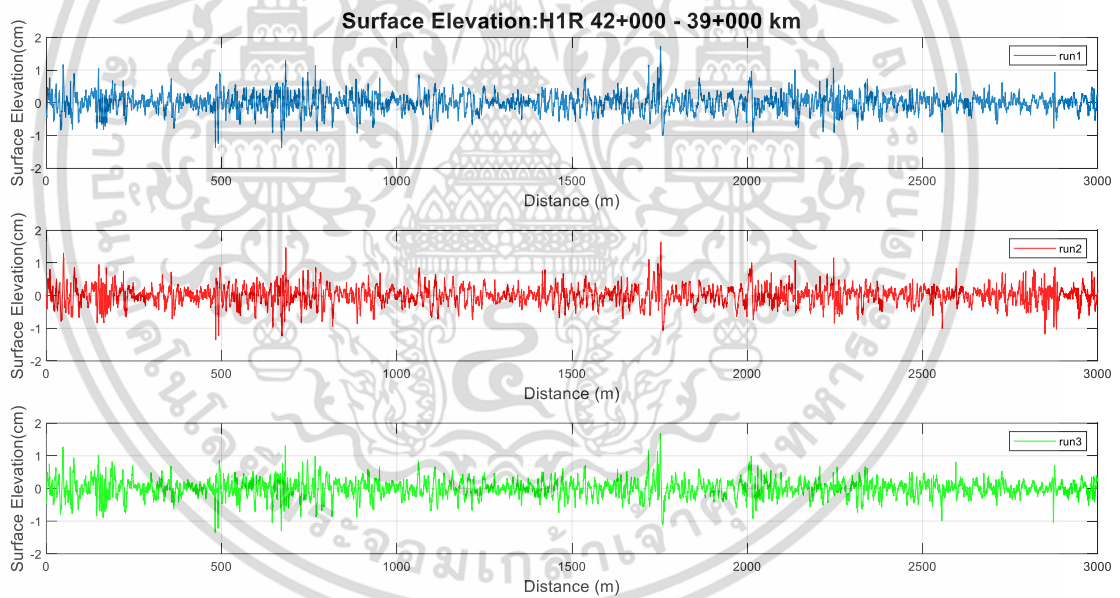


Figure 4.4 Road Surface Elevation of H1R

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

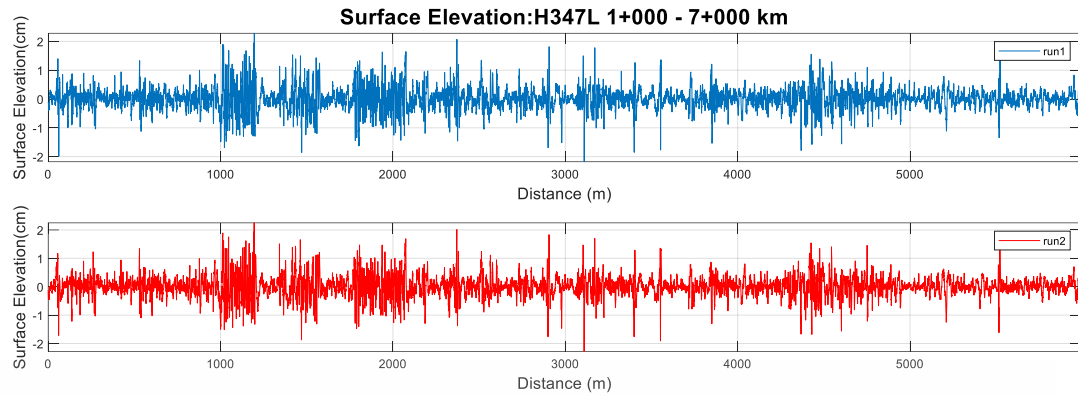


Figure 4.5 Road Surface Elevation of H347L

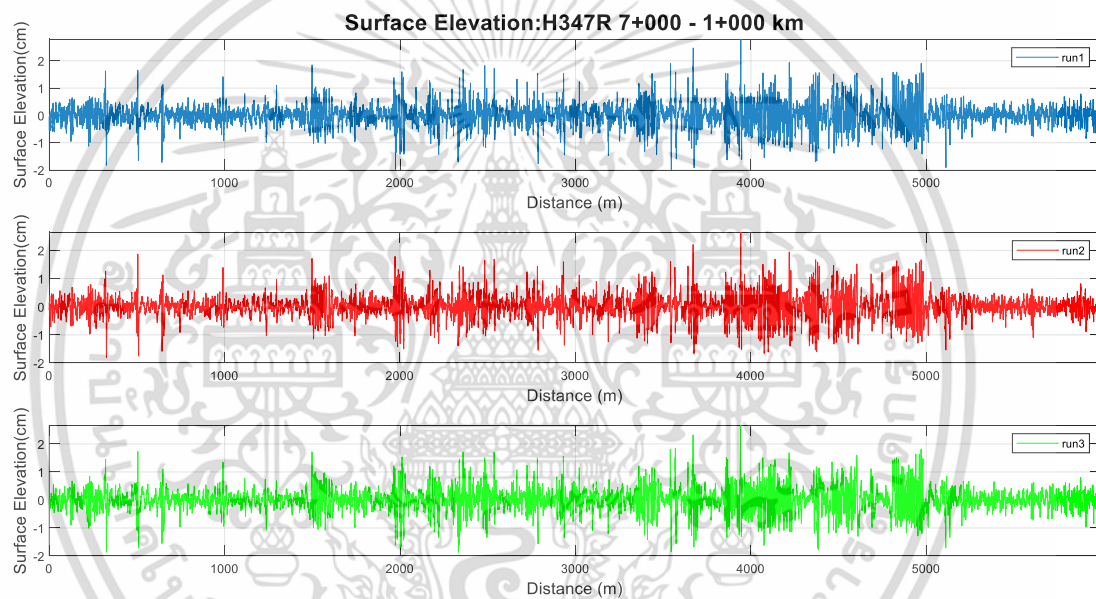


Figure 4.6 Road Surface Elevation of H347R

The calculated road profiles of all selected routes are plotted in Figure 4.7. A positive value of the elevation is the distance of the road surface rises from the reference line at 0 cm. A negative value of the elevation is the sunken road surface away from the reference line, such as when the car passes through a hole, for example. In comparison to the other line, H1L has the highest peak of amplitude of elevation (in cm). According to Figure 4.7, a red circle marks the highest peak position in the road profile graph.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H1L has amplitude = 3.08 cm at the distance (m) of 1270-meter position, or kilometer marker 40+270. The actual road condition was checked at the bridge section of Phaholyothin Road under the U-turn bridge that crosses from Chiang Rak Road. H1R has amplitude = 1.72 cm at the distance (m) of 1630-meter position, or kilometer marker 40+400. H34L has amplitude in the range of 1.8 – 2.2 cm at the distance (m) of 1195-meter position, or kilometer marker between 2+000 – 2+200. H347R has amplitude = 2.64 cm at the distance (m) of 3942-meter position, or kilometer marker 4+950.

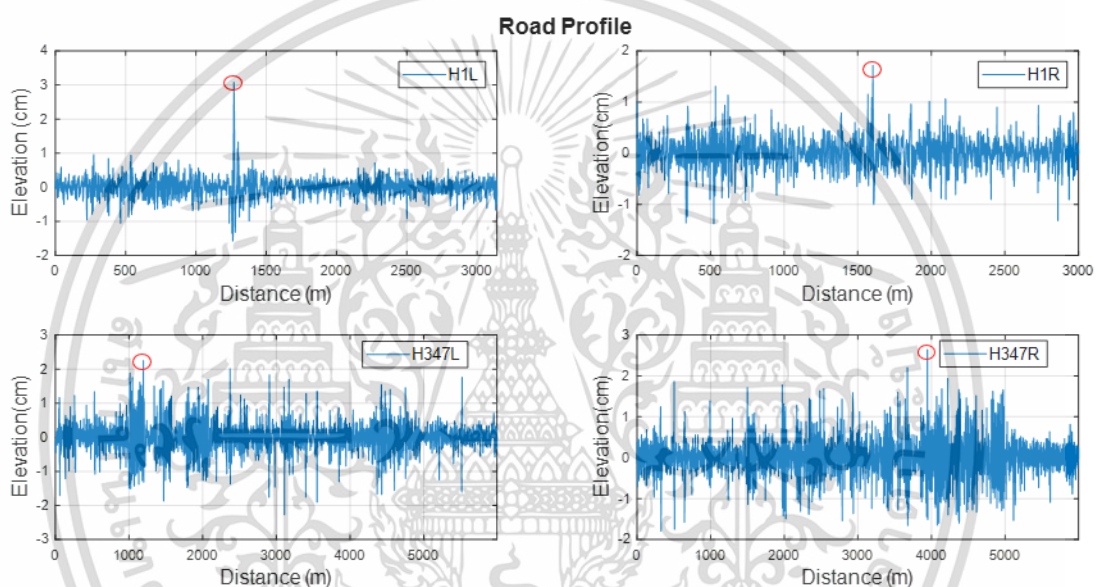


Figure 4.7 Road Profile of selected routes: H1L (top left), H1R (top right), H347L (bottom left), and H347R (bottom right)

According to Table 4.1, the statistical data of each selected route profile are presented with the mean value of all routes at zero. The standard deviation of the H1L and H1R road profiles is 0.25 and 0.27, respectively, which is slightly lower than the STD of H347L and H347R, which are 0.36 and 0.38. As a result, Table 4.1 depicts the repeatability, seeing that the STD value is low, and the results collected repeatedly for three times also show a similar trend. Thus, the collected data can be used in this research.

Table 4.1 Statistical data of each road profiles

	H1L	H1R	H347L	H347R
Min (cm)	-1.58	-1.38	-2.28	-1.80
Max (cm)	3.08	1.72	2.25	2.64
Mean	0.00	0.00	0.00	0.00
STD	0.25	0.27	0.36	0.38

4.3 Road Elevation Spectrum Parameters

As discussed in Section 3.4, the road surface elevations estimated in the PSD estimation H1L, H1R, H347L, and H347R were divided into 50-m segments to calculate the error, which was then compared to the PSD calculated by ProVAL for validation. The error result is depicted below in Table 4.2. As the PSD roughness is always shown on a log-log scale, the percentage error of the log PSD was used for representation. Each route's experiment was repeated three times, as shown in Run 1, Run 2, and Run 3.

4.3.1 PSD Overall

As detailed in Table 4.2, the road profiles for each route are shown as follows: H1L at kilometer markers at 39+000 to 42+000, H1R at kilometer markers at 42+000 to 39+000, and H347L at kilometer markers. km 1+000 to 7+000, and H347R km 7+000 to 1+000.

The collected data were calculated for Power Spectrum Density (PSD) using the method described in Section 3.4, and the results were then compared with those obtained from the same set of road profile inputs using ProVAL. According to ISO8608, the general on-road measurement is accepted in the range of 0.02 – 10 cycle/m. Both sets of data were compared to show the mean of percentage error of the log PSD in the frequency range of 0–10 cycle/m, presenting that the results of 3-time repeated tests for H1L, H1R, H347L, and H347R present a similar trend showing that H1L, H1R, H347L, and H347R have the highest percentage error in the low frequency range, 0–0.2 cycle/m, because the data in this frequency range is not large.

When considered with the max and min error throughout the frequency 0–10 cycle, it was found that the range between 0 - 2.4% is acceptable. Therefore, the calculated PSD data from section 3.4 could be further applied as shown in Table 4.2, Table 4.3, Table 4.4, Table 4.5, and the mean of percentage error of log PSD graph for spatial frequency in Figure 4.8, Figure 4.9, Figure 4.10, and Figure 4.11.

