

การวิเคราะห์ปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากวงแหวนวางบนดินทรายแน่น Bolton ด้วยวิธี FELA และอัลกอริทึม Hybrid ANFIS

An analysis the bearing capacity factors of ring foundation on dense sand by using finite element limit analysis and hybrid ANFIS algorithms

นัชลี บุญจิม^{1*} และ สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

*Corresponding author; E-mail address: nuchlee.boon@dome.tu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์หากล้างรับแรงแบกทานของฐานรากวงแหวนวางบนดินทรายแน่นด้วยเกณฑ์การวิบัติของดินทรายด้วยหลักการของ Bolton โดยทำการศึกษารากวงแหวนภายใต้การใช้การวิเคราะห์แบบเงื่อนไขแกนสมมาตร (Axisymmetric Conditions) โดยการใช้ทฤษฎีขอบเขตบนและขอบเขตล่างของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์ลิมิต (FELA) ในการวิเคราะห์และเพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของดินทรายแน่นตามแบบจำลองของ Bolton จึงทำการศึกษาระหว่างความเค้นและการขยายตัว โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมของดินทรายแน่น และนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีตเพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องของการศึกษาในครั้งนี้ ร่วมกับการนำแบบจำลอง hybrid ANFIS ซึ่งเป็นระบบอนุมานที่ปรับตัวได้ที่มีการปรับปรุงและพัฒนาที่ตีมากขึ้น โดยรวมหลักการของโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) เข้ากับตรรกะฟัซซี (Fuzzy Logic) เพื่อสร้างโมเดลที่สามารถเรียนรู้จากข้อมูลและปรับตัวได้ ที่พัฒนาการทำงานให้เหมือนกับการทำงานของระบบประสาทของมนุษย์ เพื่อใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลนำเข้า (Input) และข้อมูลส่งออก (Output) เพื่อนำมาใช้ในการทำนายผลของกำลังรับแรงแบกทานดังกล่าว และทำการวัดผลความแม่นยำของการใช้แบบจำลอง hybrid ANFIS ด้วยวิธีการวัดผลทางสถิติที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำ ทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2), ค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์เฉลี่ย (MAE), และรากของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) โดยผลทางสถิติที่ใช้ในการประเมินความแม่นยำจากการทดสอบด้วยวิธี GA-ANFIS พบว่ามีค่า 0.985, 0.027, และ 0.020 ตามลำดับ และวิธี PSO-ANFIS พบว่ามีค่า 0.997, 0.010, และ 0.007 ตามลำดับ ซึ่งกล่าวได้ว่าการทำนายของกำลังรับแรงแบกทานโดยใช้แบบจำลอง PSO-ANFIS ให้ผลเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับผลกำลังรับแรงแบกทานจากการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์ลิมิตมากกว่าแบบจำลอง GA-ANFIS

คำสำคัญ: กำลังรับแรงแบกทาน, ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์ลิมิต, ฐานรากวงแหวน, แบบจำลองของ Bolton, Hybrid ANFIS

Abstract

This article presents research on the analysis of the bearing capacity of foundations resting on dense sand using Bolton's failure criterion. The study focuses on ring foundations under

axisymmetric conditions. The analysis is conducted using the upper and lower bound theories of the finite element limit analysis (FELA) method. To better understand the behavior of dense sand based on Bolton's model, the study examines the relationship between stress and dilation, considering various factors influencing the behavior of dense sand. The results obtained from this analysis are compared with previous research to validate the accuracy of this study. Additionally, a hybrid ANFIS model, which integrates artificial neural networks (ANN) with fuzzy logic to create models of learning from data and adapting, which is similar to the basic concept of the human nervous system, was used to study the relationship between input and output data in order to predict the problem's bearing capacity. The accuracy of using the hybrid ANFIS model was measured using three statistical measures, namely the coefficient of determination (R^2), mean absolute error (MAE), and root mean square error (RMSE). The results from the GA-ANFIS approach have values of 0.985, 0.027, and 0.020, respectively, while the PSO-ANFIS approach has values of 0.997, 0.010, and 0.007. These findings indicate that the GA-ANFIS model provides predictions of bearing capacity that are more consistent with the FELA results compared to the PSO-ANFIS model.

