



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การพัฒนาโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือในงานวิศวกรรมโยธาด้วยการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โลโดยใช้โปรแกรม GNU-Octave

Development of octave-based reliability analysis software for civil engineering using Monte Carlo simulation

วิวัฒน์ พัวทัศนานนท์ ธนภร ทวีวุฒิ*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Wirwat Puatatsananon Thnabhorn Thaveevouthti*

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University Ubon Ratchathani 34190

* Corresponding author.

E-mail: Thnabhorn.t@ubu.ac.th; Telephone: 0 4535 3345

วันที่รับบทความ 23 มิถุนายน 2569; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 24 สิงหาคม 2569; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 2 กันยายน 2569

วันที่ตอบรับบทความ 7 กันยายน 2569

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรม ORA-CE (Octave-Based Reliability Analysis for Civil Engineering) ที่สามารถใช้สำหรับประเมินความน่าเชื่อถือของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โลผ่านสมการสมรรถนะของปัญหาทางวิศวกรรมโยธา โดยโปรแกรมทำงานประมวลผลร่วมกันระหว่าง Microsoft Excel สำหรับรับข้อมูลนำเข้าจากผู้ใช้ได้แก่ สมการฟังก์ชันสมรรถนะของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาที่ซับซ้อนโดยผู้ใช้งานสามารถกำหนดขึ้นได้ ตัวแปรสุ่ม ชนิดของตัวแปรสุ่มที่ใช้ในสมการ และจำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการจำลอง และเชื่อมโยงไปยังโปรแกรม GNU Octave ไม่มีค่าใช้จ่ายด้านลิขสิทธิ์ในการประมวลผลคำนวณความน่าเชื่อถือของปัญหา จากนั้นได้นำโปรแกรม ORA-CE ไปวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือเทียบกับกรณีศึกษาจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยเริ่มจากการศึกษาการรู้เข้าของคำตอบของความน่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติของปัญหาเพื่อเลือกจำนวนตัวอย่างที่ทำให้เกิดการรู้เข้าของคำตอบแล้วทำการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติเชิงปริมาณเพื่อยืนยันว่าจำนวนตัวอย่างที่เลือกใช้ในการจำลองสุ่มนั้นได้ค่าคำตอบทางสถิติที่เสถียรและเชื่อถือได้แล้ว จากนั้น ใช้ผลของการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโปรแกรม ORA-CE ที่ใช้จำนวนตัวอย่างที่เลือกมาจากขั้นตอนข้างต้นมาเทียบกับกรณีศึกษาจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ซึ่งพบว่า ผลของค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติจากโปรแกรม ORA-CE มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เพียงเล็กน้อยจากผลลัพธ์ที่ได้จากกรณีศึกษาจากวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องอยู่ที่ 0.88- 2.03% แสดงถึงผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม ORA-CE มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลลัพธ์จากวรรณกรรม และจากผลจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ดังกล่าวยังช่วยยืนยันความถูกต้องของโครงสร้างสคริปต์คำนวณหลักในกระบวนการประเมินความน่าเชื่อถือของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาของโปรแกรม ORA-CE ด้วยวิธีจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โลโดยใช้โปรแกรม GNU-Octave ที่ใช้การจำลองสุ่มตัวแปรอิสระผ่านฟังก์ชันทางสถิติสำเร็จรูปใน GNU Octave ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโปรแกรม ORA-CE เป็นเครื่องมือทางเลือกที่มีประสิทธิภาพและมีความสะดวกในการประยุกต์ใช้ประเมินความปลอดภัยทางวิศวกรรมโยธาได้โดยไม่มีภาระค่าใช้จ่ายด้านลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์

คำสำคัญ

การวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ การจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โล แนวทางเชิงความน่าจะเป็น GNU-Octave

Abstract

This paper presents the development of ORA-CE (Octave-Based Reliability Analysis for Civil Engineering), a software tool designed to evaluate the reliability of civil engineering problems using Monte Carlo Simulation (MCS) based on defined performance functions. The software operates through an integrated workflow between Microsoft Excel and GNU Octave. Microsoft Excel serves as the front-end interface for user inputs—including user-defined complex performance functions, random variables, probability distribution types, and total simulation sample sizes—which are subsequently transmitted to GNU Octave, an open-source, license-free platform, for computational reliability analysis. To validate ORA-CE, benchmark case studies from the published literature were evaluated. The validation process initially involved a convergence study of the failure probability to determine an optimal sample size. A quantitative statistical error analysis was then conducted to confirm that the selected sample size yields stable and reliable statistical estimates. Subsequently, the reliability results obtained using the determined sample size were compared against reference values. The calculated failure probabilities yielded relative errors ranging from 0.88% to 2.03%, demonstrating excellent numerical agreement with the literature. Furthermore, these comparative findings confirm the validity of the core script architecture and the random variable generation utilizing built-in statistical functions in GNU Octave. Overall, ORA-CE proves to be an efficient, convenient, and cost-effective alternative tool for structural safety assessment in civil engineering without software licensing burdens.

Keywords

reliability analysis; Monte Carlo simulation; probabilistic approach; GNU octave

1. บทนำ

การวิเคราะห์ความเสี่ยงและความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง (Structural Risk and Reliability Analysis) หรือที่รู้จักกันในนาม "ระเบียบวิธีความน่าเชื่อถือ" (Reliability Method) คือ แนวทางเชิงวิศวกรรมบนรากฐานของทฤษฎีความน่าจะเป็น (Probabilistic Approach) ที่มีบทบาทสำคัญในการประเมินความปลอดภัยของชิ้นส่วนและระบบโครงสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่ใช้งานจริง แม้ว่ากรอบแนวคิดทางคณิตศาสตร์ของวิธีนี้จะถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษ 1960 ถึงต้นทศวรรษ 1970 [1] ทว่าในอดีต ระเบียบวิธียังไม่ได้รับความนิยมในทางปฏิบัติเท่าที่ควร เนื่องจากการประมวลผลจำเป็นต้องพึ่งพาสมรรถนะการคำนวณของระบบคอมพิวเตอร์ที่สูงมาก ประกอบกับข้อจำกัดด้านฐานข้อมูลความไม่แน่นอนในยุคดังกล่าว ส่งผลให้วิศวกรส่วนใหญ่ยังคงปฏิเสธวิธีเชิงความน่าจะเป็น และเลือกใช้แนวทางเชิงกำหนดค่าตายตัว (Deterministic Approach) หรือการใช้ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety) ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นหลัก [2]

อย่างไรก็ดี ในปัจจุบันงานวิศวกรรมโยธาต้องเผชิญกับความท้าทายใหม่ โดยเฉพาะการยืดอายุการใช้งานของ

โครงสร้างพื้นฐานให้ยาวนานยิ่งขึ้นภายใต้สภาพแวดล้อมที่แปรปรวนและภัยพิบัติทางธรรมชาติที่รุนแรง ส่งผลให้แนวทางเชิงกำหนดโดยการใช้ค่าความปลอดภัยแบบดั้งเดิมไม่เพียงพอต่อการพิจารณาความไม่แน่นอนของตัวแปรนำเข้าได้อย่างครอบคลุม การพัฒนาและประยุกต์ใช้วิธีการขั้นสูงจึงกลายเป็นสิ่งจำเป็น กอปรกับฐานข้อมูลความไม่แน่นอนในปัจจุบันมีมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ แนวคิดเชิงความน่าจะเป็นจึงกลับมาได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางอีกครั้ง ปัจจุบัน วิชาว่าด้วยความน่าเชื่อถือของโครงสร้างได้ถูกบรรจุเป็นส่วนสำคัญในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ชั้นนำทั่วโลก ยิ่งไปกว่านั้น เครื่องมือเหล่านี้ยังเป็นกลไกหลักในการพัฒนามาตรฐานการออกแบบใหม่ที่ใช้แทนมาตรฐานการออกแบบเดิมที่ใช้ค่าความปลอดภัย ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นหลัก เช่น มาตรฐาน ANSI/AISC 360-22 วิธี LRFD (Load and Resistance Factor Design) ซึ่งเป็นมาตรฐานการออกแบบอาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณโดยใช้ตัวประกอบน้ำหนักบรรทุกและตัวคูณลดความต้านทาน โดยที่ตัวประกอบน้ำหนักบรรทุกและตัวคูณลดความต้านทานนั้นได้มาจากการเปรียบเทียบกับวิธี FORM (First-Order Reliability Method) ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งของการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างเพื่อให้ได้ค่าดัชนีความ

นำเชื่อถือเป้าหมาย (β) ที่สอดคล้องกับพฤติกรรมโครงสร้างหลัก อีกทั้งการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของโครงสร้างยังสามารถใช้ในการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างเดิมที่ผ่านการใช้งานมานาน ตลอดจนการประเมินความเสี่ยงเชิงความน่าจะเป็นเพื่อยกระดับความปลอดภัยและความคุ้มค่าตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้าง

โดยหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ในการประเมินความน่าเชื่อถือคือการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โล (Monte Carlo Simulation, MCS) เนื่องจากเป็นวิธีมีความแม่นยำในการประเมินความน่าเชื่อถือที่เกิดจากความสามารถในการคำนวณฟังก์ชันขีดจำกัดสถานะที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Limit State Functions) [3]

แม้ว่าการประเมินความน่าเชื่อถือนี้จะได้รับความสนใจและนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง [4-5] แต่ในปัจจุบัน วิธีการดังกล่าวยังเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาสาขาอื่น ๆ อีกด้วย ซึ่งได้แก่ การประเมินเสถียรภาพของลาดดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive Slope) [6] การประเมินความจุทางระบายน้ำล้นของเขื่อนภายใต้สภาวะน้ำท่วมรุนแรงขั้นสุด [7] ตลอดจนการออกแบบผิวทางแอสฟัลต์จากการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือโดยอิงจากการยุบตัวที่ผิวหน้า [8] เป็นต้น

ปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์และซอฟต์แวร์เพื่อการวิจัยจำนวนมากเพื่อรองรับการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ เช่น CALREL [9], STRUREL [10], COSSAN [11], UQLAB [12] ซึ่งส่วนใหญ่มีขีดความสามารถสูงในการประมวลผลการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โล ทว่าชุดโปรแกรมสำเร็จรูปในเชิงพาณิชย์เหล่านี้มักมีข้อจำกัดในการเข้าถึงได้ของวิศวกรและนักวิจัยภายในประเทศไทย เช่น CALREL เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้กันในวงจำกัดเฉพาะสถาบันศึกษา STRUREL เป็นซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ ส่วน COSSAN และ UQLAB เป็นซอฟต์แวร์ โอเพนซอร์ส (Open-source) แต่เขียนบนแพลตฟอร์มของโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ลิขสิทธิ์ เป็นต้น

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องมือบนแพลตฟอร์มโอเพนซอร์ส (Open-source Platform) อย่าง GNU Octave [13] ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เสรี

สำหรับใช้คำนวณและวิเคราะห์ข้อมูลที่ออกแบบมาให้ใช้งานทดแทนโปรแกรมเชิงพาณิชย์อย่าง MATLAB ได้และเป็นซอฟต์แวร์ที่ไม่มีค่าใช้จ่ายด้านลิขสิทธิ์เพื่อใช้สำหรับประเมินความน่าเชื่อถือของปัญหาทางวิศวกรรมโยธา โดยประยุกต์ใช้และพัฒนาชุดคำสั่งคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์สำนักงานมาตรฐานที่แพร่หลายสำหรับใช้เป็นส่วนหน้าต่างรับข้อมูล input (User Interface) แล้วส่งข้อมูล input ไปยังโปรแกรม GNU Octave ที่ใช้เป็นตัวประมวลผลคำนวณได้แก่ การสุ่มจำลองตัวแปร และวิเคราะห์หาค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ (β) รวมถึงความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติของปัญหาทางวิศวกรรมโยธา (P_f) ด้วยวิธีจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โล โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมานี้ถือเป็นเครื่องมือทางเลือกที่สามารถใช้ประเมินความปลอดภัยของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาได้ และเข้าถึงได้ง่ายสำหรับวิศวกรและนักวิจัยภายในประเทศไทย

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การประเมินความน่าเชื่อถือ

การประเมินความน่าเชื่อถือของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาจะใช้หลักการเดียวกันกับการประเมินความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง โดยที่ความปลอดภัยของโครงสร้างอาคาร จะประเมินผ่านดัชนีค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า ดัชนีความน่าเชื่อถือ (Reliability Index, β) ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดสัมพัทธ์ที่ใช้สะท้อนสภาพปัจจุบันและประเมินสมรรถนะเชิงคุณภาพของโครงสร้าง (Qualitative Performance) โดยโครงสร้างที่มีค่าดัชนีความน่าเชื่อถือสูงย่อมมีแนวโน้มที่จะตอบสนองต่อฟังก์ชันการใช้งานได้ดี ในทางกลับกัน โครงสร้างที่มีค่าดัชนีความน่าเชื่อถือต่ำมักจะแสดงสมรรถนะที่ด้อยกว่า หากดัชนีดังกล่าวมีค่าต่ำเกินไป โครงสร้างนั้นอาจถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มโครงสร้างที่มีความเสี่ยงอันตราย (Hazard) โดยดัชนีความน่าเชื่อถือของโครงสร้างจะมีความสัมพันธ์กับความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติของโครงสร้าง (P_f) ตามสมการ [3]

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (1)$$

เมื่อ Φ^{-1} คือ ฟังก์ชันผกผันของการกระจายตัวสะสมแบบปกติมาตรฐาน (Inverse Standard Normal Distribution Function)

ภายใต้กรอบการประเมินความน่าเชื่อถือเบื้องต้น เกณฑ์ดัชนีความน่าเชื่อถือเป้าหมาย และความน่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กและคอนกรีตตามมาตรฐานของ U.S. Army Corps of Engineers [14] แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือเป้าหมายและเกณฑ์สมรรถนะเชิงคุณภาพของโครงสร้าง [14]

ระดับสมรรถนะที่คาดหวัง	ดัชนีความน่าเชื่อถือ (β)	ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติ (P_f)
ระดับสูง	5.0	0.0000003
ดี	4.0	0.00003
สูงกว่าค่าเฉลี่ย	3.0	0.001
ต่ำกว่าค่าเฉลี่ย	2.5	0.006
แย่	2.0	0.023
ไม่น่าพึงพอใจ	1.5	0.07
อันตราย/วิกฤต	1.0	0.16

ในการวิเคราะห์ ดัชนีความน่าเชื่อถือจะถูกกำหนดขึ้นผ่านฟังก์ชันสมรรถนะ (Performance function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้ระบุสถานะหรือขีดจำกัดความสามารถของระบบ โดยพิจารณาจากกำลังต้านทานของโครงสร้าง (Capacity, C) และน้ำหนักบรรทุกหรือแรงกระทำที่เกิดขึ้น (Demand, D หรือ Load) ภายใต้สมมติฐานที่ว่าทั้ง C และ D ต่างเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรสุ่มพื้นฐานอื่น ๆ ทั้งนี้ ฟังก์ชันสมรรถนะสามารถกำหนดได้ตามสมการ [3]

$$g(C_1, C_2, \dots, C_n, D_1, D_2, \dots, D_n) = C(C_1, C_2, \dots, C_n) - D(D_1, D_2, \dots, D_n) \quad (2)$$

โครงสร้างจะเกิดการวิบัติตามเงื่อนไขเมื่อค่าของฟังก์ชันสมรรถนะมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ($g < 0$) ในกรณีที่กำลังต้านทาน C และน้ำหนักบรรทุก D เป็นตัวแปรสุ่มอิสระที่มีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal random variables) ซึ่งมีฟังก์ชันความ

หนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function, PDF) เป็น $f_C(C)$ และ $f_D(D)$ ตามลำดับ ส่งผลให้ฟังก์ชันสมรรถนะ (g) มีการกระจายตัวแบบปกติด้วยเช่นกัน โดยมีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น $f_g(g)$ ซึ่งสามารถคำนวณค่าเฉลี่ย (μ_g) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ_g) ได้ตามสมการที่ (3) และ (4) [3]

$$\mu_g = \mu_C - \mu_D \quad (3)$$

$$\sigma_g = \sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_D^2} \quad (4)$$

โดยที่ μ_C และ μ_D คือค่าเฉลี่ยของกำลังต้านทานและน้ำหนักบรรทุกทุกตามลำดับ และ σ_C และ σ_D คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกำลังต้านทานและน้ำหนักบรรทุกทุกตามลำดับ จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ดัชนีความน่าเชื่อถือ (β) ซึ่งแสดงถึงระยะห่างระหว่างค่าเฉลี่ยของฟังก์ชันสมรรถนะไปยังจุดวิบัติตามมาตรฐานสถิติ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) และ (6) [3]

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\mu_C - \mu_D}{\sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_D^2}} \quad (6)$$

2.2 การจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โล

การจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โล เป็นหนึ่งในระเบียบวิธีเชิงความน่าจะเป็นที่นิยมนำมาใช้ในการประเมินความไม่แน่นอนของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของโครงสร้างอย่างเป็นระบบ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการแบบจำลองจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความน่าเชื่อถือและความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติของโครงสร้าง (P_f) ทั้งนี้ ขั้นตอนการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โล มีกระบวนการดำเนินงานดังต่อไปนี้ [3]

1) การกำหนดค่าเริ่มต้นของระบบสุ่มตัวเลข (Initialization) โดยเริ่มต้นชุดคำสั่งและฟังก์ชันสุ่มตัวเลข (Random Number Generator) ภายในโปรแกรมคำนวณ