Table 4.2 Percentage Error of H1L PSD roughness in comparing to ProVAL

Frequency (cycle/m)	Mean of Percentage Error of log PSD (%)		
	Run 1	Run 2	Run 3
0 - 0.2	2.392952	2.226689	2.337852
0.2 - 0.5	0.773574	0.601308	0.682977
0.5 - 1	0.697243	0.409479	0.405443
1 - 2	0.478317	0.302150	0.381261
2 - 3	0.250692	0.268044	0.248763
3 - 5	0.313691	0.294004	0.269147
5 - 7	0.312616	0.290702	0.247110
7 - 10	0.941692	1.062798	0.303745

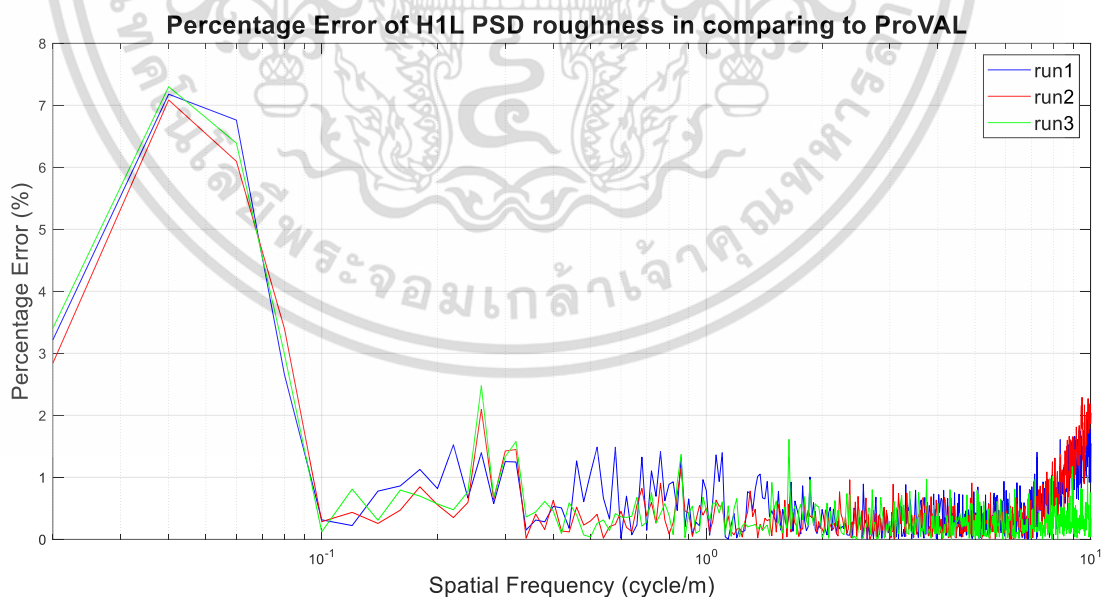
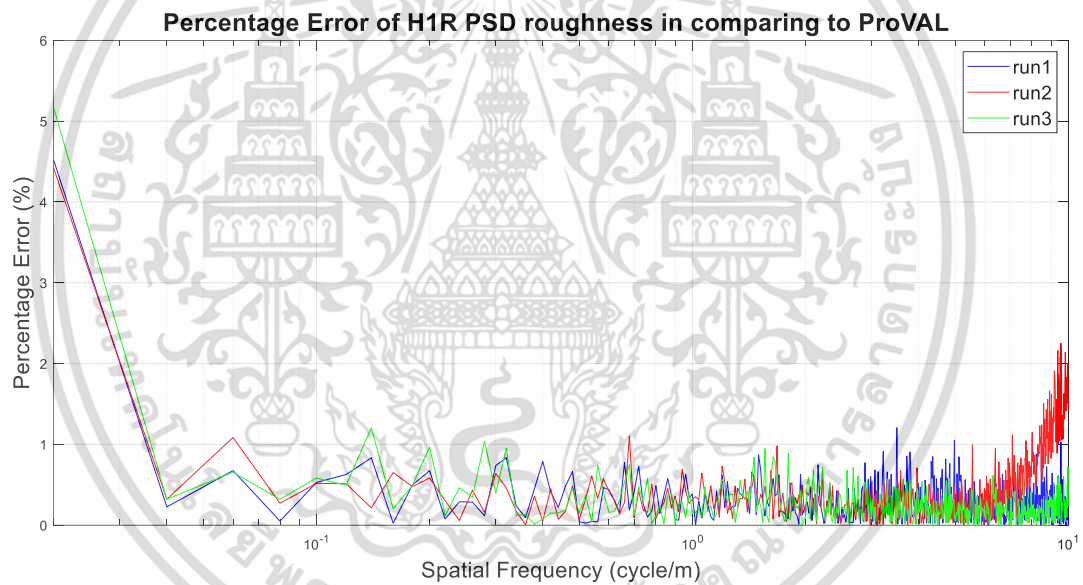


Figure 4.8 Percentage error of H1L PSD roughness in comparing to ProVAL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4.3 Percentage Error of H1R PSD roughness in comparing to ProVAL

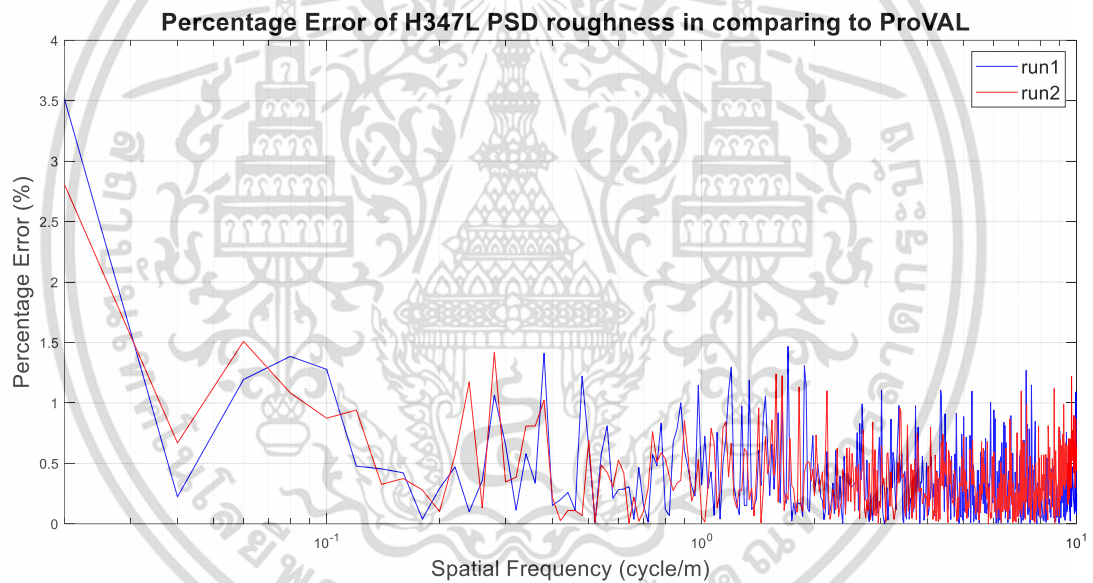
Frequency (cycle/m)	% Error of log PSD		
	Run 1	Run 2	Run 3
0 - 0.2	0.8659	0.9058	1.0410
0.2 - 0.5	0.4006	0.2800	0.3580
0.5 - 1	0.3073	0.3462	0.2873
1 - 2	0.3083	0.3479	0.3142
2 - 3	0.2414	0.2378	0.2818
3 - 5	0.3463	0.2301	0.2175
5 - 7	0.2271	0.2965	0.1909
7 - 10	0.2648	1.0287	0.1986

**Figure 4.9** Percentage error of H1R PSD roughness in comparing to ProVAL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4.4 Percentage Error of H347L PSD roughness in comparing to ProVAL

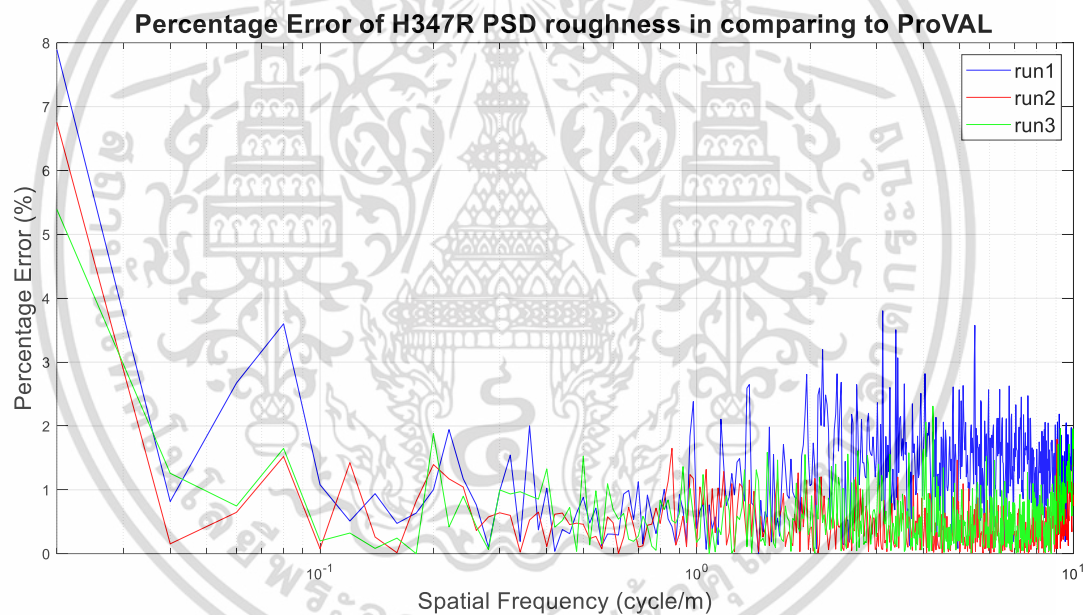
Frequency (cycle/m)	% Error of log PSD	
	Run 1	Run 2
0 - 0.2	0.927627096	0.896360417
0.2 - 0.5	0.49773476	0.499250721
0.5 - 1	0.439482308	0.37538755
1 - 2	0.477748843	0.426450316
2 - 3	0.310809958	0.32140302
3 - 5	0.348854642	0.320571886
5 - 7	0.32409434	0.266462609
7 - 10	0.263954454	0.388302652

**Figure 4.10** Percentage error of H347L PSD roughness in comparing to ProVAL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4.5 Percentage Error of H347R PSD roughness in comparing to ProVAL

frequency (cycle/m)	% Error of log PSD		
	Run 1	Run 2	Run 3
0 - 0.2	1.962736	1.307651	1.177876
0.2 - 0.5	0.83463	0.609884	0.807196
0.5 - 1	0.685353	0.504883	0.588286
1 - 2	1.036756	0.584992	0.546208
2 - 3	1.546066	0.459334	0.64946
3 - 5	1.453865	0.376731	0.543672
5 - 7	1.518593	0.31435	0.471957
7 - 10	1.376628	0.438242	0.666192

**Figure 4.11** Percentage error of H347R PSD roughness in comparing to ProVAL

The 1-straight line method was used to transform PSD roughness data to curve fitting. Figure 4.12 shows 1-straight line comparing each condition, consisting of a fit over the frequency range contained in the data (pink and cyan line), a fit in the range of 0.01 – 2 cycle/m according to ISO 8608: fit by setting waviness = 2 (green line), varying waviness (red line), and PSD roughness of the road profile (black line). The two conditions of a fit in the range of 0.01 – 2 cycle/m (green and red line) were selected to be used in the next step.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

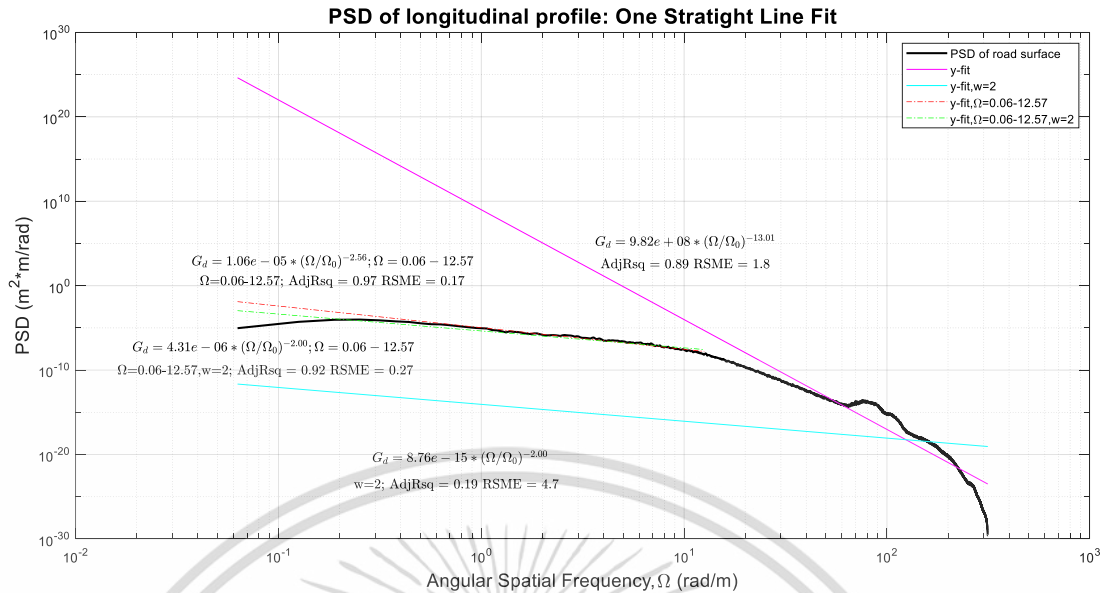


Figure 4.12 PSD roughness of H1L and One-straight line fit

The value of PSD roughness at spatial frequency, $\Omega_0 = 0.1$ cycle/m ($\Omega_0 = 1$ rad/m), is Roughness coefficient (C), and the slope of the fitting line is waviness (w). Both variables are applied to calculate indirectly IRI by equation (3.7).

When comparing 1-straight line fit results under 2 conditions—fixing the value of waviness at 2 and varying waviness—the algorithm selects the most appropriate value based on least square error optimization. The values of Roughness coefficient (C) and waviness (w) obtained from the analysis of roads for each route in both conditions are shown in Table 4.6.

For the condition of fixed waviness ($w = 2$) condition, the C values of H1L and H1R show similar values in the range of 1.7 – 2.0 (10^{-6} m^3). H347L and H347R also have similar C values in the range of 3.0 – 4.3 (10^{-6} m^3). Additionally, the range of H1L and H1R is lower than the range of H347L and H347R.