Keywords: Bearing capacity, Finite element limit analysis, Ring foundation, Bolton model, Hybrid ANFIS

1. คำนำ

ฐานรากวงแหวนเป็นฐานรากชนิดที่ใช้รองรับน้ำหนักจากโครงสร้างภายนอกต่าง ๆ มากมาย เช่น หอไขโล, ถังเก็บน้ำมันและน้ำ, หอวิทยุ-โทรทัศน์, และหอทำความเย็น อีกทั้งยังใช้เป็นฐานรากโครงสร้างนอกชายฝั่ง ซึ่งฐานรากรูปวงแหวนประกอบไปด้วยรัศมีภายใน (r_i) และรัศมีภายนอก (r_o) โดยอัตราส่วนระหว่างรัศมีเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของฐานราก ซึ่งเป็นไปตามความต้องการทางโครงสร้างและเงื่อนไขของดินของแต่ละพื้นที่ที่แตกต่างกัน เพื่อให้เกิดการเข้าใจถึงพฤติกรรมของฐานรากรูปวงแหวนที่จะนำมาใช้พิจารณาออกแบบให้เป็นไปอย่างถูกต้องและเหมาะสมจึงจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับการตอบสนองของฐานรากวงแหวนต่อการรับน้ำหนักและการทรุดตัวรวมไปถึงความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุด อย่างไรก็ตาม การใช้

ฐานรากวงแหวนจะช่วยลดปริมาณวัสดุและมีความคุ้มค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฐานรากรูปวงกลมตัน [1] และการใช้ฐานรากรูปวงแหวนสามารถเพิ่มความมั่นคงต่อการพลิกคว่ำ การกัดเซาะ และการเคลื่อนที่ทางด้านข้างจากการเผชิญกับแรงทางด้านข้างและโมเมนต์ขนาดใหญ่ [2] การศึกษาแรงแบกทานของฐานรากวงแหวนเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจอย่างมากจากที่ผ่านมา ซึ่งจะมีการศึกษาผ่านหลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีเส้นเลื่อน (slip-line method), วิธีองค์ประกอบจำกัดโดยใช้ทฤษฎีขอบบนและขอบล่างในกรอบของการวิเคราะห์ขีดจำกัด (Limit Analysis), วิธีองค์ประกอบจำกัด (Finite Element Method), เทคนิคผลต่างจำกัด (Finite-Difference Method), และการทดสอบจำลองทางกายภาพ (Model Tests) รวมไปถึงการวิเคราะห์ขีดจำกัดด้วยองค์ประกอบจำกัดตามทฤษฎีขอบล่าง (Finite-Element Formulation Of The Lower Bound Theorem) เพื่อศึกษากำลังรับแรงแบกทานของฐานรากวงแหวนดินทรายแน่นหรือเพื่อศึกษาปัจจัยที่จะนำมาประมาณความต้านทานการรับน้ำหนักสูงสุด รวมไปถึงเพื่อการศึกษาปัจจัยความสามารถในการรับน้ำหนัก [5] ในปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากวงแหวนที่ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์ขีดจำกัด (FELA) วิเคราะห์ขีดจำกัดแบบขอบบนและขอบล่าง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงอยากศึกษาปัจจัยกำลังรับน้ำหนัก (N_r) ของฐานรากวงแหวนวางบนดินทรายแน่นด้วยวิธี FELA

จากพฤติกรรมของดินทรายแน่น Bolton เมื่อได้รับหน่วยแรงกระทำส่งผลให้ดินทรายแน่นมีการขยายตัวเกิดขึ้น ตามทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและการขยายตัวของดินทรายแน่นกล่าวว่า ความแข็งแรงของดินทรายสามารถแสดงออกมาในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงมุมภายในของดินร่วมกับความหนาแน่นและหน่วยแรงที่กระทำ การไม่คำนึงถึงพฤติกรรมจากที่กล่าวมาอาจจะส่งผลทำให้เกิดข้อผิดพลาดที่สำคัญในการทำนายผลของกำลังรับแรงแบกทานสูงสุด ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนี้ Bolton [3] ได้นำเสนอหลักการที่คำนึงถึงมุมเสียดทานภายในภายใต้การได้รับหน่วยแรงที่กระทำและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินทรายที่สามารถทำให้การทำนายผลของกำลังรับแรงสอดคล้องกับพฤติกรรมของดินทรายแน่นที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาจากงานวิจัยในอดีตที่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของดินทรายแน่นที่ได้มีการนำหลักการของลัทธิที่ใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบจริง [4-7]

งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์ปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากวงแหวนวางบนดินทรายแน่นโดยใช้หลักการการวิบัติของ Bolton ในการหาผลเฉลยของปัญหาดังกล่าว โดยมีการนำมาวิเคราะห์ผลเป็นกราฟตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลเกี่ยวข้องกับหลักการดังกล่าวด้วยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์ขีดจำกัดด้วยโปรแกรม Optum G2 ร่วมกับการทำนายผลเฉลยจากการวิเคราะห์ปัญหาด้วยแบบจำลองอัลกอริทึม Hybrid ANFIS มาใช้งาน

2. พฤติกรรมของดินทรายแน่นและการวิเคราะห์ด้วย

หลักการของ Bolton

2.1 พฤติกรรมของดินทรายแน่น

ลักษณะพฤติกรรมโดยทั่วไปของดินทรายแน่น เมื่อได้รับแรงกระทำในช่วงเริ่มต้นนั้นแรงที่กระทำในช่วงเริ่มต้นส่งผลทำให้ปริมาตรของดินจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะการบดอัด (Compression) เมื่อผ่านขีดสูงสุดของแรงเฉือน (Peak Shear Stress) ปริมาตรของดินจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของการขยายตัว (Expansion) จนเมื่อปริมาตรของการเปลี่ยนแปลงเริ่มคงที่เมื่อเทียบกับกระบวนการเคลื่อนที่แนวนอนที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าจะมีค่าแรงเฉือนเป็นค่าสูงสุด (Ultimate Shear

Stress) หรือเรียกจุดนี้ว่า จุดวิกฤต (Critical State) ซึ่งโดยทั่วไปนั้นเกณฑ์ของการวิบัติของดินถูกนิยามใช้ คือ หลักการของมอร์-คูลอมบ์ (Mohr-Coulomb) และหลักการของ Bolton จะใช้เกณฑ์การวิบัติคล้ายกับหลักการของ Mohr-Coulomb แต่หลักการของ Bolton จะคำนึงถึงพฤติกรรมของดินทรายแน่นที่เกิดขึ้นว่าระดับของหน่วยแรงกระทำและความหนาแน่นของดินทรายแน่นที่เกิดขึ้นว่าระดับของหน่วยแรงกระทำและความหนาแน่นของดินนั้นสามารถส่งผลต่อค่ามุมเสียดทานภายในของดินได้ [8]

2.2 หลักการวิเคราะห์ของ Bolton

จากการศึกษาของ Bolton [3] ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างเรื่องของความเค้นและการขยายตัวของดินทราย โดยความสัมพันธ์ของหลักการ Bolton ในการหามุมเสียดทานภายในและมุมการขยายตัวอยู่ในรูปแบบของระดับความเค้นและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน ดังแสดงในสมการที่ (1) - (2)

$$\phi_B = \phi_{cv} + bI_R \quad (1)$$

$$I_R = I_D(Q - \ln p) - R \quad (2)$$

โดย ϕ_B คือ มุมเสียดทานภายในรวม, ϕ_{cv} คือ มุมเสียดทานภายในที่จุดวิกฤต, b คือ ค่าคงที่สำหรับการปรับแก้มุม โดยค่านี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการทดสอบ จากคำแนะนำของ Bolton ได้กำหนดให้ $b = 3$ เมื่อเงื่อนไขเป็นการทดสอบแบบแรงอัดสามแกน (Triaxial compression) และ $b = 5$ สำหรับการทดสอบแบบระนาบความเครียด (Plane strain), I_R คือ ค่าบ่งชี้การขยายตัว, I_D คือ ความหนาแน่นสัมพัทธ์, Q คือ ค่ากำลังรับแรงบดอัดของดิน โดยขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ โดย Bolton แนะนำให้ $Q = 10$ สำหรับแร่ควอตซ์ (Quartz) และแร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar), $Q = 8$ สำหรับหินปูน (Limestone), $Q = 5.5$ สำหรับหินชอล์ก (Chalk), p คือ ค่าความเค้นเฉลี่ย (mean stress), และ R เป็นพารามิเตอร์ของ Bolton โดยมีค่าแนะนำอยู่ที่ 1.0