2) การประมวลผลการจำลองซ้ำ โดยดำเนินการวิเคราะห์และคำนวณซ้ำเป็นจำนวน n ครั้ง โดยในแต่ละรอบการจำลองจะมีขั้นตอนย่อยดังนี้

2.1) ดำเนินการสุ่มค่าของตัวแปรอิสระแต่ละตัวแปรตามลักษณะการกระจายตัวทางสถิติที่กำหนด

2.2) คำนวณค่าของฟังก์ชันสมรรถนะจากกลุ่มตัวแปรสุ่มในรอบนั้น ๆ

2.3) ประมวลผลและบันทึกผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในแต่ละรอบไว้ในหน่วยความจำ

3) ประเมินความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติจากการนับจำนวนครั้งของการจำลองทั้งหมดที่ฟังก์ชันสมรรถนะแสดงค่าชี้วัดถึงสภาวะวิบัติ (n_f) (เช่น ค่าของฟังก์ชันสมรรถนะมีค่าน้อยกว่าศูนย์) จากนั้นคำนวณหาความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติของโครงสร้าง (P_f) ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (7)

$$P_f = \frac{n_f}{n} \quad (7)$$

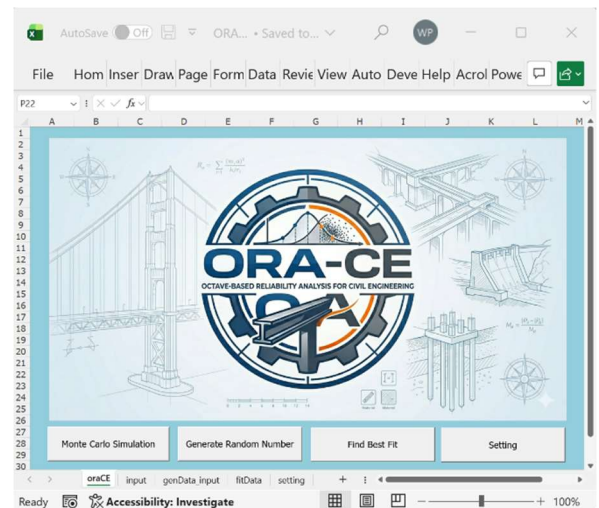
4) คำนวณค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ (β) จากการแปลงค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติให้อยู่ในรูปของดัชนีความน่าเชื่อถือ โดยอาศัยฟังก์ชันผกผันของการกระจายตัวสะสมแบบปกติมาตรฐาน (Φ^{-1}) จากสมการ $\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$ ดังแสดงในสมการที่ (1)

สำหรับการประเมินความน่าเชื่อถือของปัญหาอื่นๆทางวิศวกรรมโยธานั้นจะใช้หลักการเดียวกันกับการประเมินความน่าเชื่อถือของโครงสร้างผ่านการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันสมรรถนะที่แสดงขีดจำกัดความสามารถของปัญหา ดังแสดงในสมการที่ (2) โดยในกรณีของปัญหาอื่นๆทางวิศวกรรมโยธา C และ D คือฟังก์ชันที่แสดง Capacity และฟังก์ชันที่แสดง Demand ของปัญหาอื่นๆทางวิศวกรรมโยธาที่พิจารณา ตามลำดับ เช่น ในกรณีที่ต้องการประเมินความน่าเชื่อถือของกำแพงกันดินแบบคานยื่นเนื่องจากการพลิกคว่ำ จะใช้ฟังก์ชันสมรรถนะ $g = C - D$ โดยที่ C เป็นฟังก์ชันของโมเมนต์ต้านทานที่เกิด

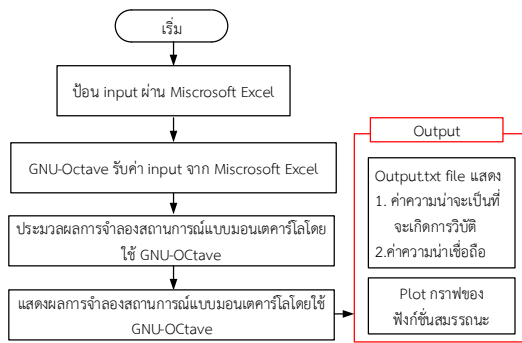
จากน้ำหนักตัวกำแพงเองและน้ำหนักดินถมบนฐานรากรอบจุดหมุนและ D เป็นฟังก์ชันของโมเมนต์พลิกคว่ำที่เกิดจากแรงดันดินด้านข้าง (Active Earth Pressure) และแรงดันจากน้ำหนักบรรทุกจร (Surcharge) รอบจุดหมุน เป็นต้น จากนั้นให้ทำการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาที่พิจารณาด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โลจากฟังก์ชันสมรรถนะของปัญหาที่กำหนดไว้ข้างต้น

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการพัฒนาโปรแกรม "ORA-CE" (Octave-Based Reliability Analysis in Civil Engineering, ดังแสดงในรูปที่ 1) เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เป็นส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (User Interface) ในการรับข้อมูลนำเข้า (Input Data) จากนั้น ระบบจะส่งผ่านข้อมูลนำเข้าดังกล่าวจากโปรแกรม Microsoft Excel ไปยังโปรแกรม GNU-Octave [13] เพื่อคำนวณความน่าเชื่อถือของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โล และแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 2



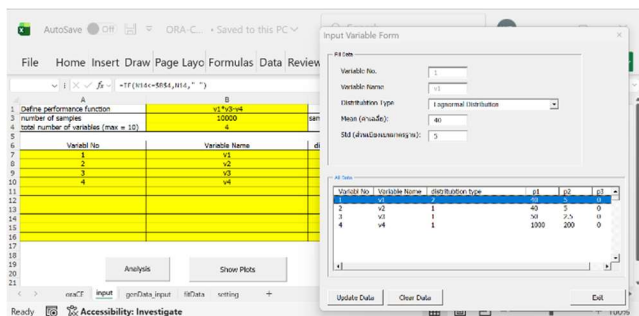
รูปที่ 1 โปรแกรม ORA-CE



รูปที่ 2 กระบวนการทำงานของโปรแกรม ORA-CE

จากรูปที่ 2 กระบวนการทำงานของโปรแกรม ORA-CE แสดงเป็นขั้นตอนโดยละเอียดได้ ดังนี้

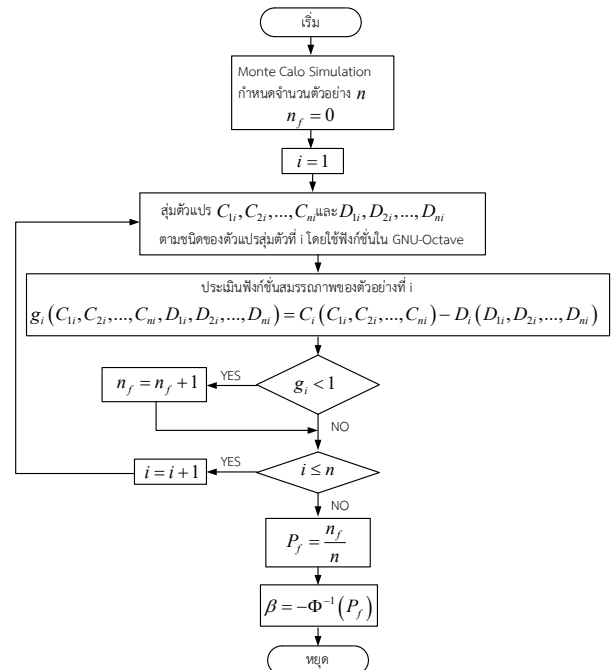
3.1) ในขั้นตอนของการรับข้อมูลนำเข้า (Input Data) ผู้ใช้งานต้องกรอกข้อมูลนำเข้าใน Microsoft Excel ไฟล์ ชื่อ oraCE.xlsm ได้แก่ 1) สมการฟังก์ชันสมรรถนะ (Performance Function หรือ Limit State Function) สำหรับปัญหาทางวิศวกรรมโยธาที่ซับซ้อน ซึ่งผู้ใช้งานสามารถกำหนดรูปแบบสมการได้เอง (User-Defined Function) โดยป้อนสมการให้อยู่ในรูปของสัญลักษณ์ตัวแปรสุ่ม $v_1, v_2, \dots, v_{10}$ 2) ตัวแปรสุ่ม และ 3) ชนิดการกระจายตัวทางสถิติของแต่ละตัวแปรสุ่มที่ใช้ในสมการ และค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของตัวแปรสุ่ม และ 4) จำนวนชุดตัวอย่างทั้งหมด (N) ที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 input จาก MS Excel ของโปรแกรม ORA-CE

3.2) หลังจากผู้ใช้งานกรอกข้อมูลนำเข้าดังกล่าวครบแล้ว และคลิกที่ปุ่ม “Analysis” ในไฟล์ ชื่อ oraCE.xlsm จากนั้น ระบบจะส่งผ่านข้อมูลนำเข้าดังกล่าวจากโปรแกรม Microsoft