For the varying waviness condition, it is found that the C values of H1L and H1R display similar values in the range of 2.8 – 3.0 (10^{-6} m^3). H347L and H347R also have similar C values in the range of 5.5 – 7.5 (10^{-6} m^3). As a result, the range of H1L and H1R is lower than the range of H347L and H347R. Plus, and each route has an approximate value of waviness around 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4.6 Spectrum Parameters

Road No.		Vary Waviness(w)		Fixed Waviness (w = 2)
		C [$10^{-6} m^3$]	Waviness (w)	C [$10^{-6} m^3$]
H1L	Run1	3.0412	2.37	1.9257
	Run2	2.8629	2.36	1.8266
	Run3	2.9234	2.38	1.8264
H1R	Run1	3.3811	2.45	1.9335
	Run2	3.6027	2.45	2.0591
	Run3	3.0630	2.47	1.7091
H347L	Run1	5.8393	2.40	3.5228
	Run2	5.5076	2.50	2.9423
H347R	Run1	7.7171	2.22	5.8890
	Run2	7.2923	2.43	4.2780
	Run3	7.5221	2.46	4.2528

4.3.2 PSD segment

The road surface elevations in section 4.2 were divided into 50 meter intervals. Therefore, H1L/H1R and H347L/H347R contain 59 segments and 119 segments, respectively. The PSD roughness results were compared with ProVAL, but due to the large size of the data, one route, H347R, was selected and compared only at the first segment ($i = 1$) middle segment ($i = 60$) and last segment ($i = 119$). The result was presented in Figure 4.13, Figure 4.14, and Figure 4.15. The mean percentage error of the log PSD in the frequency range 0.01 – 2.83 cycle/m was shown in

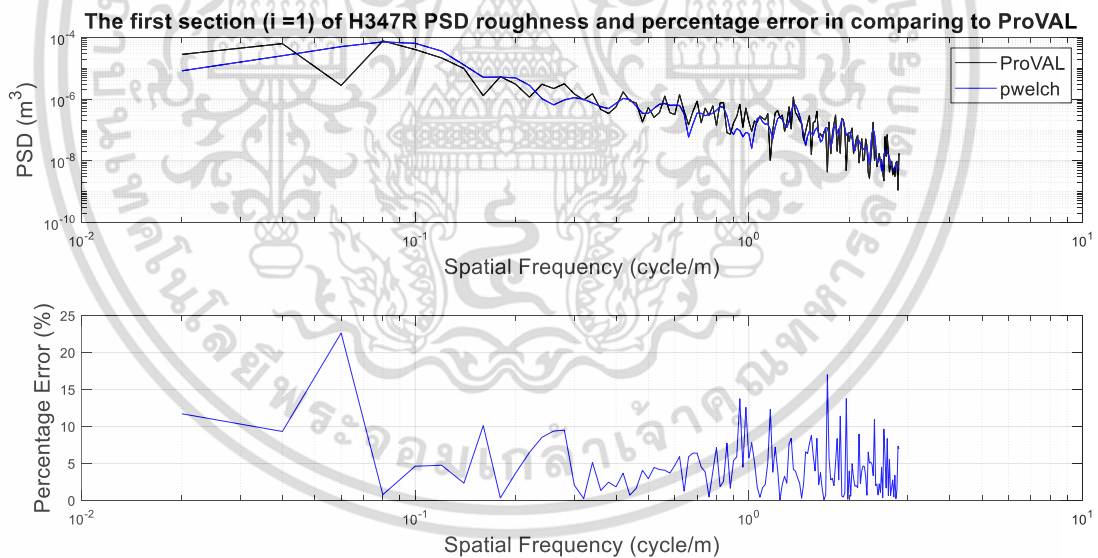
Table 4.7.

It was found that the mean percentage error of each data position compared to ProVAL was in the range of 3.5–11%, which was in an acceptable range and sufficient for further use of the information.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 4.7 Mean of Percentage Error of H347R PSD roughness in comparing to ProVAL

Frequency (cycle/m)	Mean of Percentage Error of log PSD		
	H347R run1 First segment (i=1)	H347R run1 Middle segment (i=60)	H347R run1 Last segment (i=119)
0.011 - 0.2	7.044971838	7.876015244	9.106818
0.2 - 0.5	3.997659705	10.77048517	5.455093
0.5 - 1	5.071631053	8.948955973	5.855573
1 - 2	4.556707606	6.740657612	4.640323
2 - 2.83	3.651051209	5.347857871	3.994884

**Figure 4.13** The first section (i =1) of PSD roughness and percentage error in comparing to ProVAL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

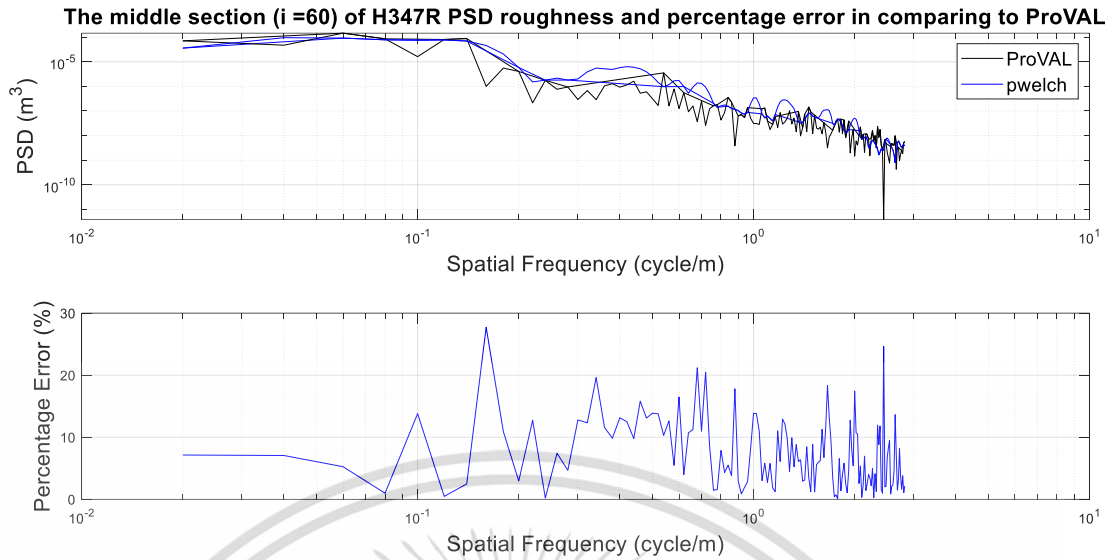


Figure 4.14 The middle section (i =60) of PSD roughness and percentage error in comparing to ProVAL

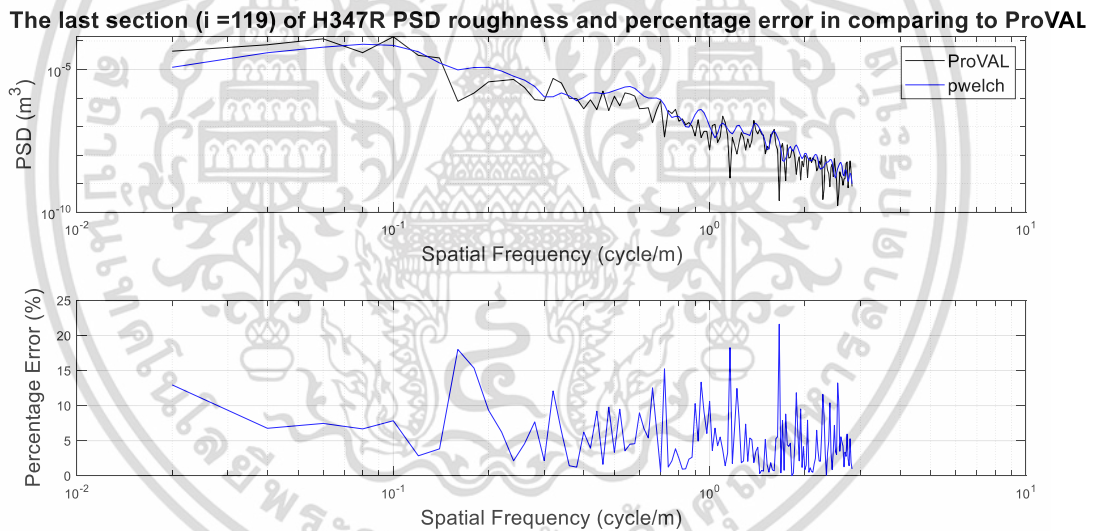


Figure 4.15 The last section (i =119) of PSD roughness and percentage error in comparing to ProVAL

4.4 IRI

The IRI is summarized into two values: the overall IRI, which is calculated from the average segment IRI over the entire road section tested, according to Table 4.1, and segment IRI which is calculated from every 25-meter section of the road, referring to the standards used by the Department of Highways in Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

There are two methods used to calculate IRI as described in section 3.5. Firstly, a direct IRI is calculated directly from the estimated surface profile calculated from the collected data using the Sayers method. Secondly, an indirect IRI is calculated from PSD Roughness parameters (C , w) with the correlation equation proposed by Múčka and Kropáč. Then, the result is validated with ProVAL and DOH's IRI, which will be explained in detail in the next section.

4.4.1 Overall IRI

The data from the measurements, which were used to calculate the IRI by direct method and indirect method, were applied to compare with the results that were validated with the IRI obtained from the Department of Highways (DOH) and the ProVAL program, as presented in

Table 4.8.

When compared to ProVAL, the percentage error was lower than when compared to the DOH. The IRI calculated by the direct method was closer to the IRI calculated by the ProVAL program when compared to the DOH, with percentage error ranging from 1 to 2.75%, whereas the latter had percentage error ranging from 3-12%.

The indirect method has a higher percentage error than the direct method. The IRI calculated by the direct method is closer to both DOH and ProVAL than the indirect method, with a percentage error in the range of 2-12%, while the indirect method has a percentage error in the range of 14-42%.

Table 4.8 Overall IRI in comparing with DOH and ProVAL

Route name	Run	Overall IRI (m/km)				Percentage Error (%)			
		DOH	ProVAL	Direct method	Indirect method	Direct method Vs DOH	Direct method Vs ProVAL	Indirect method Vs DOH	Indirect method Vs ProVAL
H1L	1	2.07	2.01	1.96	2.82	5.73	2.61	36.06	40.57
	2		1.97	1.92	2.81	7.51	2.75	35.33	42.29
	3		1.96	1.92	2.82	7.58	2.23	35.80	43.66
H1R	1	2.48	2.19	2.31	2.98	6.82	5.73	19.78	35.91
	2		2.28	2.41	3.08	3.03	5.69	24.04	35.19
	3		2.08	2.24	2.86	9.78	7.74	15.11	37.46
H347L	1	2.90	2.70	2.67	3.69	8.03	1.08	27.15	36.77
	2		2.58	2.55	3.50	12.23	1.01	20.42	35.82
H347R	1	3.53	3.35	3.31	4.53	6.31	1.12	28.29	35.40
	2		3.18	3.12	4.07	11.62	1.74	15.24	28.13
	3		3.17	3.10	4.05	12.17	2.02	14.65	27.91

4.4.2 Segment IRI

The road surface data obtained from measurements is used to calculate the IRI using the direct method and the indirect method, with the IRI calculated from every 25-meter road section in accordance with Thailand's Department of Highways

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

standards. The results were validated using the IRI standard of the Department of Highways and the ProVAL program.

4.4.2.1 Segment IRI: Direct Method

The IRI results obtained from the direct method, as shown in Table 4.9. When compared to ProVAL, the percentage error is lower than when compared to DOH. The IRI calculated by the Direct Method was closer to the IRI calculated by the ProVAL program compared to DOH, i.e., the mean of percentage error was in the range of 1.2–4.5%, with the smallest percentage error being not more than 0.2%, and H347R had the highest percentage error max of 26.83%, while when comparing the IRI with the IRI data of DOH, the average percentage error was in the range of 22–36.7% with the smallest percentage error having not more than 0.2%, and H347R has the highest percentage error max of 265.83%.

Table 4.9 Direct Method: Percentage Error of IRI in comparing to DOH and ProVAL

Route Name		Percentage Error DOH VS Sayers (%)			Percentage Error ProVAL VS Sayers (%)		
		AVR	MAX	MIN	AVR	MAX	MIN
H1L	Run1	24.89	206.06	0.06	1.45	3.31	0.22
	Run2	24.46	86.50	0.42	1.44	3.34	0.02
	Run3	25.80	93.08	0.59	1.42	2.68	0.01
H1R	Run1	24.24	115.30	0.15	1.36	4.68	0.02
	Run2	23.02	106.28	0.23	1.34	4.06	0.05
	Run3	24.76	103.97	0.07	1.32	2.79	0.03
H347L	Run1	21.94	237.61	0.05	1.29	5.21	0.08
	Run2	22.10	257.52	0.11	1.25	4.66	0.01
H347R	Run1	35.86	227.98	0.53	4.52	26.83	0.05
	Run2	35.62	265.97	0.26	1.70	7.82	0.01
	Run3	36.69	257.76	0.07	1.99	10.35	0.03

Figure 4.16 shows the IRI and percentage error of H1L compared to DOH. The maximum percentage error occurs at the 1500-meter position or at the kilometer เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

marker at 40+500. As for the IRI and percentage error compared to the IRI value from the ProVAL program in Figure 4.17, it is found that the IRI patterns are similar because they are calculated from the same road surface elevation.