3. วิธีการวิเคราะห์แบบไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์ขีดจำกัด และ Hybrid ANFIS

3.1 Finite element limit analysis (FELA)

วิธีการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์ขีดจำกัด [9] เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นส่วนย่อย (Element) และในแต่ละชิ้นส่วนย่อยนั้นมีจุดต่อร่วมกัน (Node) ร่วมกับการวิเคราะห์แบบขีดจำกัดโดยใช้ทฤษฎีขอบบน (Upper Bound Analysis) ที่อาศัยการวิเคราะห์ด้วยหลักการของงานและพลังงานโดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขสมดุล โดยจะเลือกรูปแบบการวิบัติที่ที่เหมาะสม และขอบล่าง (Lower Bound Analysis) ที่อาศัยหลักการเงื่อนไขสมดุลด้วยสนามความเค้นจากการพิจารณาเงื่อนไขระหว่างความเค้นภายในมวลดินและแรงกระทำภายนอกอยู่ในสภาวะสมดุลกันโดยไม่เกินเงื่อนไขคราก นำวิธีการดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณหาผลเฉลยของปัญหาต่าง ๆ ในงานทางด้านธรณีเทคนิค

3.2 Hybrid Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

แบบจำลอง Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System เป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อนและปัญหาไม่เป็นเชิงเส้น ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Jang [10] เป็นการรวมกันระหว่าง Artificial

Neural Network (ANN) ที่เปรียบเสมือนวิธีการทำงานของระบบประสาทหรือโครงข่ายของสมองของมนุษย์ โดยประกอบไปด้วยเซลล์ประสาท หรือนิวรอน (Neuron) หลาย ๆ เซลล์เชื่อมต่อเข้าด้วยกันอย่างสมบูรณ์จนเกิดเป็นโครงข่ายของสมองที่ใช้สำหรับการเรียนรู้ของมนุษย์ โดยการจำลองหลักการทำงานของสมองมนุษย์ และ Fuzzy Inference System (FIS) [14] ซึ่งสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตโดยใช้กฎ If-Then และโครงข่ายประสาทเทียม อัลกอริทึมนี้ใช้วิธีการคำนวณแบบ hybrid ซึ่งสามารถจำลองระบบที่ซับซ้อนที่ไม่แน่นอนและคลุมเครือได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย ANFIS ประกอบไปด้วยการทำงาน 5 ขั้นตอนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดการทำงานโดย Jang และ Stanley โดย

ขั้นที่ 1 Input layer ทำหน้าที่รับตัวแปรนำเข้า ($X_1, X_2, \dots, X_n$)

ขั้นที่ 2 เป็นชั้น Fuzzification layer เพื่อทำการกำหนดระดับสมาชิก (membership grades) ให้กับแต่ละภาษาศาสตร์ (linguistic phase) ตามข้อมูลที่ป้อนเข้า

ขั้นที่ 3 Normalization layer ทำหน้าที่เปิดการใช้งานโหนดกฎฟัซซี (Fuzzy rule nodes)

ขั้นที่ 4 Defuzzification layer เป็นมาตรฐานค่าความเข้มข้นของการเปิดใช้งานกฎฟัซซี

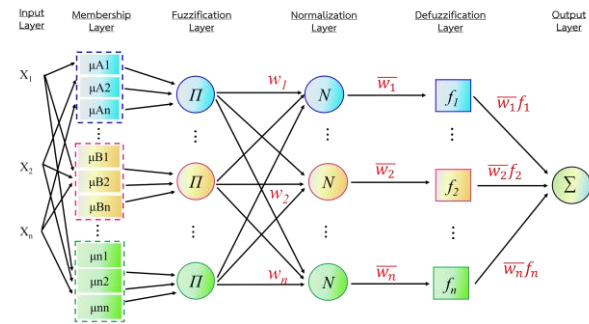
ขั้นที่ 5 เป็นชั้น Output layer โดยจะคำนวณและให้ค่าผลลัพธ์สุดท้ายออกมา โดย $A_1, A_2, B_1, B_2, \dots, n_1$, และ n_2 เป็นตัวแปรทางภาษาศาสตร์ และ $\mu A_1, \mu A_2, \mu B_1, \mu B_2, \dots, \mu n_1$, และ μn_2 เป็นฟังก์ชันสมาชิกของโหนดที่ใช้ในแบบจำลองที่นำเสนอ [10-11]