Excel ไปยังโปรแกรม GNU-Octave [13] เพื่อคำนวณความ
น่าเชื่อถือของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาด้วยวิธีจำลองสุ่มมอน
เตคาร์โล โดยมีขั้นตอนการคำนวณ (ดังแสดงในรูปที่ 4)
ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4 กระบวนการในการประเมินความน่าเชื่อถือของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาด้วยวิธีจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โลโดยใช้โปรแกรม GNU-Octave ของโปรแกรม ORA-CE

1) ขั้นตอนแรก โปรแกรม GNU-Octave จะทำการแปลงสภาพข้อความสมการที่อ่านมาจาก Microsoft Excel ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันประมวลผล (Function Handle) ในหน่วยความจำ RAM โดยการเชื่อมต่อสัญลักษณ์ระบุตัวแปร @(v1,v2,...,v10) เข้ากับตัวสมการด้วยคำสั่ง strcat และเปลี่ยนชนิดข้อมูลข้อความให้กลายเป็นฟังก์ชันประมวลผลผ่านคำสั่ง str2func

2) จากนั้น ในขั้นตอนการคำนวณการจำลองสุ่ม จะทำการวนลูตามจำนวนชุดตัวอย่าง (n) เพื่อสุ่มสร้างค่าตัวแปรสุ่มของตัวแปรแต่ละตัวในแต่ละรอบการจำลองตามประเภทการกระจายตัวทางสถิติที่ระบุไว้ โดยโปรแกรม GNU-Octave จะใช้กลไกการสร้างตัวเลขสุ่มเทียม (Pseudo-Random Number Generator: PRNG) ด้วยอัลกอริทึม Mersenne Twister (mt19937) ที่มีคาบการซ้ำยาวถึง $2^{19937} - 1$ และมีความเป็นอิสระทางสถิติสูง [13]

ตารางที่ 2 สรุปฟังก์ชันทางสถิติสำเร็จรูปสำหรับการสุ่มตัวแปรที่ใช้ในงานวิศวกรรมโยธาในโปรแกรม GNU Octave

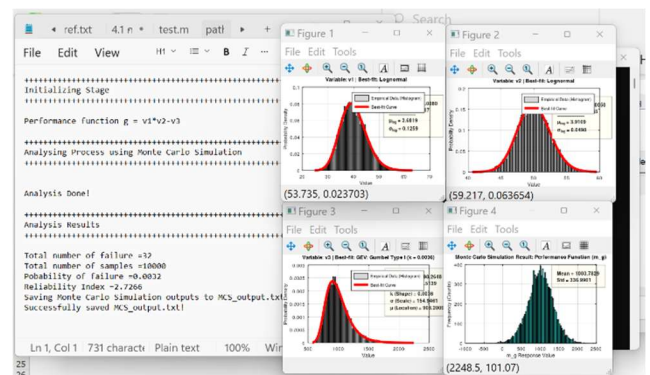
ตัวแปรสุ่มที่ใช้ในงานวิศวกรรมโยธา (Distribution)	ฟังก์ชันใน Octave [13]	รูปแบบคำสั่ง (Syntax) และพารามิเตอร์ [13]
Normal [15-21]	normrnd	R=normrnd (mu, sigma, row, col) mu=ค่าเฉลี่ย, sigma= ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Lognormal [15,16, 18-23]	lognrnd	R=lognrnd (mu, sigma, row, col) mu และ sigma ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ ln(x)
Gumbel (Extreme Value Type I) [17, 19, 21, 22, 24, 25]	gevrnd	R=gevrnd (k, sigma, mu, row, col) ใช้ Generalized Extreme Value โดยกำหนดค่ารูปร่าง k = 0
Fréchet (Extreme Value Type II) [15, 20, 24, 26-28]	gevrnd	R=gevrnd (k, sigma, mu, row, col) ใช้ Generalized Extreme Value โดยกำหนดค่ารูปร่าง k > 0
Weibull (Extreme Value Type III) [19, 25, 29]	gevrnd	R=gevrnd (k, sigma, mu, row, col) ใช้ Generalized Extreme Value โดยกำหนดค่ารูปร่าง k < 0
Exponential [15, 21, 30]	exprnd	R=exprnd (lambda, row, col) Lambda คือ ค่าเฉลี่ย (mu = 1/lambda)
Poisson [18, 23, 28, 31]	poissrnd	R=poissrnd (lambda, row, col) Lambda = อัตราการเกิดเฉลี่ยของเหตุการณ์ในช่วงเวลา

และในขั้นตอนของการสุ่มค่าของตัวแปรอิสระแต่ละตัวแปรตามลักษณะการกระจายตัวทางสถิติแต่ละชนิดที่ใช้ในงานวิศวกรรมโยธากำหนดนี้จะใช้ฟังก์ชันทางสถิติสำเร็จรูปใน GNU Octave ดังแสดงในตารางที่ 2

3) จากนั้นโปรแกรม GNU-Octave จะนำค่าตัวแปรสุ่มที่จำลองได้ในแต่ละรอบเข้าประเมินผลในฟังก์ชันสมรรถนะ $g_i(C_i, D_i)$ หากค่า $g_i(C_i, D_i) < 0$ ระบบจะนับสะสมเป็นจำนวนครั้งที่เกิดการวิบัติ (n_f) เมื่อครบรอบการจำลอง จากนั้น โปรแกรม GNU-Octave จะคำนวณหาความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติ $\left(P_f = \frac{n_f}{n}\right)$ และนำไปคำนวณหาค่าดัชนีความน่าเชื่อถือจากสมการ $\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$

4) จากนั้น โปรแกรมจะทำการปิดและจัดเรียงข้อมูลชุดตัวแปรสุ่มที่สุ่มได้ทั้งหมดรวมกับค่าฟังก์ชันสมรรถนะ $g(C, D)$ ในแต่ละรอบการคำนวณ เพื่อส่งออกและบันทึกผลเป็นไฟล์ข้อมูลดิบ output.txt โดยอัตโนมัติ พร้อมระบุชื่อหัวข้อคอลัมน์ (Header Row) ตามชื่อตัวแปรจริง เพื่ออำนวยความสะดวกในการนำข้อมูลดิบไปตรวจสอบและวิเคราะห์ผลต่อในเชิงลึก และใช้ในการสร้างกราฟการกระจายของแต่ละตัวแปร และกราฟของฟังก์ชันสมรรถนะต่อไป

5) เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์ผลเสร็จแล้วจะแสดงผลลัพธ์ของปัญหาในรูปของดัชนีความน่าเชื่อถือและโอกาสที่จะเกิดการวิบัติของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 output จากการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือด้วยวิธีจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์ลของโปรแกรม ORA-CE

ภายหลังจากที่โปรแกรม ORA-CE ได้รับการพัฒนาเสร็จเรียบร้อยแล้ว ในช่วงแรกก่อนการนำโปรแกรม ORA-CE ไปใช้งาน โปรแกรม ORA-CE ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างสคริปต์คำนวณหลักในกระบวนการประเมินความน่าเชื่อถือของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาของโปรแกรม ORA-CE

ด้วยวิธีจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โลโดยใช้โปรแกรม GNU-Octave ที่ใช้การจำลองสุ่มตัวแปรอิสระผ่านฟังก์ชันทางสถิติสำเร็จรูปใน GNU Octave โดยการกำหนดค่า Seed เริ่มต้นสถิติในโปรแกรม GNU-Octave ด้วยคำสั่ง `randn('state', 0)` และ `rand('state', 0)` ก่อนเริ่มกระบวนการสุ่มตัวอย่างในการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โล เพื่อให้ชุดตัวเลขที่สุ่มขึ้นมาเหมือนเดิมทุกครั้งทำให้ได้ผลลัพธ์เหมือนเดิมสำหรับจำนวนตัวอย่างที่เลือกสุ่มเท่าเดิม รักษาความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) ของแบบจำลอง ซึ่งกระบวนการนี้จัดทำเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างสคริปต์คำนวณหลักในกระบวนการประเมินความน่าเชื่อถือของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาของโปรแกรม ORA-CE

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานของชุดคำสั่งของแบบจำลองมอนเตคาร์โลในโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว การกำหนดค่า Seed เริ่มต้นสถิติในโปรแกรม GNU-Octave จะเปลี่ยนเป็นการสุ่มตัวอย่างแบบอิสระด้วยคำสั่ง `randn('state')` และ `rand('state')` ก่อนเริ่มกระบวนการสุ่มตัวอย่าง เพื่อให้คอมพิวเตอร์สุ่มตัวเลขแบบอิงตามเวลาของระบบ ซึ่งจะใช้ในการสอบเทียบกับผลการศึกษาในเอกสารอ้างอิงในหัวข้อถัดไป