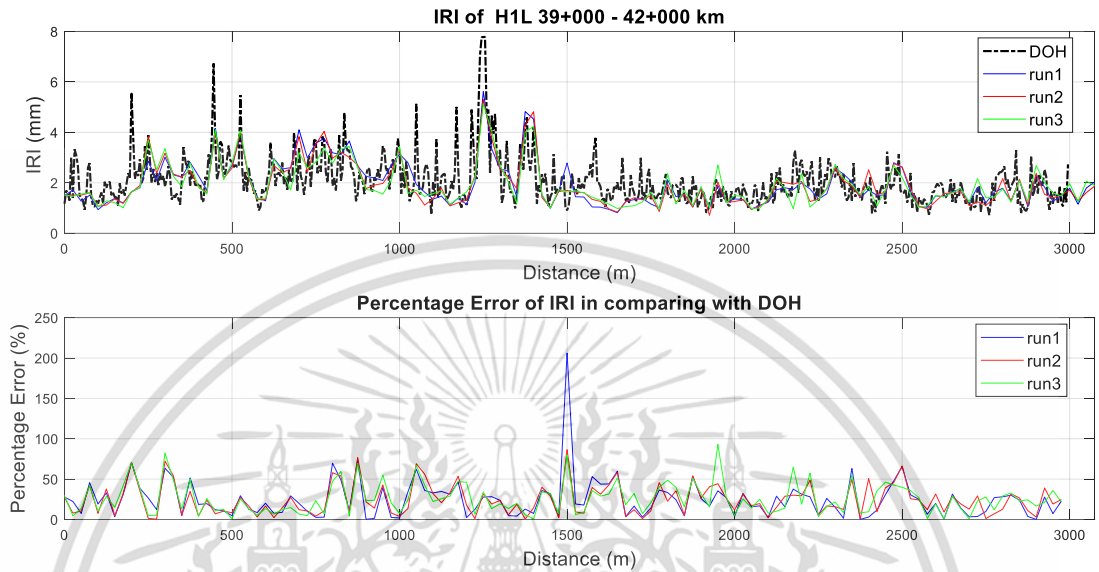


Figure 4.16 IRI of H1L and percentage error in comparing with DOH

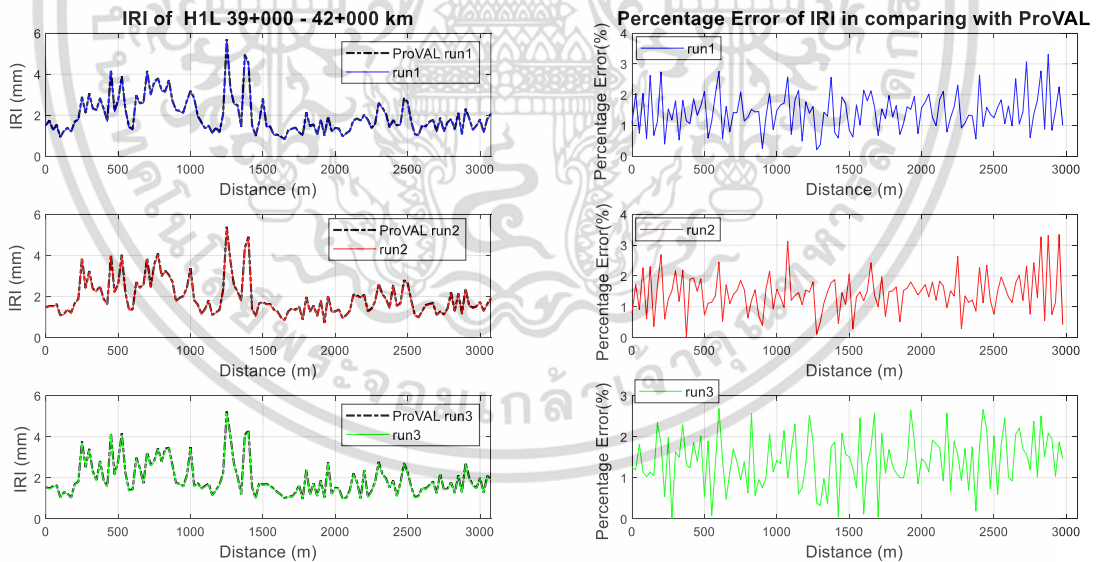


Figure 4.17 IRI of H1L and percentage error in comparing with ProVAL

Figure 4.18 shows the IRI and percentage error of H1R compared to DOH. From the graph, it is found that in the 2000-meter range, the final data has a large difference in the IRI pattern, and the highest percentage error occurs at the 475-meter position or at the kilometer marker 41+425. The IRI and percentage error compared to

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

the IRI from the ProVAL program, as shown in Figure 4.19, showed that the pattern of the IRI was similar because it was calculated from the same road surface elevation.

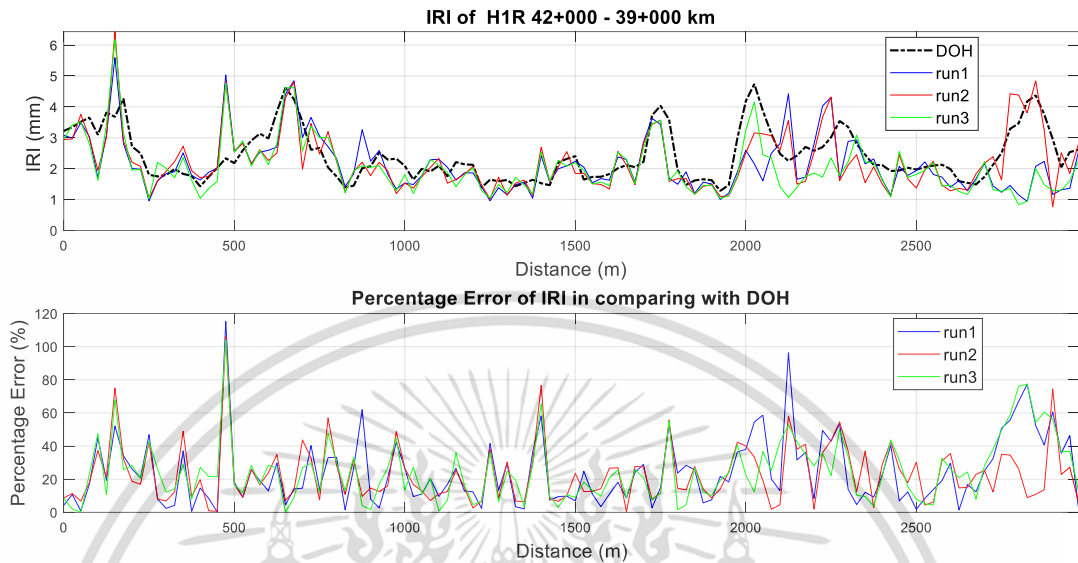


Figure 4.18 IRI of H1R and percentage error in comparing with DOH

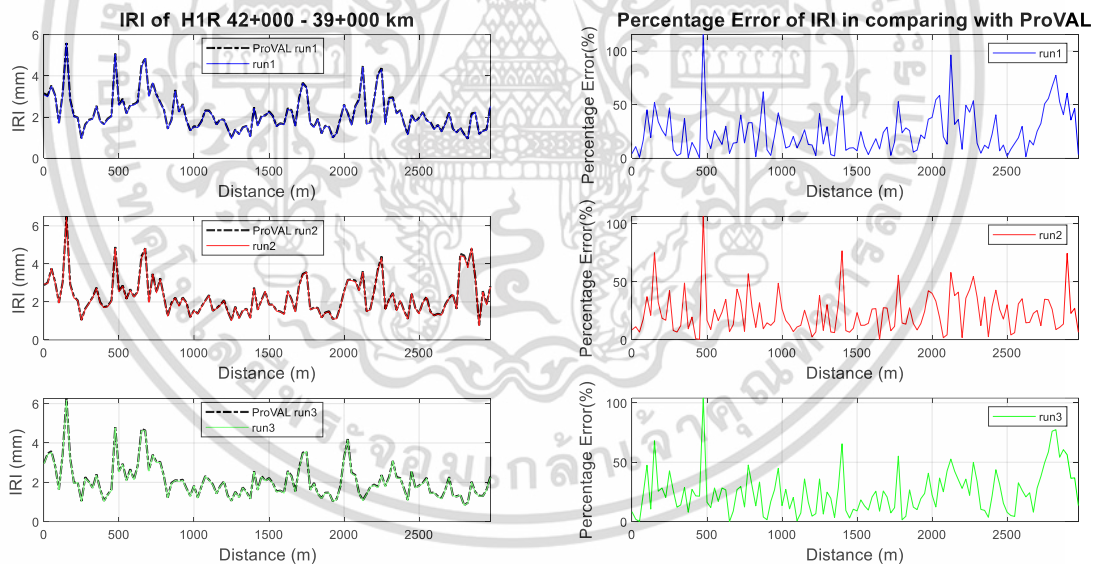


Figure 4.19 IRI of H1R and percentage error in comparing with ProVAL

Figure 4.20 shows the IRI and percentage error of H34 7L compared to DOH. It can be seen from the graph that the IRI changes in a very close manner DOH with some signal overlap and that the highest percentage error occurs at the position of 3550 m or at the kilometer marker at 4+550. Figure 4.21 shows the IRI and percentage error

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

compared to the IRI from the ProVAL program. It is found that the pattern of IRI is similar because it is calculated from the same road surface elevation.

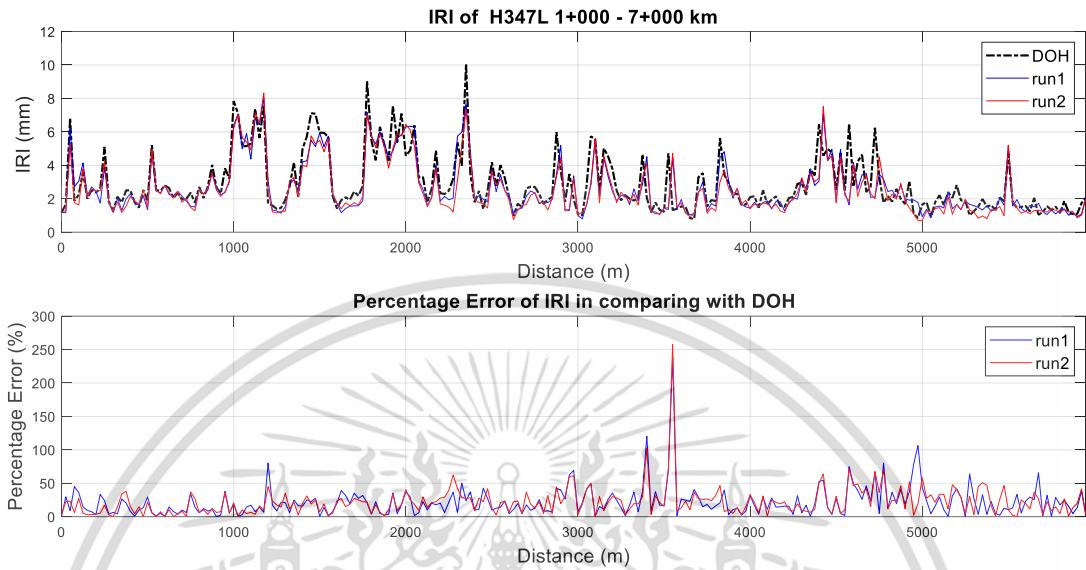


Figure 4.20 IRI of H347L and percentage error in comparing with DOH

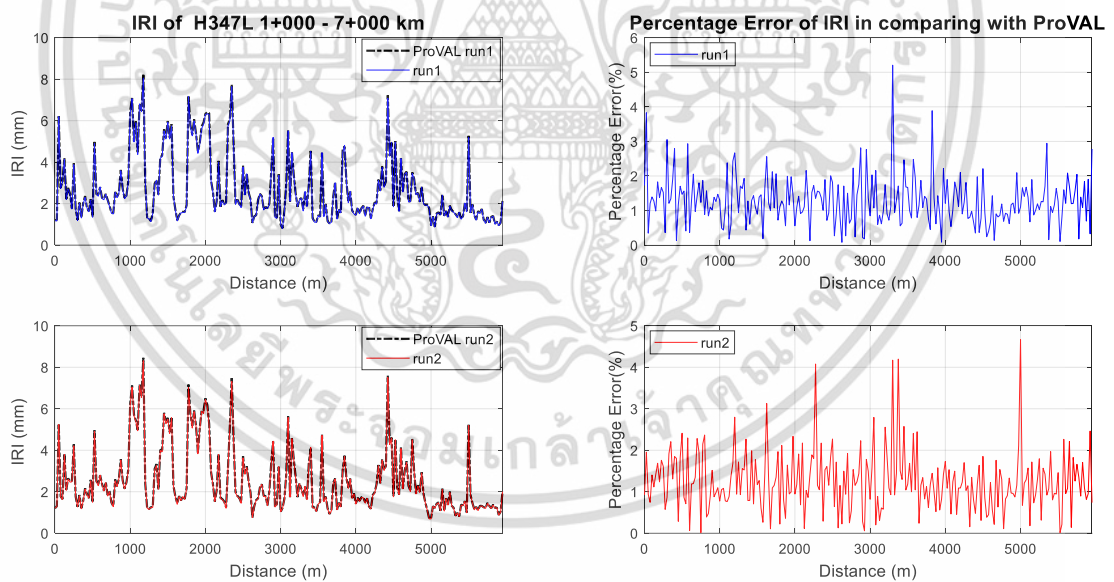


Figure 4.21 IRI of H347L and percentage error in comparing with ProVAL

Figure 4.22 shows the IRI and percentage error of H347R compared to DOH. From the graph, it shows that the IRI changes in a very close manner, and the highest percentage error occurs at the 266-meter position or at the kilometer marker 6 +734. Figure 4.23 shows the IRI and percentage error compared to the IRI from the ProVAL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

program. It is found that the pattern of IRI is similar because it is calculated from the same road surface elevation.