4. ผลการวิจัย

หลังจากผ่านที่โปรแกรม ORA-CE ผ่านการตรวจสอบถึงความถูกต้องของโครงสร้างสคริปต์คำนวณหลักในกระบวนการประเมินความน่าเชื่อถือของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาของโปรแกรม ORA-CE ด้วยวิธีจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โลแล้ว ในหัวข้อนี้ ได้นำโปรแกรม ORA-CE ที่ได้พัฒนาขึ้นมาใช้ในการวิเคราะห์ และตรวจสอบผลของความน่าเชื่อถือเทียบกับผลลัพธ์จากตัวอย่างปัญหาที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [3] และตัวอย่างการศึกษาจากงานวิจัย [32] โดยมีขั้นตอนในการตรวจสอบ ดังนี้

1) การศึกษาการลู่เข้าของคำตอบ (Convergence Study) โดยใช้โปรแกรม ORA-CE ในการวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการลู่เข้าของค่าความน่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติ (P_f) ของปัญหาตัวอย่างที่พิจารณาเมื่อจำนวนตัวอย่าง (n) เพิ่มขึ้น โดยทำการวิเคราะห์กรณีศึกษาจากเอกสารอ้างอิง [3] ตั้งแต่ จำนวนตัวอย่าง n เท่ากับ 1,000 ถึง 100,000 ตัวอย่าง

เพื่อสังเกตจุดเสถียรของคำตอบสำหรับปัญหาที่มีโอกาสเกิดการวิบัติต่ำ

2) การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติเชิงปริมาณ (Quantitative Error Analysis) เพื่อยืนยันว่าจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการจำลองสุ่มนั้นสุ่มเจอจุดวิบัติมากพอจนได้ค่าทางสถิติที่เสถียรและเชื่อถือได้แล้ว งานวิจัยนี้ได้นำคำตอบที่ได้จากขั้นตอนที่ 1) มาประเมินความแม่นยำและความเสถียรทางสถิติของการจำลองสุ่มด้วยวิธีมอนเตคาร์โล ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของตัวประมาณค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติ ($COV(P_f)$) ตามหลักทฤษฎีความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง [3] ดังแสดงในสมการ

$$COV(P_f) = \sqrt{\frac{1-P_f}{n \cdot P_f}} \quad (8)$$

เมื่อ P_f คือความน่าจะเป็นของการวิบัติที่ประเมินได้ และ n คือจำนวนชุดตัวอย่างทั้งหมด โดยในทางสถิติกำหนดให้ค่า $COV(P_f) \leq 10\%$ เป็นเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้สำหรับความนิ่งของคำตอบ [3] จากนั้นทำการประเมินความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error) ของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม ORA-CE เทียบกับผลลัพธ์อ้างอิงของตัวอย่างในเอกสารอ้างอิง [3] [32] เพื่อตรวจสอบความถูกต้องเชิงตัวเลขของปัญหา

โดยผลของการศึกษาที่ได้แสดงดังต่อไปนี้

4.1 ตัวอย่างจากเอกสารอ้างอิง [3]

ตัวอย่างจากเอกสารอ้างอิง [3] จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ 1) กรณีที่ตัวแปรสุ่มทั้งหมดเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ (Normal random variates) และ 2) กรณีที่ตัวแปรสุ่มเป็นตัวแปรสุ่มต่างชนิดกันและไม่ใช่แบบปกติ ซึ่งมีรายละเอียดของตัวอย่างทั้งสองกรณี ดังนี้

1) กรณีตัวแปรสุ่มทั้งหมดเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ

ตัวอย่างนี้กล่าวถึงการประเมินความน่าเชื่อถือของคานเหล็กภายใต้โมเมนต์ดัดที่กระทำต่อคาน โดยฟังก์ชันสมรรถนะ

ของกำลังรับแรงดัดพลาสติกของหน้าตัดคานเหล็กภายใต้โมเมนต์ดัดที่กระทำต่อคานมีค่าเท่ากับ

$$g = YZ - M \quad (9)$$

เมื่อ Y คือ หน่วยแรงดึงครากของเหล็ก (yield strength) Z คือ โมดูลัสหน้าตัดพลาสติก (plastic section modulus) ของหน้าตัดเหล็ก และ M คือ โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นจริง ณ หน้าตัดที่พิจารณา โดยในตัวอย่างนี้กำหนดให้ตัวแปรทุกตัวเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ ไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน (uncorrelated) และพิจารณาคานที่มีค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (coefficients of variation, δ) ดังต่อไปนี้

$$\mu_Y = 40 \text{ ksi}, \mu_Z = 50 \text{ in}^3, \mu_M = 1,000 \text{ ksi-in}$$

$$\delta_Y = 0.10, \delta_Z = 0.05, \delta_M = 0.2$$

2) กรณีที่ตัวแปรสุ่มเป็นตัวแปรสุ่มต่างชนิดกัน และไม่ใช่ว่าตัวแปรสุ่มแบบปกติ

เมื่อพิจารณาปัญหาของของกำลังรับแรงดัดพลาสติกของหน้าตัดคานเหล็กภายใต้โมเมนต์ดัดที่กระทำต่อคาน เช่นเดียวกับหัวข้อ 1) แต่ในกรณีนี้กำหนดให้ตัวแปรสุ่มมีลักษณะการกระจายตัวของตัวแปรที่แตกต่างกัน โดยกำหนดให้ Y มีการแจกแจงแบบ lognormal Z มีการแจกแจงแบบ lognormal และ M มีการแจกแจงแบบ extreme value type I โดยมีค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่าง ๆ รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน เท่ากันกับค่าที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อย่อยที่ 1)

โดยการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของตัวอย่างในเอกสารอ้างอิง [3] ทั้งสองกรณีได้ใช้วิธีความน่าเชื่อถืออันดับที่หนึ่ง (First Order Reliability Method, FORM) ในการประเมิน จากนั้น ใช้โปรแกรม ORA-CE ในการประเมินความน่าเชื่อถือของตัวอย่างในเอกสารอ้างอิง [3] ได้ผลการศึกษา ดังนี้

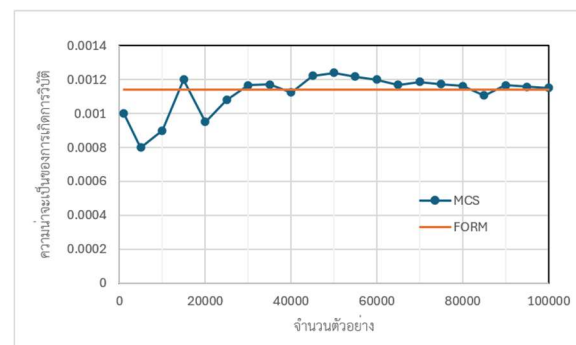
4.1.1 การศึกษาการลู่เข้าของคำตอบของตัวอย่างจากเอกสารอ้างอิง [3]

การศึกษาการลู่เข้าของคำตอบของตัวอย่างจะใช้โปรแกรม ORA-CE ในการวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของการลู่เข้าของค่าความ

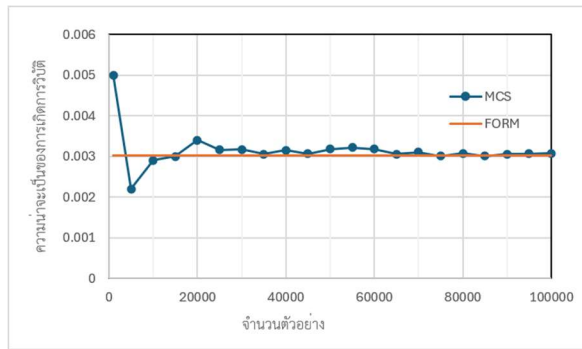
น่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติ (P_f) ของปัญหาตัวอย่างเมื่อจำนวนตัวอย่าง (n) เพิ่มขึ้น โดยทำการวิเคราะห์กรณีศึกษาทั้งสองกรณีของตัวอย่างจากเอกสารอ้างอิง [3] ตั้งแต่จำนวนตัวอย่าง n เท่ากับ 1,000 ถึง 100,000 ตัวอย่าง ได้ผลของการศึกษาการลู่เข้าของค่าความน่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติของตัวอย่างปัญหาในเอกสารอ้างอิง [3] สำหรับกรณีที่ตัวแปรสุ่มทั้งหมดเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ ดังแสดงในรูปที่ 6 และสำหรับกรณีที่ตัวแปรสุ่มเป็นตัวแปรสุ่มต่างชนิดกัน และไม่ใช่ว่าตัวแปรสุ่มแบบปกติดังแสดงในรูปที่ 7 ตามลำดับ

จากการศึกษาการลู่เข้าของค่าความน่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติ (P_f) ของปัญหาตัวอย่างที่พิจารณาเมื่อจำนวนตัวอย่าง (n) เพิ่มขึ้น พบว่า

1) สำหรับตัวอย่างปัญหาในเอกสารอ้างอิง [3] ในกรณีที่ตัวแปรสุ่มทั้งหมดเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ (จากรูปที่ 6) พบว่าในช่วง $n < 30,000$ ตัวอย่าง ค่าสถิติของคำตอบจะมีความผันผวนสูง แต่เมื่อ $n \geq 60,000$ ตัวอย่าง เส้นกราฟของค่าความน่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติจะลู่เข้าสู่สภาวะคงที่อย่างชัดเจน



รูปที่ 6 ผลการศึกษาการลู่เข้าของค่าความน่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติ (P_f) ของปัญหาตัวอย่างปัญหาในเอกสารอ้างอิง [3] สำหรับกรณีที่ตัวแปรสุ่มทั้งหมดเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ



รูปที่ 7 ผลการศึกษาการลู่เข้าของค่าความน่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติ (P_f) ของปัญหาตัวอย่างปัญหาในเอกสารอ้างอิง [3] สำหรับกรณีที่ตัวแปรสุ่มเป็นตัวแปรสุ่มต่างชนิดกัน และไม่ใช้ตัวแปรสุ่มแบบปกติ

2) สำหรับตัวอย่างปัญหาในเอกสารอ้างอิง [3] ในกรณีที่ตัวแปรสุ่มเป็นตัวแปรสุ่มต่างชนิดกัน และไม่ใช้ตัวแปรสุ่มแบบปกติ (จากรูปที่ 7) พบว่า ในช่วง $n < 30,000$ ตัวอย่าง ค่าสถิติของค่าตอบจะมีความผันผวนสูง แต่เมื่อ $n \geq 30,000$ ตัวอย่าง เส้นกราฟของค่าความน่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติจะลู่เข้าสู่สถานะคงที่อย่างชัดเจน

ดังนั้น สำหรับทั้งสองกรณีของตัวอย่างนี้ เลือกผลลัพธ์จากโปรแกรม ORA-CE ที่ใช้จำนวนตัวอย่าง n เท่ากับ 100,000 ตัวอย่างเพื่อทำการประเมินความเสถียรทางสถิติของการจำลองสุ่มด้วยวิธีมอนเตคาร์โล และประเมินความถูกต้องเชิงตัวเลขของปัญหาต่อไป

4.1.2 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางสถิติเชิงปริมาณ

การประเมินความเสถียรทางสถิติของการจำลองสุ่มด้วยวิธีมอนเตคาร์โล และประเมินความถูกต้องเชิงตัวเลขของปัญหาสามารถทำได้โดยการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของตัวประมาณค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติ ($COV(P_f)$) และความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม ORA-CE ที่ใช้จำนวนตัวอย่าง n เท่ากับ 100,000 ตัวอย่างเทียบกับผลลัพธ์อ้างอิงของตัวอย่างในเอกสารอ้างอิง [3] โดยผลการประเมินดังกล่าวแสดงในตารางที่ 3 สำหรับตัวอย่างปัญหาในเอกสารอ้างอิง [3] ในกรณีที่ตัวแปรสุ่มทั้งหมดเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ และแสดงในตารางที่ 4 สำหรับตัวอย่างปัญหาในเอกสารอ้างอิง [3] ในกรณีที่ตัวแปร

สุ่มเป็นตัวแปรสุ่มต่างชนิดกัน และไม่ใช้ตัวแปรสุ่มแบบปกติตามลำดับ

1) การประเมินความเสถียรทางสถิติของการจำลองสุ่มด้วยวิธีมอนเตคาร์โล

จากการศึกษา พบว่า

1.1) ผลลัพธ์จากโปรแกรม ORA-CE ที่ใช้จำนวนตัวอย่าง n เท่ากับ 100,000 ตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างปัญหาในเอกสารอ้างอิง [3] ในกรณีที่ตัวแปรสุ่มทั้งหมดเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติที่แสดงในตารางที่ 3 ให้ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติ $P_f = 0.00115$ และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของตัวประมาณค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติ $COV(P_f) = 9.32\%$

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของตัวประมาณค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติ กับความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม ORA-CE เทียบกับผลลัพธ์อ้างอิงของตัวอย่างในเอกสารอ้างอิง[3] สำหรับกรณีที่ตัวแปรสุ่มทั้งหมดเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ

แหล่งที่มา (วิธีการ คำนวณ)	ดัชนี ความ น่าเชื่อถือ อ	ความ น่าจะเป็น ที่จะเกิด การวิบัติ	ค่าสัมประสิทธิ์ ความแปรปรวน ของตัวประมาณ ค่าความน่าจะเป็น ของการ วิบัติ ($COV(P_f)$)	ความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์ ของความน่าจะเป็น ที่จะเกิด การวิบัติเทียบกับ ผลจาก เอกสาร อ้างอิง
เอกสาร อ้างอิง [3] (FORM)	3.05	0.00114	-	-
โปรแกรม ORA-CE (MCS 100,000 ตัวอย่าง)	3.0485	0.00115	9.32%	0.88%

1.2) ผลลัพธ์จากโปรแกรม ORA-CE ที่ใช้จำนวนตัวอย่าง n เท่ากับ 100,000 ตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างปัญหาในเอกสารอ้างอิง [3] ในกรณีที่ตัวแปรสุ่มเป็นตัวแปรสุ่มต่างชนิดกัน และไม่ใช้ตัวแปรสุ่มแบบปกติที่แสดงในตารางที่ 4 ให้ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติ $P_f = 0.00308$ และมีค่า

สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของตัวประมาณค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติ $COV(P_f) = 5.69\%$

เนื่องจากค่า $COV(P_f)$ ที่ได้จากการศึกษาของตัวอย่างทั้งสองกรณีมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 10% แสดงถึงจำนวนชุดตัวอย่าง n เท่ากับ 100,000 ตัวอย่าง ที่ใช้ในการจำลองสุ่มของตัวอย่างทั้งสองกรณีนั้นมากพอจนได้ค่าคำตอบทางสถิติที่เสถียร

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของตัวประมาณค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติ กับความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม ORA-CE เทียบกับผลลัพธ์อ้างอิงของตัวอย่างในเอกสารอ้างอิง[3] สำหรับกรณีที่ตัวแปรสุ่มเป็นตัวแปรสุ่มต่างชนิดกัน และไม่ใช้ตัวแปรสุ่มแบบปกติ

แหล่งที่มา (วิธีการ คำนวณ)	ดัชนี ความ น่าเชื่อถือ	ความ น่าจะเป็น ที่จะเกิด การวิบัติ	ค่าสัมประสิทธิ์ ความแปรปรวน ของตัวประมาณ ค่าความน่าจะเป็น ของการ วิบัติ $(COV(P_f))$	ความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์ ของความน่าจะเป็น ที่จะเกิด การวิบัติเทียบ กับผลจาก เอกสาร อ้างอิง
เอกสาร อ้างอิง [3] (FORM)	2.745	0.00302	-	-
โปรแกรม ORA-CE (MCS 100,000 ตัวอย่าง)	2.7391	0.00308	5.69%	1.99%

2) การประเมินความถูกต้องเชิงตัวเลขของปัญหา

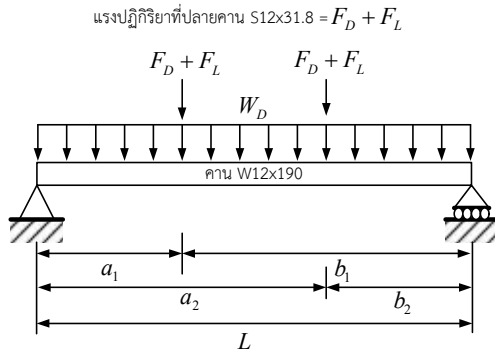
การประเมินความถูกต้องเชิงตัวเลขของปัญหาประเมินจาก ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรม ORA-CE ที่ใช้จำนวนตัวอย่าง n เท่ากับ 100,000 ตัวอย่างเทียบกับผลลัพธ์อ้างอิงของตัวอย่างในเอกสารอ้างอิง [3] ซึ่งจากผลการประเมินในตารางที่ 3 และ 4 พบว่า ค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติ (P_f) จากโปรแกรม ORA-CE มีความคลาดเคลื่อนเพียงเบนจากผลลัพธ์ที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [3] เท่ากับ 0.88% สำหรับกรณีที่ตัวแปรสุ่มทั้งหมดเป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติ (จากตารางที่ 3) และ 1.99% สำหรับกรณีที่ตัว

แปรสุ่มเป็นตัวแปรสุ่มต่างชนิดกัน และไม่ใช้ตัวแปรสุ่มแบบปกติ (จากตารางที่ 4) แสดงถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โลโดยใช้โปรแกรม ORA-CE มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของตัวอย่างปัญหาจากเอกสารอ้างอิง[3] ที่ใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีความน่าเชื่อถืออันดับที่หนึ่ง (First Order Reliability Method, FORM) ในทุกกรณีศึกษาที่พิจารณา

อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบความแม่นยำของค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติของปัญหาในกรณีที่ฟังก์ชันสมรรถนะมีความไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear performance function) การจำลองสถานการณ์ด้วยวิธีมอนเตคาร์โลที่ใช้จำนวนตัวอย่างขนาดใหญ่ จะให้ค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติที่ถูกต้องแม่นยำกว่าวิธี FORM ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โลสามารถคำนวณฟังก์ชันสมรรถนะที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นได้โดยไม่ต้องใช้วิธีการประมาณ ในขณะที่วิธี FORM ใช้หลักการประมาณค่าเชิงเส้น (linear approximation) กับฟังก์ชันสมรรถนะที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าว [3]