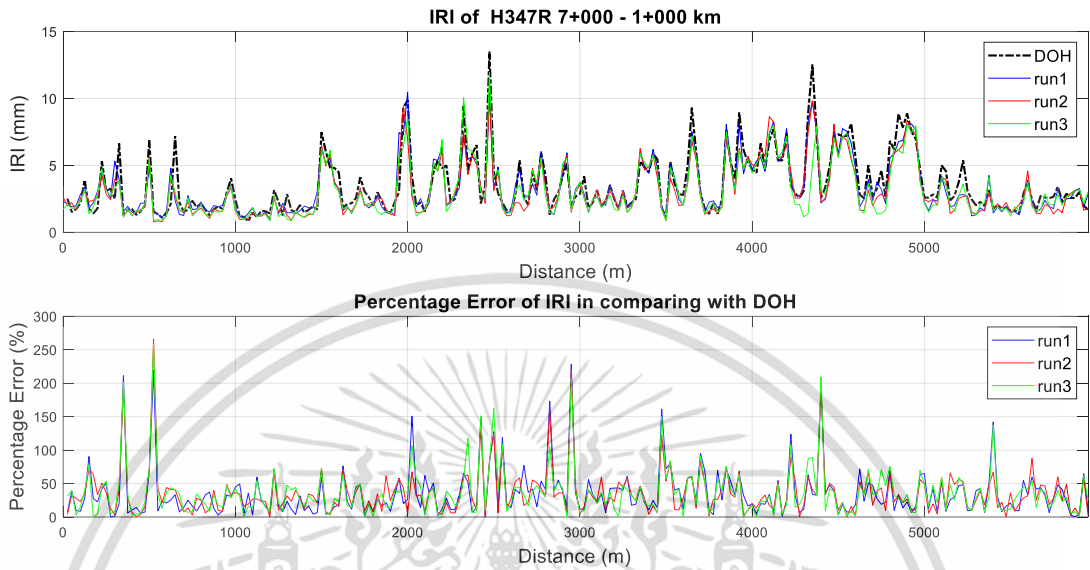


Figure 4.22 IRI of H347R and percentage error in comparing with DOH

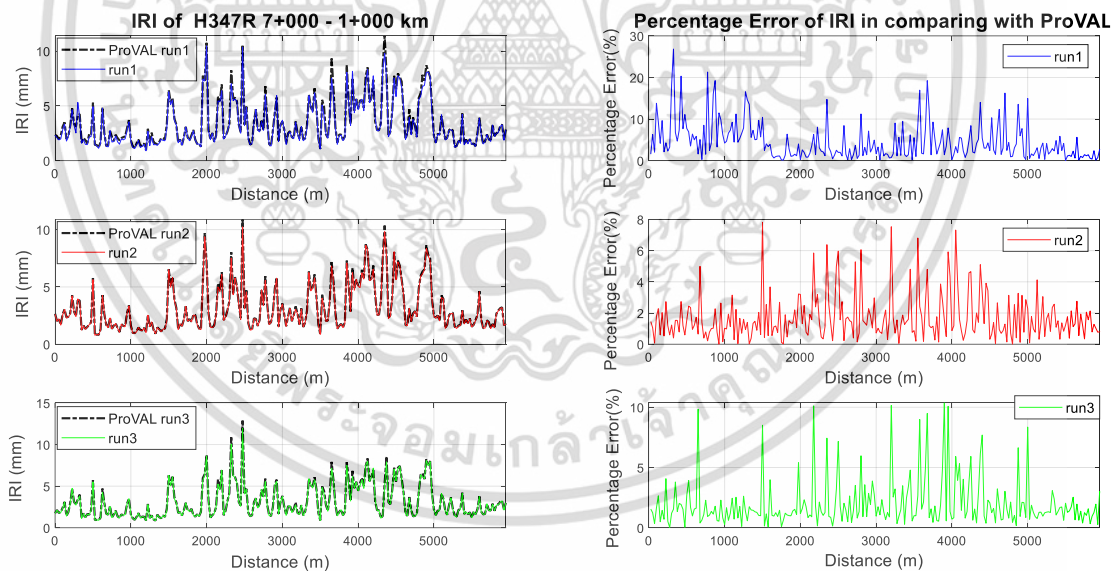


Figure 4.23 IRI of H347R and percentage error in comparing with ProVAL

4.4.2.2 Segment IRI: Indirect Method

The IRI results obtained from the indirect method, as shown in Table 4.10. When compared to ProVAL, the percentage error is slightly lower than when compared to DOH. The IRI calculated by the indirect method was closer to the IRI calculated by

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ProVAL compared to the Department of Highways. The average percentage error was in the range of 34–70% with the smallest percentage error not exceeding 4.5% and H347R having the largest percentage error max of 383%, meanwhile, when comparing the IRI value with the IRI data of the Department of Highways, the average percentage error is in the range of 31–47% with the smallest percentage error not exceeding 11% and H1L having the highest percentage error max of 179%.

Table 4.10 Indirect Method: Percentage Error of IRI in comparing to DOH and ProVAL

Route Name	run	Percentage Error (%) in comparing to DOH			Percentage Error (%) in comparing to ProVAL		
		Avg	max	min	avg	Max	Min
H1L	1	55.85	191.74	4.31	46.50	178.88	7.40
	2	57.11	188.57	0.33	47.43	98.27	6.07
	3	56.35	218.13	0.31	47.00	95.60	1.08
H1R	1	70.47	338.31	2.86	38.33	95.94	10.32
	2	74.47	271.82	3.16	38.22	95.51	6.00
	3	62.53	268.18	4.38	39.80	79.01	10.82
H347L	1	40.15	202.42	0.19	41.91	112.10	1.54
	2	34.51	198.28	0.25	40.58	105.94	0.67
H347R	1	56.25	383.76	0.01	37.38	90.40	2.13
	2	40.68	233.08	0.09	31.75	90.90	2.66
	3	42.64	326.47	0.17	31.92	84.23	0.27

Figure 4.24 shows the IRI and percentage error of H1L compared to DOH. From the graph, there is a large difference in the IRI pattern, but the maximum peak occurs at similar locations, at the 1250-meter position or at the kilometer marker 40 + 250. Figure 4.25 shows the IRI and percentage error compared to the IRI from the ProVAL program. It is found that the pattern of the IRI is similar because it is calculated from the same road surface elevation, but the amplitude of the IRI calculated by the ProVAL program is smaller.

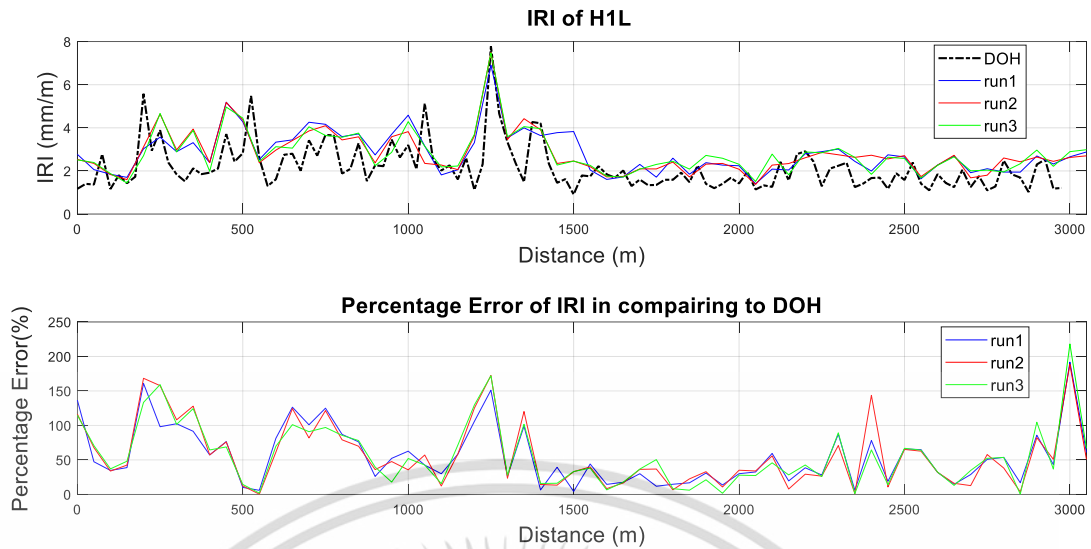


Figure 4.24 IRI of H1L and percentage error in comparing to DOH

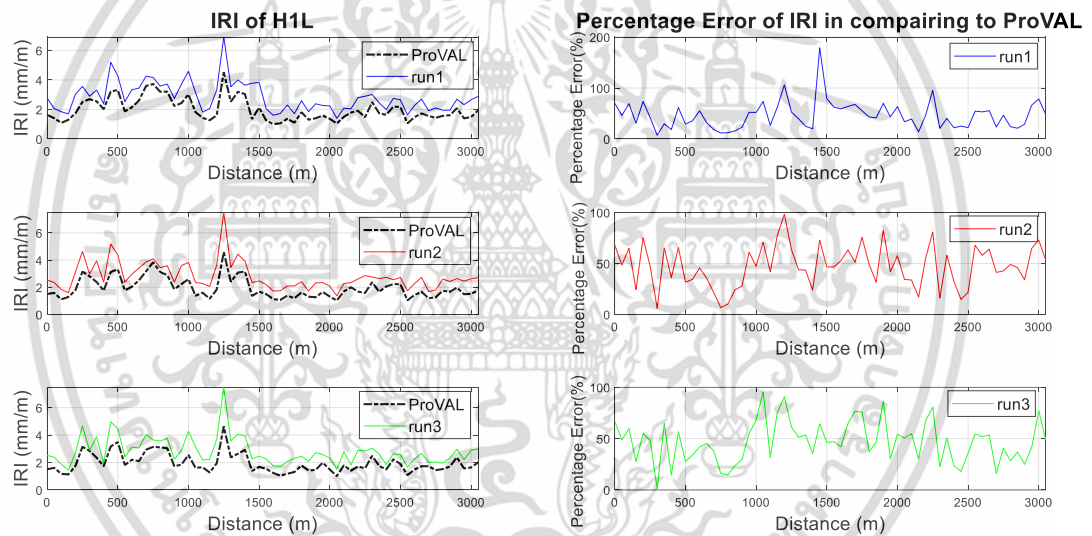


Figure 4.25 IRI of H1L and percentage error in comparing to ProVAL

Figure 4.26 shows the IRI and percentage error of H1R compared to DOH. The graph shows that there is a large difference in the IRI pattern. Figure 4.27 presents the IRI and percentage error compared to the IRI from the ProVAL program. It shows the similar pattern of the IRI because they are calculated from the same road surface elevation, but the amplitude of the IRI calculated from ProVAL is smaller.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

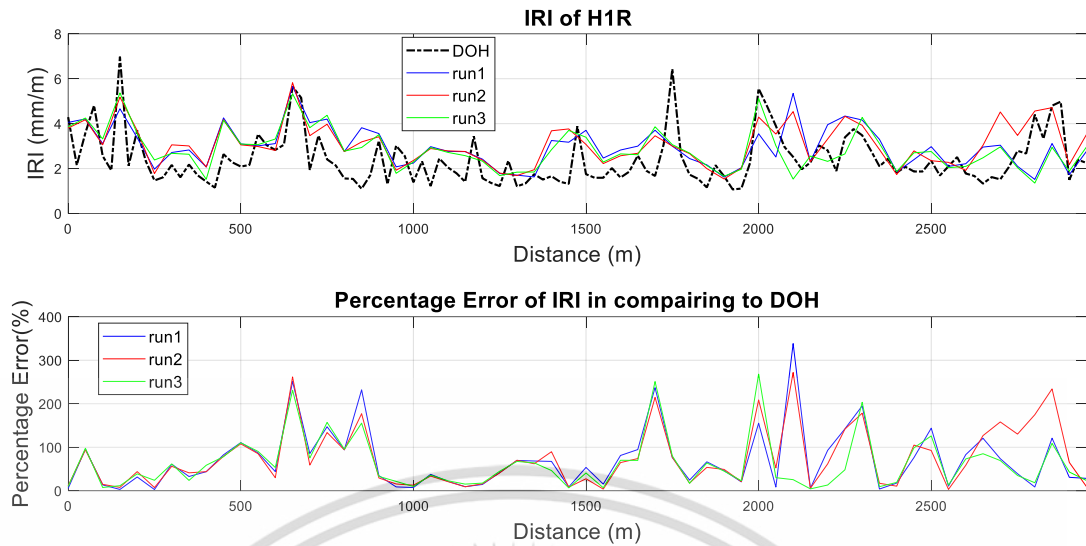


Figure 4.26 IRI of H1R and percentage error in comparing with DOH

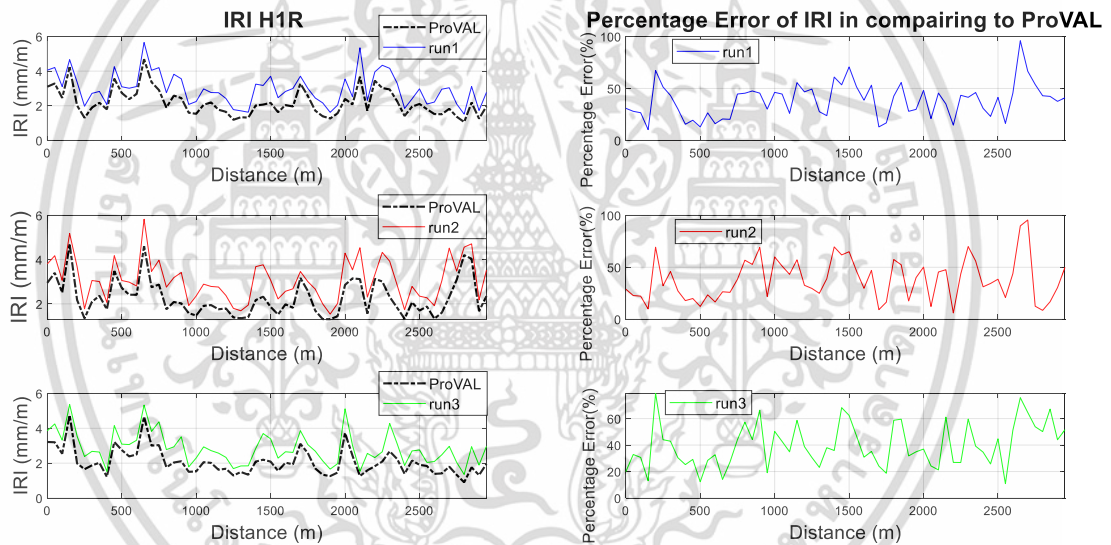


Figure 4.27 IRI of H1R and percentage error in comparing to ProVAL

Figure 4.28 shows the IRI and percentage error of H347L compared to DOH. The graph shows that the IRI pattern of H347L is more similar than H1L and H1R. The obvious difference is the amplitude and percentage error max at the 500-meter position, or at the kilometer marker 1+500. Figure 4.29 shows the IRI and percentage error compared to the IRI from the ProVAL program. It is found that the pattern of the IRI is similar because it is calculated from the same road surface elevation, but the amplitude of the IRI calculated from the ProVAL program is smaller.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

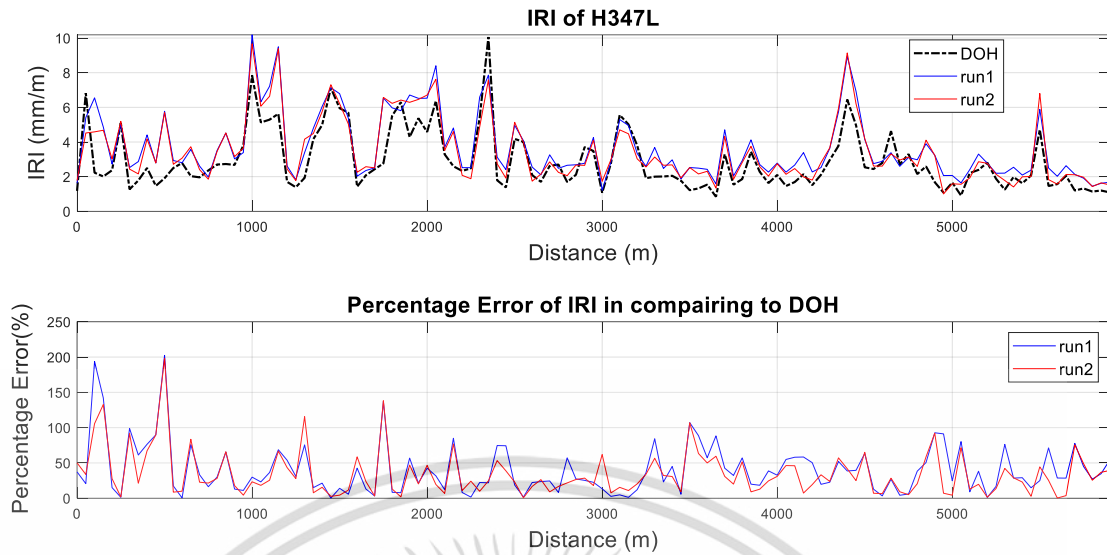


Figure 4.28 IRI of H347L and percentage error in comparing with DOH

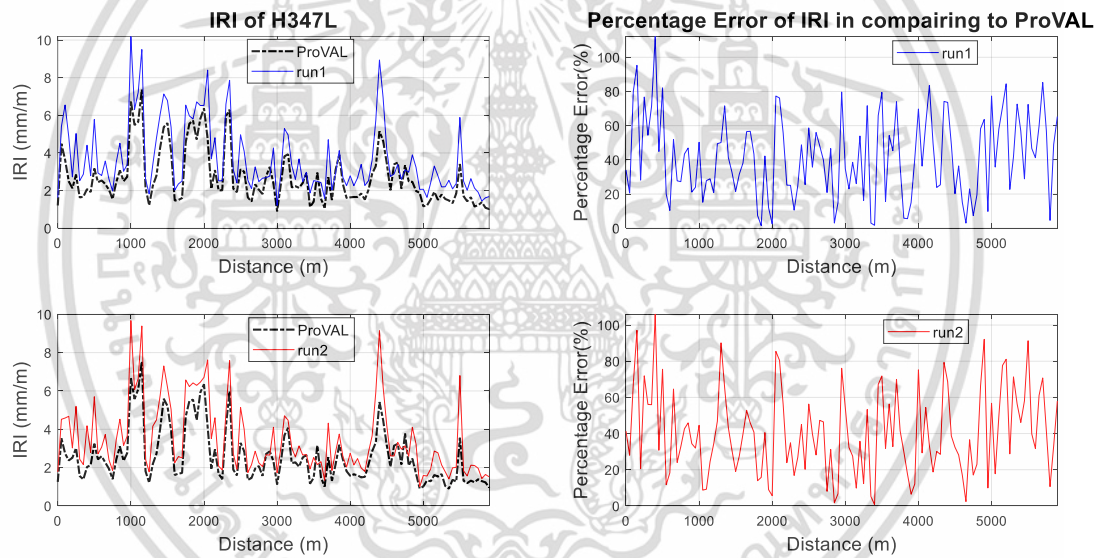


Figure 4.29 IRI of H347L and percentage error in comparing to ProVAL

Figure 4.30 shows the IRI and percentage error of H347R compared to DOH. The graph shows that the IRI pattern is quite similar, but the amplitude is larger than the IRI of DOH, and there is some signal overlap. The maximum percentage error occurs at the 3500-meter position, or the kilometer marker 3+500. Figure 4.31 shows the IRI and percentage error compared to the IRI from the ProVAL program. It was found that the pattern of the IRI is similar because it is calculated from the same road surface elevation, but the amplitude of the calculated IRI from the ProVAL program is smaller.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

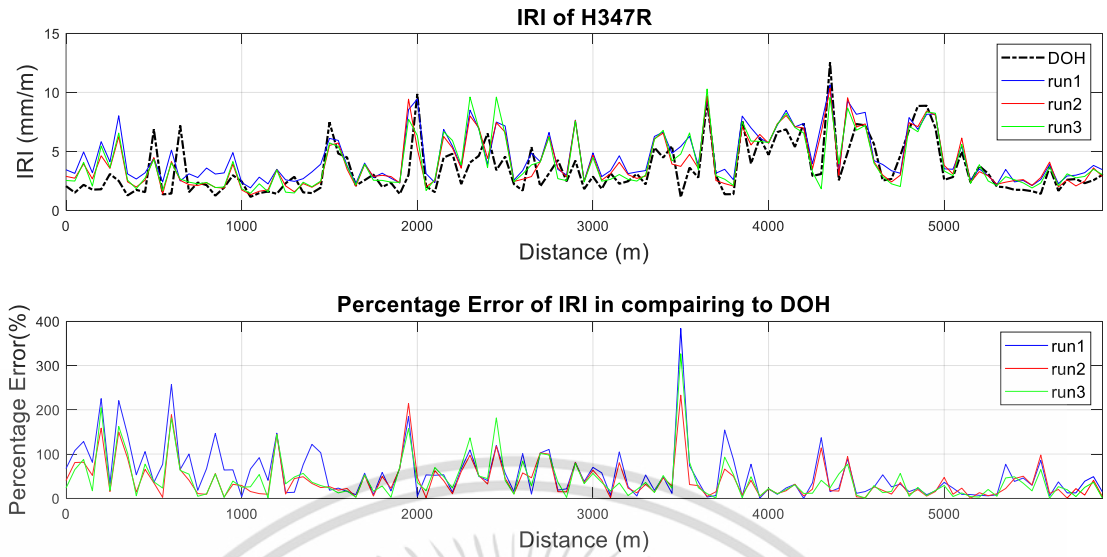


Figure 4.30 IRI of H347R and percentage error in comparing with DOH

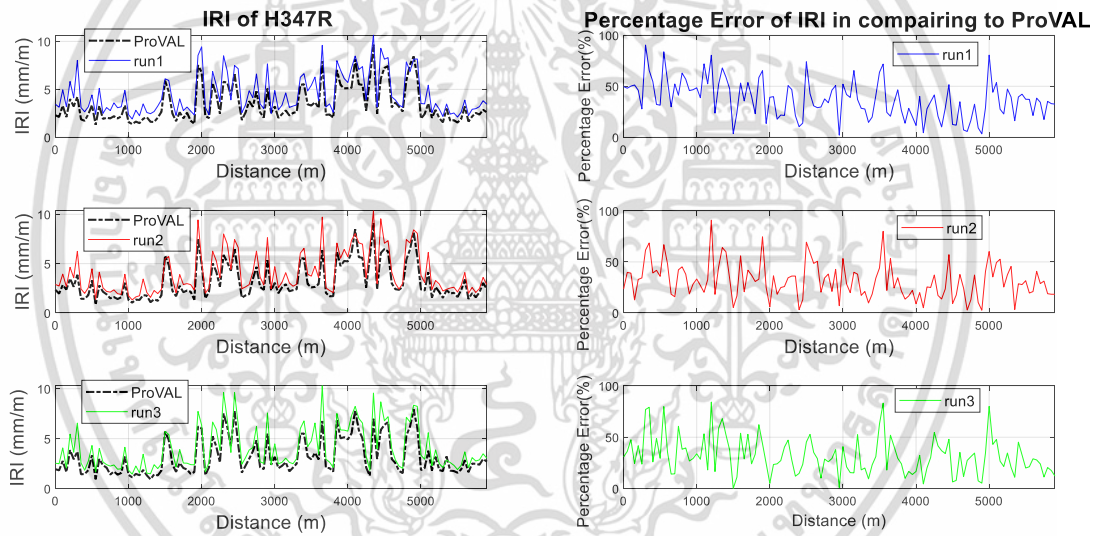


Figure 4.31 IRI of H347R and percentage error in comparing to ProVAL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHAPTER 5

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

This thesis aims to provide real road data for road profile synthesis by studying and developing a road profile measurement system, including both device and algorithm. The measurement device adopted the principle of inertial profiler, which is relatively compact, affordable, and provides sufficient measurements. The roadway coordinate was derived through integration of the vehicle's velocity, with the corrected velocity obtained via a relationship established between velocity from the satellite navigation system and velocity from OBD-II. This approach proved to be a reliable alternative when satellite signal blockage was encountered. Thai highways road profiles were determined, and then analyzed. The results were summarized into PSD roughness parameters and International Roughness Index (IRI). In order to enhance the system's capabilities, the method of "indirect IRI" was introduced, utilizing the correlation between IRI and PSD roughness parameters proposed by KROPÁČ and MÚČKA. This method is useful when real road measurement is not feasible. Instead, third-party IRI data can be utilized to determine PSD roughness and synthesize a road profile. Validation of road profile can be challenging due to limited benchmark options. In this study, the IRI database from the Department of Highways (Thailand) and the software ProVAL were used as benchmarks to validate IRI, while ProVAL was also employed for PSD validation. The system validation is shown in Figure 5.1.

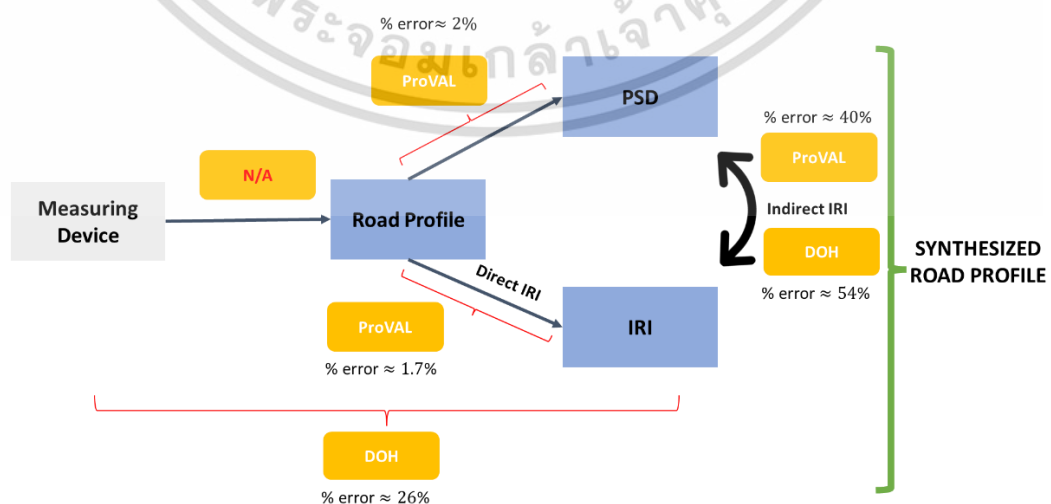


Figure 5.1 System validation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The result shows that the mean percentage error when compare with ProVAL, both PSD and direct IRI, is less than 5%. While, the mean percentage error of indirect IRI method is considerably higher suggesting that there is a need for improvement. The results can be explained in detail as follows:

IRI: Direct Method

The results suggest that the **overall IRI** calculated by direct method was closer to the IRI calculated by ProVAL program than when compared to the DOH, with average percentage error ranging from 1 to 2.75%, whereas the latter had percentage error ranging from 3-12%. The **segment IRI** calculated by direct method was closer to the IRI calculated by the ProVAL program when compared to the DOH as the mean percentage error was in the range of 1.2–4.5%. While when comparing the IRI with DOH's IRI, the mean percentage error was in the range of 22–36.7%. Although there's different in magnitude when comparing with DOH's, the IRI profiles are similar. This indicates that the measurement system prototype and road profile determination method gave similar result to DOH's inertial profiler. And, the error can be because of the varies of road used, climate, different test date and time, collected travel speed, misaligned wheel part, and different test vehicle. Considering the relatively low mean percentage error when comparing with ProVAL's and the similarity of IRI profile to DOH's, the collected data using this measurement system and procedures are acceptable.