4.2 ตัวอย่างการศึกษาจากงานวิจัยของ Jebur และคณะ [32]

ตัวอย่างการศึกษาจากงานวิจัยของ Jebur และคณะ [32] นี้ใช้โปรแกรม Matlab ในการสร้างค่าสุ่มเทียม (Pseudo-random variables) จำนวน 10,000 ตัวอย่างสำหรับใช้ในการประเมินความน่าเชื่อถือของคานาโนโหมดการใช้งานได้ (serviceability) ด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โล โดยทำการประเมินความน่าจะเป็นของการแอ่นตัวสูงสุดที่กึ่งกลางคานาเทียบกับเกณฑ์การแอ่นตัวที่ยอมให้จากมาตรฐานของคานาหลักที่มีหน้าตัด $W_{12} \times 190$ มีความยาว L เท่ากับ 9.0 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่สม่ำเสมอ (W_D) จากน้ำหนักบรรทุกทุกคงที่ และน้ำหนักบรรทุกทุกแบบจุด จำนวน 2 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นแรงปฏิกิริยาที่ถ่ายมาจากคานาขอยซึ่งมีหน้าตัด $S_{12} \times 31.8$ โดยตำแหน่งของแรงจุดอยู่ที่ระยะ $a_1 = 3.0$ เมตร และ $a_2 = 6.0$ เมตร จากจุดรองรับ ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การประเมินความน่าเชื่อถือของคานในโหมดการใช้งานได้ของคานจากการศึกษาจากงานวิจัยของ Jebur และคณะ [32]

โดยในการประเมินความน่าเชื่อถือของคานนี้ได้ใช้ฟังก์ชันสมรรถนะของโหมดการใช้งาน ดังแสดงในสมการที่ 10

$$g = \Delta_{allow} - \Delta_{max} \quad (10)$$

เมื่อ Δ_{allow} คือ ค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้ตามเกณฑ์มาตรฐาน มีค่าเท่ากับ $L/240$

และ Δ_{max} คือ ค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่กึ่งกลางคาน โดยจากการศึกษาของ Jebur และคณะ [32] คำนวณจากสมการ

$$\Delta_{max} = \frac{5W_D L^4}{384EI} + \frac{(F_D + F_L)a_1^2 b_1^2}{3EIL} + \frac{(F_D + F_L)a_2^2 b_2^2}{3EIL} \quad (11)$$

ในการประเมินความน่าเชื่อถือของคานจากตัวอย่างนี้จะประเมินผลจากความไม่แน่นอนของน้ำหนักบรรทุกทุกและตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกทุกแบบจุดกระทำ ซึ่งกำหนดให้คุณสมบัติของหน้าตัดคาน และคุณสมบัติของวัสดุเป็นค่าคงที่ โดยค่าพารามิเตอร์และคุณลักษณะทางสถิติของตัวแปรสุ่มที่ใช้ในการศึกษาของ Jebur และคณะ [32] นี้ แสดงในตารางที่ 5

ผลลัพธ์ของความน่าจะเป็นของการวิบัติในโหมดการแอ่นตัวของคานที่กำหนดในตัวอย่าง [32] จากโปรแกรม ORA-CE ที่ใช้จำนวนตัวอย่าง $n = 10,000$ ตัวอย่าง และจากผลการศึกษาของ Jebur และคณะ [32] ด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โล และผลของการประเมินความ

ถูกต้องเชิงตัวเลขของปัญหาเทียบกับผลลัพธ์อ้างอิงของตัวอย่างในเอกสารอ้างอิง [32] แสดงไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์และคุณลักษณะทางสถิติของตัวแปรสุ่ม [32]

ตัวแปรสุ่ม (หน่วย)	ชนิดการกระจาย	ค่าเฉลี่ย (Mean)	Std. Dev.
โมเมนต์เฉื่อย (I, m^4)	ค่าคงที่	7.867×10^{-4}	-
โมดูลัส ยืดหยุ่น (E , kPa)	ค่าคงที่	1.986×10^8	-
น้ำหนักคงที่ แผ่ (W_D , kN/m)	Normal	2.912	0.233
น้ำหนักคงที่ จุด (F_D , kN)	Normal	122.323	9.786
น้ำหนักจรจุด (F_L , kN)	Gumbel	59.4	4.634
ระยะจุด กระทำ (a_1 , m)	Lognormal	3.0	0.21
ระยะจุด กระทำ (b_1 , m)	Lognormal	6.0	0.42
ระยะจุด กระทำ (a_2 , m)	Lognormal	6.0	0.42
ระยะจุด กระทำ (b_2 , m)	Lognormal	3.0	0.21
ความยาว ช่วงคาน (L , m)	Lognormal	9.0	0.63

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบความน่าจะเป็นของการวิบัติในโหมดการแอ่นตัวของคานที่กำหนดในตัวอย่าง[32] ด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โลระหว่างโปรแกรม ORA-CE และผลการศึกษาจากงานวิจัยของ Jebur และคณะ [32]

แหล่งที่มา (วิธีการ คำนวณ)	ความ น่าจะเป็น ที่จะเกิด การวิบัติ	ค่าสัมประสิทธิ์ ความแปรปรวน ของตัวประมาณ ค่าความน่าจะเป็น ของการวิบัติ $(COV(P_f))$	ความคลาด เคลื่อนสัมพัทธ์ ของความน่าจะเป็น ที่จะเกิดการ วิบัติเทียบกับผล จาก เอกสารอ้างอิง
เอกสาร อ้างอิง [32]			
(MCS 10,000 ตัวอย่าง)	0.0688	3.68%	-
โปรแกรม ORA-CE (MCS 10,000 ตัวอย่าง)	0.0702	3.64%	2.03%

จากผลการศึกษา พบว่า

1) ผลลัพธ์จากตัวอย่างปัญหาในเอกสารอ้างอิง [32] และผลลัพธ์จากโปรแกรม ORA-CE ที่ใช้จำนวนตัวอย่าง n เท่ากับ 10,000 ตัวอย่าง ให้ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการวิบัติของปัญหาที่พิจารณา $P_f = 0.0688$ และ $P_f = 0.0702$ ตามลำดับ และมีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของตัวประมาณค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติ $COV(P_f) = 3.68\%$ และ $COV(P_f) = 3.64\%$ ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ประเมินได้จากทั้งสองกรณีมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 10% แสดงถึงจำนวนชุดตัวอย่าง n เท่ากับ 10,000 ตัวอย่าง ที่ใช้ในการจำลองสุ่มของตัวอย่างทั้งสองกรณีนั้นมากพอจนได้คำตอบทางสถิติที่เสถียร

2) ค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติ (P_f) จากโปรแกรม ORA-CE มีความคลาดเคลื่อนเบี่ยงเบนจากผลลัพธ์ที่ได้จากเอกสารอ้างอิง [32] เท่ากับ 2.03% แสดงถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โลโดยใช้โปรแกรม ORA-CE มีความสอดคล้อง

กันเป็นอย่างดีกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติในโหมดการใช้งานได้ของคานในตัวอย่างปัญหาจากงานวิจัยของ Jebur และคณะ [32]

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรม ORA-CE ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ประมวลผลร่วมกันระหว่าง Microsoft Excel และ GNU-Octave สำหรับประเมินค่าดัชนีความน่าเชื่อถือและความน่าจะเป็นของการวิบัติของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาผ่านฟังก์ชันสมรรถนะที่กำหนดด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โล และจากการนำโปรแกรม ORA-CE มาทำการสอบเทียบผลการประเมินความน่าเชื่อถือของตัวอย่างปัญหาในเอกสารอ้างอิง [3] และ [32] พบว่า ค่าความน่าจะเป็นของการวิบัติ (P_f) จากโปรแกรม ORA-CE มีความคลาดเคลื่อนเบี่ยงเบนจากผลลัพธ์ที่ได้จากทั้งสองตัวอย่างในเอกสารอ้างอิง [3] และ ตัวอย่างในเอกสารอ้างอิง [32] เท่ากับ 0.88%, 1.99% และ 2.03% ตามลำดับ แสดงถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โลโดยใช้โปรแกรม ORA-CE มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของการเกิดการวิบัติของตัวอย่างในเอกสารอ้างอิง [3] และ ตัวอย่างในเอกสารอ้างอิง [32] อีกทั้ง ผลจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ดังกล่าวยังช่วยยืนยันความถูกต้องของโครงสร้างสคริปต์คำนวณหลักในกระบวนการประเมินความน่าเชื่อถือของปัญหาทางวิศวกรรมโยธาของโปรแกรม ORA-CE ด้วยวิธีจำลองสถานการณ์แบบมอนเตคาร์โลโดยใช้โปรแกรม GNU-Octave ที่ใช้การจำลองสุ่มตัวแปรอิสระผ่านฟังก์ชันทางสถิติสำเร็จรูปใน GNU Octave ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโปรแกรม ORA-CE เป็นเครื่องมือทางเลือกที่มีประสิทธิภาพและมีความสะดวกในการประยุกต์ใช้ประเมินความปลอดภัยทางวิศวกรรมโยธาได้