IRI: Indirect Method

The result indicates that the indirect method has a percentage error of **overall IRI** closer to the DOH's than when compared to the result calculate by ProVAL program, with percentage error ranging from 15-36%, whereas the latter had percentage error ranging from 28-43%. The average percentage error of **segment IRI** calculated by indirect method in comparing to DOH was in the range of 34–74%. Meanwhile, when comparing the IRI value with the IRI data of the ProVAL, the average percentage error is in the range of 31–47%. The percentage error of IRI calculated by indirect method is higher than the direct method.

PSD: Indirect Method

In order to obtain a good estimate of the PSD, roughness coefficient (C) and waviness (w) are significant parameters. The percentage error of overall PSD is in the range between 0-2.4%. While the segment PSD has the mean percentage, error was in the range of 3.5–11%. A contribution of this paper indicated that varying waviness (w) provided less error than the ISO8608 fixed waviness (w=2) for all road profile. Therefore, it is the more accurate method for road profile description. The percentage error of PSD was in an acceptable range and the value of C and w sufficient for further use of the information such as road profile generation.

Recommendation

- The optimization of the relationship between roughness coefficient (C) and waviness (w) to IRI should be investigated and improved with more various and sufficient samples of road profiles.

REFERENCES

- [1] A. Ragnoli, M. R. De Blasiis, and A. Di Benedetto, "Pavement distress detection methods: A review," *Infrastructures*, vol. 3, no. 4, pp. 1–19, 2018, doi: 10.3390/infrastructures3040058.
- [2] B.-A. King, "The Effect of Road Roughness on Traffic Speed and Road Safety," no. November, pp. 1–146, 2014.
- [3] F. Tan, "REVIEW OF VEHICLE OPERATING COSTS AND ROAD ROUGHNESS : PAST , CURRENT AND FUTURE," pp. 1–24, 2012.
- [4] A. Vashisth and R. Kumar, "Review on Effect of Pavement Characteristics on Fuel Consumption," no. April, 2018.
- [5] H. M. Ngwangwa, "Calculation of road profiles by reversing the solution of the vertical ride dynamics forward problem," *Cogent Eng.*, vol. 7, no. 1, 2020, doi: 10.1080/23311916.2020.1833819.
- [6] C. Chumchan and K. Tontiwattanakul, "Health risk and ride comfort assessment by ISO2631 of an ambulance," *Proceeding - 5th Int. Conf. Eng. Appl. Sci. Technol. ICEAST 2019*, no. July, 2019, doi: 10.1109/ICEAST.2019.8802593.
- [7] L. Goubert, D. Min Tan, A. Bergiers, R. Karlsson, U. Sandberg, and J. Maeck, *State-of-the-art concerning texture influence resistance, noise emission and rolling resistance*, vol. 43, no. 0. 2014.
- [8] D. K. Singh and P. J. Gundaliya, "Flexible Pavement Evaluation using Profilometer for Unevenness," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 1–6, 2007.
- [9] G. Loprencipe and G. Cantisani, "Unified analysis of road pavement profiles for evaluation of surface characteristics," *Mod. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 8, pp. 1–14, 2013, doi: 10.5539/mas.v7n8p1.
- [10] A. Shtayat, S. Moridpour, B. Best, A. Shroff, and D. Raol, "A review of monitoring systems of pavement condition in paved and unpaved roads," *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 7, no. 5, pp. 629–638, 2020, doi: 10.1016/j.jtte.2020.03.004.
- [11] D. L. Huft, "South Dakota Profilometer," no. x, pp. 1–8.
- [12] R. Surface, P. Rsp, and M. Iii, "Road surface profiler (rsp) mark iii."

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] S. Teh, “Hawkeye 2000 has landed in Thailand.”
<https://arrrbsystems.com/hawkeye-2000-has-landed-in-thailand/>.
- [14] “CS8800 Walking Profiler:Overview.”
<https://www.smoothroad.com/equipment/walking-profilers/cs8800-walking-profiler/>.
- [15] DCL, “ROMDAS System Overview Providers of Innovative Technology for Measuring and Managing Roads,” 2016.
- [16] W. D. O. Paterson, “International Roughness Index: Relationship To Other Measures of Roughness and Riding Quality.,” *Transp. Res. Rec.*, no. 8, pp. 49–59, 1986.
- [17] A. Ragnoli, M. R. De Blasiis, and A. Di Benedetto, “Pavement distress detection methods: A review,” *Infrastructures*, vol. 3, no. 4. MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Dec. 19, 2018, doi: 10.3390/infrastructures3040058.
- [18] M. Arbabbour Bidgoli, A. Golroo, H. Sheikhzadeh Nadjari, A. Ghelmani Rashidabad, and M. R. Ganji, “Road roughness measurement using a cost-effective sensor-based monitoring system,” *Autom. Constr.*, vol. 104, no. April, pp. 140–152, 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.04.007.
- [19] D. Brown, W. Liu, and T. F. P. Henning, *Identifying Pavement Deterioration by Enhancing the Definition of Road Roughness*, no. December. 2010.
- [20] N. Convention and C. E. July, “ศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้ทางต่อความเรียบของผิวทาง The Study of road users’ satisfactions on the smoothness of highway pavements.”
- [21] A. V. Mann, K. J. McManus, and J. C. Holden, “Power spectral density analysis of road profiles for road defect assessment,” *Road Transp. Res.*, vol. 6, no. 3, pp. 36–46, 1997.
- [22] J. Feng, X. Zhang, K. Guo, F. Ma, and H. R. Karimi, “A frequency compensation algorithm of four-wheel coherence random road,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2013, 2013, doi: 10.1155/2013/986584.
- [23] V. Assets, J. Stevens, and I. S. O. S. Order, “INTERNATIONAL STANDARD ISO Mechanical vibration — Road surface profiles — Reporting of measured data,” vol. 2016, 2016, [Online]. Available:
<https://us.vcdn.net/6030008/uploads/editor/83/oyhfu0i29vek.pdf>.
- [24] P. Andrén, “Power spectral density approximations of longitudinal road

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- profiles,” *Int. J. Veh. Des.*, vol. 40, no. 1–3, pp. 2–14, 2006, doi: 10.1504/IJVD.2006.008450.
- [25] J. Qian, Y. Cen, X. Pan, Y. Tian, and S. Liu, “Spectrum parameters for runway roughness based on statistical and vibration analysis,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–13, 2021, doi: 10.1080/10298436.2021.1916821.
- [26] M. Engineering and S. Academy, “Relations between characteristics of longitudinal unevenness : a review,” *Strojnícky časopis*, vol. 54, no. June, pp. 1–16, 2016.
- [27] S. E. E. Profile, “Relations between characteristics of longitudinal unevenness of roads : erratum and amendments [Letter to the Editor] Relations between characteristics of longitudinal unevenness,” no. June, 2016.
- [28] S. Eshkabilov and A. Yunusov, “Measuring and Assessing Road Profile by Employing Accelerometers and IRI Assessment Tools,” no. May, 2018, doi: 10.11648/j.ajtte.20180302.12.

APPENDIX A: VBOX GNSS RECEIVER SPECIFICATION

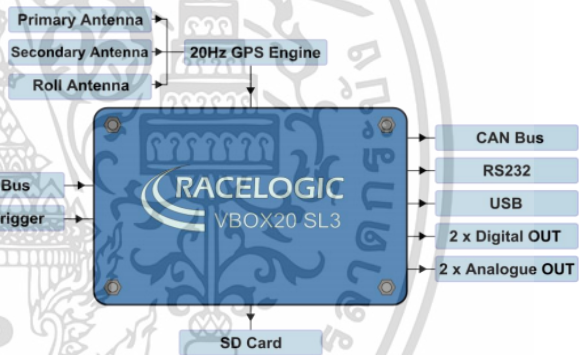
VB20SL3 20Hz GPS Data Logger With Slip, Pitch and Roll Angle

User Guide



Features

- Non-contact 20Hz speed and distance measurement using GPS
- VCI CAN input for connection to external CAN systems
- Slip, Pitch and Roll Angle and True Heading measurement
- 1 x CAN bus interface (on two sockets to allow daisy-chaining)
- USB for live data, configuration, upgrading and SD data transfer
- RS232 serial interface backup for live data and configuration
- SD Card logging
- 2 x 16bit user-configurable analogue outputs
- 2 x user-configurable digital outputs
- Brake trigger input with 210KHz scan rate
- Input voltage 6V to 30V operating range
- Logging of up to 20 data channels, in addition to up to 13 standard GPS channels
- Logging and serial rates configurable between 1Hz and 20Hz

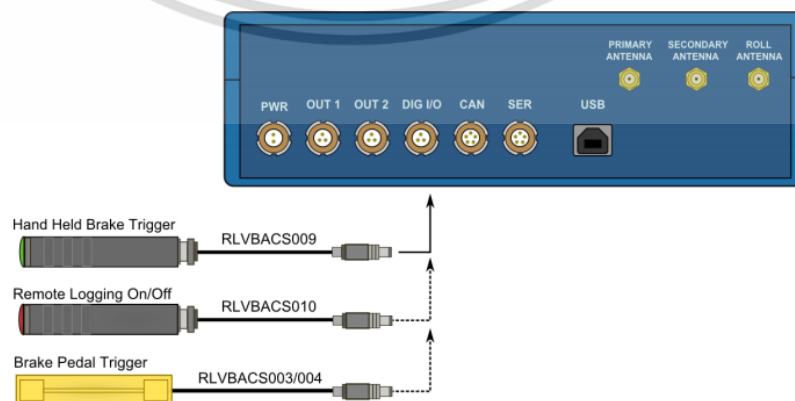


Digital Inputs

The DIGITAL I/O socket contains the two digital inputs for the VB20SL3, accessed by connecting to different combinations of the three pins.

The first digital input is most commonly referred to as the brake trigger input. This input is connected to an internal timer capture module that is able to record precisely an event time for use in brake distance calculation. This period of time is called the trigger event time, and is logged as the value in milliseconds between the last GPS sample and the trigger event. Typically, this will be connected to a pressure switch placed on the brake pedal, however a hand-held brake trigger is also available to allow the user to record marker events for other purposes.

The second digital input is used to control the VBOX's logging; a remote logging on/off switch is available for ease of use and when the front panel switch is not accessible.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specification

GPS	
Velocity	
Accuracy	0.1 Km/h (averaged over 4 samples)
Units	Km/h or Mph
Update rate	20 Hz
Maximum velocity	1000 Mph
Minimum velocity	0.1 Km/h
Resolution	0.01 Km/h
Brake Stop Accuracy	
Accuracy	+/- 10cm
Absolute Positioning	
Accuracy	3m 95% CEP**
Accuracy with DGPS	To 40cm 95% CEP**
Update rate	20 Hz
Resolution	1 cm
Slip Angle	
Accuracy	<0.5° rms at 0.5m antenna separation <0.1° rms at 2m antenna separation
YAW Rate	
Yaw rate RMS Noise	0.75 degrees per second***
Acceleration	
Accuracy	0.5%
Maximum	20 G
Resolution	0.01 G
Update rate	20Hz
Memory	
SD/MMC Card	Dependent on flash card capacity*
Recording time	* Approximately 4.3Mb per hour used when logging GPS data at 20Hz
Distance	
Accuracy	0.05% (<50cm per Km)
Units	
Update rate	20Hz
Resolution	1cm
Height accuracy	6 Metres 95% CEP**
Height accuracy with DGPS	2 Metres 95% CEP**
Time	
Resolution	0.01 s
Accuracy	0.01 s
Pitch and Roll Angle	
Accuracy	<1.0° rms at 0.5m antenna separation <0.25° rms at 2m antenna separation
Power	
Input Voltage range	6V to 30V DC
Current	Typically 560mA
Environmental and physical	
Weight	Approx 500 grammes
Size	119mm x 128mm x 30mm
Operating temperature	-30°C to +60°C
Storage temperature	-40°C to +80°C
Industrial Protective Class (with case closed)	IP 64
Definitions	
** CEP = Circle of Error Probable 95% CEP (Circle Error Probable) means 95% of the time the position readings will fall within a circle of the stated diameter	

*** Note that for comparison, the VBOX YAW02 or IMU rate sensor has an RMS noise of 0.05 degrees per second, so it should be noted that the Slip Angle sensor calculated YAW rate is significantly noisier than a solid state sensor for yaw rate measurement.

Outputs	
CAN Bus	
Bit rate	Format: Motorola 125Kbit/s, 250Kbit/s, 500Kbit/s & 1Mbit/s selectable baud rate
Identifier type	Standard 11bit or extended 2.0A
Data available	Satellites in View, Latitude, Longitude, Velocity, Heading, Altitude, Vertical velocity, Distance, Longitudinal acceleration & lateral acceleration, Distance from trigger, Trigger time, trigger Velocity, True heading, Slip angle, Pitch Angle, Yaw Rate, Lateral Velocity, Roll Angle
Analogue	
Voltage range	-5V to 5V DC
Default setting	Velocity 0.0125volts per Km/h (0 to 400Km/h)
Accuracy	0.1 Km/h
Update rate	20Hz
Digital	
Frequency range	DC to 44.4KHz
Default setting	25Hz per Km/h (0 to 400Km/h)
Accuracy	90 pulses per metre
Update rate	0.1Km/h 20Hz
* The range settings can be adjusted by the user in software or via the front panel buttons.	

Inputs	
CAN Bus	
VCI CAN mode	Format: Motorola Up to 16 channels from any external CAN module
Raceologic modules mode	Up to 20 channels from any combination of ADC02, ADC03, FIM02, TC8, Yaw sensor or CAN01
Digital	
Brake/Event Trigger	Selectable signal polarity, 16bit timer capture with 5µs resolution
On/Off Logging control	Remote log control from hand-held switch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX B: ACCELERATOMETER SPECIFICATION



Model Number 3741B122G	DC RESPONSE ACCELEROMETER		Revision: A ECN #: 39611
Performance	ENGLISH		SI
Sensitivity(± 5 %)	1000 mV/g		101.9 mV/(m/s ²)
Measurement Range	± 2 g pk		± 19.6 m/s ² pk
Frequency Range(± 5 %)	0 to 250 Hz		0 to 250 Hz
Frequency Range(± 10 %)	0 to 350 Hz		0 to 350 Hz
Resonant Frequency	≥ 1.3 kHz		≥ 1.3 kHz
Phase Response(10 Hz)	<2.5 °		<2.5 °
Broadband Resolution(0.5 to 100 Hz)	0.25 mg rms		.0025 m/s ² rms
Non-Linearity	≤ 1 % FS		≤ 1 % FS
Transverse Sensitivity	≤ 3 %		≤ 3 %
Environmental			
Overload Limit(Shock)	± 3000 g pk		± 29,420 m/s ² pk
Temperature Range(Operating)	-65 to 250 °F		-54.0 to 121 °C
Temperature Range(Storage)	-65 to 250 °F		-54.0 to 121 °C
Temperature Coefficient of Sensitivity	± 3.0 %		± 3.0 %
Zero g Offset Temperature Coefficient	± 2.0 %FSO		± 2.0 %FSO
Base Strain Sensitivity	.0001 g/με		.001 (m/s ²)/με
Electrical			
Excitation Voltage	6 to 30 VDC		6 to 30 VDC
Current Consumption	≤ 6 mA		≤ 6 mA
Output Impedance	≤ 100 Ohm		≤ 100 Ohm
Offset Voltage(0 g)	± 40 mVDC		± 40 mVDC
Common Mode Voltage(± 0.1 VDC)	+2.5 VDC		+2.5 VDC
Spectral Noise(1 to 100 Hz)	22.9 μg/√Hz		225 (μm/sec ²)/√Hz
Electrical Isolation(Case)	>10 ⁸ Ohm		>10 ⁸ Ohm
Physical			
Housing Material	Anodized Aluminum		Anodized Aluminum
Sealing	Epoxy		Epoxy
Size (Height x Length x Width)	0.30 in x 1.00 in x .85 in		7.62 mm x 25.4 mm x 21.6 mm
Weight(without cable)	0.35 oz		9.92 gm
Electrical Connector	Integral Cable		Integral Cable
Electrical Connection Position	Side		Side
Cable Termination	Pigtail Ends		Pigtail Ends
Cable Type	010 4-cond Shielded		010 4-cond Shielded
Cable Length	10 ft		3 m
Mounting	Through Holes (2)		Through Holes (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX C: LASER SPECIFICATION

Model ILD 1402-600



Model	ILD	1402-5	1402-10	1402-20	1402-50	1402-100	1402-200	1402-250VT	1402-400	1402-600	
Measuring range	mm	5	10	20	50	100	200	250	400	600	
Start of range	mm	20	20	30	45	50	60	100	200	200	
Midrange	mm	22,5	25	40	70	100	160	225	400	500	
End of range	mm	25	30	50	95	150	260	350	600	800	
Linearity	μm	5 ... 9	5 ... 18	7 ... 36	12 ... 90	20 ... 180	40 ... 360	50 ... 1200	120 ... 2000	120 ... 3000	
		$\leq 0.18\%$ FSO						$\leq 0.5\%$ FSO			
Resolution	Averaged over 64 values, μm	0.6	1	2	5	10	13	32	80	80	
	dynamic, μm	1 ... 3	2 ... 5	5 ... 10	6 ... 25	12 ... 50	13 ... 100	32 ... 300	80 ... 480	80 ... 600	
	1.5 kHz	0.02 ... 0.05 % FSO						0.02 ... 0.12 % FSO			
	digital	14 bit									
Measurement rate, programmable		1.5 kHz; 1 kHz; 750 Hz; 375 Hz; 50 Hz									
Light source		Semiconductor laser 1 mW, 670 nm (red)									
Laser class		Class 2 (II) acc. to IEC 60825-1: 2007									
Spot diameter	SMR, μm	110	110	210	1100	1400	2300	5000	2.6 x 5 mm	2.6 x 5 mm	
	MR, μm	380	650	530	110	130	2200	5000	2.6 x 5 mm	2.6 x 5 mm	
	EMR, μm	650	1200	830	1100	1400	2100	5000	2.6 x 5 mm	2.6 x 5 mm	
Protection class		IP 67									
Vibration		15 g / 10 Hz ... 1 kHz						20 g / 10 Hz ... 1 kHz	15 g / 10 Hz ... 1 kHz		
Shock		15 g / 6 ms (DIN EN 60068-2-29)									
Weight (without cable)		approx. 83 g						approx. 130 g			
Temperature stability		0.03 % FSO/°C						0.08 % FSO/°C			
Operation temperature		0 ... 50 °C									
Model	ILD	1402-5	1402-10	1402-20	1402-50	1402-100	1402-200	1402-250VT	1402-400	1402-600	
Storage temperature		-20 °C ... 70 °C									
Measurement value	analog	4 ... 20 mA 12 bit (1 ... 5 V with cable PC 1402-3/U) or									
output	digital	RS422									
Supply		11 ... 30 VDC, typical 24 VDC / 50 mA									
Controller		integral signal processor									
Elektromagnetic compatibility (EMC)		EN 61326-1: 2006-10 DIN EN 55011: 2007-11 (Group 1, class B) EN 61000-6-2: 2006-03									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX E: PROVAL SOFTWARE

ProVAL is a free engineering software application that allows users to view and analyze pavement profiles in many different ways. ProVAL is a US FHWA/LTPP product, and was originally released in 2001.

the profile viewer and analyzer (proval) is a software that was initially developed to provide a means to view and analyze pavement profiles efficiently and robustly, as part of the federal highway administration (fhwa) smoothness initiative. Proval imports, displays, and analyzes the characteristics of pavement profiles from many different sources. Proval can analyze pavement profiles using several methods, including international roughness index (iri), ride number, profile index, california profilograph, and rolling straightedge, and other more complex filters such as butterworth band pass filters and power spectral density. Version 1.0 of the proval software could import several popular profile data formats, such as erd1, txdot2, and kj law3. A new standard profile format (ppf) was also created as a native proval file specification, which proved to be stable, efficient, portable, and upgradeable. The ppf has since been recommended as the basis for the American society for testing and materials (astm) draft profile data standard. Workshop material was also developed along with the proval software to provide training in profiling fundamentals and the application of proval.

Proval application

Proval can help state highway engineers, contractors, and quality control managers improve the quality of pavement construction by analyzing a given profile quickly and providing results in a number of formats. In addition, researchers can use proval to analyze large numbers of profiles of virtually any length, frequency of data collection, and number of longitudinal traces.

The current version of ProVAL provides the following analyses:

- Standard Ride Statistics
- Fixed-Interval Ride Statistics
- Continuous Ride Statistics
- Power Spectral Density (PSD)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Profilograph Simulation
Rolling Straightedge Simulation
Localized Roughness Identification (Tex-1001-S); (Version 2.7 and earlier)
Cross Correlation
Profiler Certification
Precision and Bias (ASTM E 950)
Smoothness Assurance Module (SAM)
Automated joint Fault Measurement (AFM)
Optimal Weigh-in-Motion Site Locator (OWL)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPENDIX F: ISO 8608: SMOOTH PSD FREQUENCY BAND

Exponent EXP	Lower cut-off frequency n_l cycles/m	Centre frequency $n_c = 2^{EXP}$ cycles/m	Upper cut-off frequency n_h cycles/m
Octave bands			
-9	0,001 4	0,002 0	0,002 8
-8	0,002 8	0,003 9	0,005 5
-7	0,005 5	0,007 8	0,011 0
-6	0,011 0	0,015 6	0,022 1
-5	0,022 1	0,031 2	0,044 2
One-third-octave bands			
-4,333	0,044 2	0,049 6	0,055 7
-4	0,055 7	0,062 5	0,070 2
-3,667	0,070 2	0,078 7	0,088 4
-3,333	0,088 4	0,099 2	0,111 4
-3	0,111 4	0,125 0	0,140 3
-2,667	0,140 3	0,157 5	0,176 8
-2,333	0,176 8	0,198 4	0,222 7
-2	0,222 7	0,250 0	0,280 6
One-twelfth-octave bands			
-1,833	0,272 6	0,280 6	0,288 8
-1,750	0,288 8	0,297 3	0,306 0
-1,667	0,306 0	0,315 0	0,324 2
-1,583	0,324 2	0,333 7	0,343 5
-1,500	0,343 5	0,353 6	0,363 9
-1,417	0,363 9	0,374 6	0,385 6
-1,333	0,385 6	0,396 9	0,408 5
-1,250	0,408 5	0,420 4	0,432 8
-1,167	0,432 8	0,445 4	0,458 5
-1,083	0,458 5	0,471 9	0,485 8
-1	0,485 8	0,5	0,514 7
-0,917	0,514 7	0,529 7	0,545 3
-0,833	0,545 3	0,561 2	0,577 7
-0,750	0,577 7	0,594 6	0,612 0
-0,667	0,612 0	0,630 0	0,648 4
-0,583	0,648 4	0,667 4	0,687 0
-0,500	0,687 0	0,707 1	0,727 8
-0,417	0,727 8	0,749 2	0,771 1
-0,333	0,771 1	0,793 7	0,817 0
-0,250	0,817 0	0,840 9	0,865 5
-0,167	0,865 5	0,890 9	0,917 0
-0,083	0,917 0	0,943 9	0,971 5
0	0,971 5	1	1,029 3
0,083	1,029 3	1,059 5	1,090 5
0,167	1,090 5	1,122 5	1,155 4
0,250	1,155 4	1,189 2	1,224 1
0,333	1,224 1	1,259 9	1,296 8
0,417	1,296 8	1,334 8	1,374 0
0,500	1,374 0	1,414 2	1,455 7
0,583	1,455 7	1,498 3	1,542 2
0,667	1,542 2	1,578 4	1,633 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Exponent EXP	Lower cut-off frequency n_l cycles/m	Centre frequency $n_c = 2^{EXP}$ cycles/m	Upper cut-off frequency n_h cycles/m
0,750	1,633 9	1,681 8	1,731 1
0,833	1,731 1	1,781 8	1,834 0
0,917	1,834 0	1,887 7	1,943 1
1	1,943 1	2	2,058 6
1,083	2,058 6	2,118 9	2,181 0
1,167	2,181 0	2,244 9	2,310 7
1,250	2,310 7	2,378 4	2,448 1
1,333	2,448 1	2,519 8	2,593 7
1,417	2,593 7	2,669 7	2,747 9
1,500	2,747 9	2,828 4	2,911 3
1,583	2,911 3	2,996 6	3,084 4
1,667	3,084 4	3,174 8	3,267 8
1,750	3,267 8	3,363 6	3,462 1
1,833	3,462 1	3,563 6	3,668 0
1,917	3,668 0	3,775 5	3,886 1
2	3,886 1	4	4,117 2
2,083	4,117 2	4,237 9	4,362 0
2,167	4,362 0	4,489 8	4,621 4
2,250	4,621 4	4,756 8	4,896 2
2,333	4,896 2	5,039 7	5,187 4
2,417	5,187 4	5,339 4	5,495 8
2,500	5,495 8	5,656 9	5,822 6
2,583	5,822 6	5,993 2	6,168 8
2,667	6,168 8	6,349 6	6,535 7
2,750	6,535 7	6,727 2	6,924 3
2,833	6,924 3	7,127 2	7,336 0
2,917	7,336 0	7,551 0	7,772 3
3	7,772 3	8	8,234 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AUTHOR BIOGRAPHY

Author: Miss Pichamol Thirasuppasri

Date of Birth: 7th June 1992

Place of Birth: Ratchaburi, Thailand

Undergraduate and Graduate Education:

Master's degree in Automotive Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 2023

Bachelor's degree in Mechatronic Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 2014

Scholarships and Awards:

TAIST-Tokyo Tech Master's Program 2016-2022

The Hino Motors Scholarship 2016

Presentations and Publications:

[1] P. Thirasuppasri, C. Nuthong, and C. Srisurangkul, "Development of Road Roughness Measurement and Speed Bump Detection System Using Non-Contact Sensor," 2018, no. December.