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต ดังนี้

1) ผลการสอบเทียบในงานวิจัยนี้เป็นการยืนยันความถูกต้องขั้นต้น (Baseline Validation) ที่จำกัดเฉพาะ

กรณีศึกษาจากเอกสารอ้างอิง [3] และ [32] ซึ่งใช้ตัวแปรสุ่มชนิด Normal, Lognormal และ Gumbel เป็นหลัก

2) แม้โครงสร้างโปรแกรม ORA-CE จะถูกออกแบบให้รองรับการสุ่มตัวแปรทางสถิติได้ 7 ชนิดผ่าน GNU Octave แต่ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ทดสอบเชิงตัวเลขกับตัวแปรสุ่มอีก 4 ชนิดที่เหลือ (ได้แก่ Fréchet, Weibull, Exponential และ Poisson) จึงเสนอแนะให้มีการทดสอบและสอบเทียบผลลัพธ์ของตัวแปรสุ่มดังกล่าวเพิ่มเติมในงานวิจัยระยะถัดไป

3) ควรนำโปรแกรมไปทดสอบกับปัญหาทางวิศวกรรมโยธาที่มีฟังก์ชันสมรรถนะแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูง เพื่อประเมินขีดความสามารถของโปรแกรมในเชิงลึกต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Payne AO. A reliability approach to the fatigue of structures. In: *Probabilistic Aspects of Fatigue*. ASTM STP 511. West Conshohocken (PA): ASTM International; 1972. p.106–155. doi:10.1520/STP35407S.
- [2] Lincoln J. Risk assessment experience. In: *The International Workshop on Structural Integrity of Aging Airplanes*; Atlanta (GA); 1972.
- [3] Ang AHS, Tang WH. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Vol. II: Decision, Risk, and Reliability*. New York (NY): John Wiley & Sons; 1984.
- [4] Galindo-Lopez DL, Castro-Carrillo MM, Gutierrez-Lopez A, Reyes-Salazar A, Tolentino D, Gaxiola-Camacho JR. Structural reliability of steel and reinforced concrete buildings designed for earthquake-prone areas: performance-based approach. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2026;51(4):4253–4277.
- [5] Liu X, Zhan J, Xu H, Guo W, Rao W, Wu G. Reliability assessment of simply supported beam bridge structural performance based on load tests. *Advances in Civil Engineering*. 2026;2026(1):7942715. doi:10.1155/adce/7942715.
- [6] Griffiths DV, Fenton GA. Probabilistic slope stability analysis by finite elements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2004;130(5):507–518. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:5(507).
- [7] Alimohammadi S, Behrouz M, Ebrahimi H, Tabatabai MRM. Reliability analysis of dam spillway capacity under extreme flood uncertainty: Boostan Dam, Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2025;62:102948. doi:10.1016/j.ejrh.2025.102948.
- [8] Huang W, Liang S, Wei Y. Surface deflection-based reliability analysis of asphalt pavement design. *Science China Technological Sciences*. 2020;63:1824–1836. doi:10.1007/s11431-019-1480-8.
- [9] Der Kiureghian A, Haukaas T, Fujimura K. Structural reliability software at the University of California, Berkeley. *Structural Safety*. 2006;28(1–2):44–67. doi:10.1016/j.strusafe.2005.03.002.
- [10] Gollwitzer S, Kirchgäßner B, Fischer R, Rackwitz R. PERMAS-RA/STRUREL system of programs for probabilistic reliability analysis. *Structural Safety*. 2006;28(1–2):108–129. doi:10.1016/j.strusafe.2005.03.008.
- [11] Schuëller GI, Pradlwarter HJ. Computational stochastic structural analysis (COSSAN)—a software tool. *Structural Safety*. 2006;28(1–2):68–82. doi:10.1016/j.strusafe.2005.03.005.
- [12] Marelli S, Sudret B. UQLab: a framework for uncertainty quantification in MATLAB. In: *Vulnerability, Uncertainty, and Risk: Quantification, Mitigation, and Management*. Liverpool, UK: American Society of Civil Engineers; 2014. p.2554–2563. doi:10.1061/9780784413609.257.

- [13] Eaton JW, et al. *GNU Octave version 11.2.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations*. Available from: <https://www.gnu.org/software/octave/doc/v11.2.0>
- [14] U.S. Army Corps of Engineers. *Project Operations: Partners and Support (Work Management Guidance and Procedures)*. Engineer Pamphlet EP 1130-2-500. Washington (DC): Department of the Army; 1996.
- [15] Youssef Abdel Massih DS, Soubra AH, Low BK. Reliability-based analysis and design of strip footings against bearing capacity failure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2008;134(7):917–928. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:7(917).
- [16] Chen HP, Mehrabani MB. Reliability analysis and optimum maintenance of coastal flood defences using probabilistic deterioration modelling. *Reliability Engineering & System Safety*. 2019;185:163–174. doi:10.1016/j.res.2018.12.021.
- [17] Guo F, Xu Y, Quan Q, Zhang Z. Dynamic structural early warning for bridge based on deep learning: methodology and engineering application. *Buildings*. 2026;16(4):823. doi:10.3390/buildings16040823.
- [18] Zheng XW, Deng Y, Li XL, Gardoni P. Fatigue damage assessment of wind-excited tall steel buildings with the effect of crosswind responses and uncertain variables. *Journal of Building Engineering*. 2025;116:114689. doi:10.1016/j.jobe.2025.114689.
- [19] Xiao R, Zayed T, Meguid MA, Sushama L. Reliability analysis of gas pipelines considering spatial and temporal corrosion variability. *Journal of Pipeline Science and Engineering*. 2025;5(3):100256. doi:10.1016/j.jpse.2025.100256.
- [20] Wu LC, Zeng ML, Yan KZ. Point estimation-based dynamic reliability analysis of beam bridges under seismic excitation considering uncertain parameters. *Buildings*. 2024;14(7):2003. doi:10.3390/buildings14072003.
- [21] Zhang Z, Pu Q. A structural reliability analysis method based on Kriging model with adaptive nested sampling. *Advances in Structural Engineering*. 2026;29(6). doi:10.1177/13694332251359324.
- [22] Pol J, Kanning W, Jonkman SN, Kok M. Time-dependent reliability analysis of flood defenses under cumulative internal erosion. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2024. doi:10.1080/15732479.2024.2416434.
- [23] Zhang M, Wang X, Li Y. Fatigue reliability assessment of bridges under heavy traffic loading scenario. *Infrastructures*. 2024;9(12):238. doi:10.3390/infrastructures9120238.
- [24] Hsu YC, Tung YK, Kuo JT. Evaluation of dam overtopping probability induced by flood and wind. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2011;25(1):35–49. doi:10.1007/s00477-010-0435-7. (ข้อมูลภายนอก)
- [25] Ye T, Li L. Statistical analysis and study on joint distribution of the extreme value of wind speed and wind direction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;634(1):012019. doi:10.1088/1755-1315/634/1/012019.
- [26] Hong HP, Hong P. Assessment of ductility demand and reliability of bilinear single-degree-of-freedom systems under earthquake loading. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2007;34(12):1606–1615. doi:10.1139/L07-077.
- [27] Zou XK, Wang Q, Li G, Chan CM. Integrated reliability-based seismic drift design optimization of base-isolated concrete buildings. *Journal of Structural Engineering*. 2010;136(10):1282–1295. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000216.

- [28] Franchin P, Noto F. Reliability-based partial factors for seismic design and assessment consistent with second-generation Eurocode 8. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2023;52(13):4026–4047. doi:10.1002/eqe.3840.
- [29] Chiodo E, De Angelis F, Diban B, Mazzanti G. Bayes inference of structural safety under extreme wind loads based upon a peak-over-threshold process of exceedances. *Mathematical and Computational Applications*. 2023;28(6):111. doi:10.3390/mca28060111.
- [30] Pasha MY, Devi MT, Maheswari TSU. Reliability analysis of the shaft subjected to fluctuating loads under torsion and bending moments when shear stress follows exponential distribution. *Reliability: Theory & Applications*. 2025;20(2):194–200. doi:10.24412/1932-2321-2025-284-194-200.
- [31] Luo T, Yang J. Estimating the capacity of a curbside bus stop with multiple berths using probabilistic models. *Tehnički Vjesnik*. 2020;27(5):1597–1606. doi:10.17559/TV-20181025170011.
- [32] Jebur HQ, Al-Zaidee SR. Non-deterministic approach for reliability evaluation of steel beam. *Journal of Engineering*. 2020;26(1):121–141. doi:10.31026/j.eng.2020.01.10.