โดยในการศึกษานี้ จะใช้ ANFIS ผสมผสานเข้ากับอัลกอริทึมชนิด Particle Swarm Optimization (PSO) และ Genetic Algorithm (GA) โดยจะใช้ ANFIS กำหนดขอบเขตการออกแบบ และจากนั้น GA และ PSO จะเป็นตัวที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งถูกเสนอโดย Eberhart และ Kennedy [12] และจากรูปที่ 2 จะเป็นการอธิบายกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพตามลำดับขั้นตอน ซึ่งจะเริ่มจากการกำหนดตัวแปรออกแบบ, กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์, และกำหนดเงื่อนไขของปัญหาจากนั้นจะสร้างตัวอย่างเริ่มต้นด้วยการใช้ FELA และสุดท้ายจะใช้ ANFIS สร้างแบบจำลองที่สามารถกำหนดขอบเขตของพื้นที่ค้นหาเพื่อความแม่นยำและจับความสัมพันธ์ที่ไม่เชิงเส้น (nonlinear relationships) ระหว่างตัวแปรออกแบบและฟังก์ชันวัตถุประสงค์

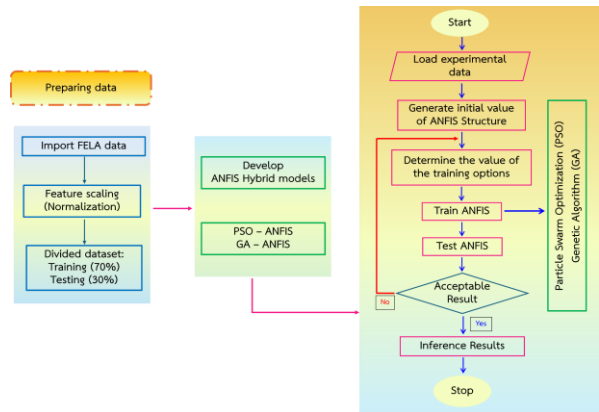
อัลกอริทึมพันธุกรรม (GA) เป็นเทคนิคที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพแบบเมตา-ฮิวริสติก (Metaheuristic) หรือเป็นแนวทางเชิงคำนวณที่ใช้เพื่อค้นหาวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ในปัญหาที่มีความซับซ้อนสูง ซึ่งจากแนวคิดนี้โครงสร้างของอัลกอริทึมจะถูกจัดเป็นประชากรโดยแต่ละโครโมโซมแทนค่าของแนวทางการแก้ปัญหาที่เป็นไปได้ ดังที่ Mitchell อธิบายไว้ [13] โดยใช้ตัวดำเนินการหลักสามตัว ได้แก่ ตัวเลือก (Selection Operator), ตัวข้ามพันธุกรรม (Crossover Operator), และตัวกลายพันธุ์ (Mutation Operator), โดยตัวข้ามพันธุกรรมและตัวกลายพันธุ์จะถูกนำมาพิจารณาใช้โดย Saeidian et al. และ Nourani et al. [15-16] ซึ่งทั้งตัวข้ามพันธุกรรมและตัวกลายพันธุ์จะเปลี่ยนแปลงโหนดฟังก์ชันรวมไปถึงโหนดของตัวแปรและค่าคงที่โดยจะทำการซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะสิ้นสุดตามเงื่อนไข

อัลกอริทึมการเพิ่มประสิทธิภาพแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) จะถูกใช้เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดภายในขอบเขตการออกแบบที่กำหนด [18] โดย PSO เป็นวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพที่ได้รับแรงบันดาลใจจากธรรมชาติ ซึ่งจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่รวมกลุ่มของฝูงนกและฝูงปลา [12] ซึ่งการใช้ฝูงของอนุภาค (Particles) ในแต่ละอนุภาคจะบันทึกตำแหน่งที่ดีที่สุดของตัวเอง

และจะบันทึกข้อมูลของตำแหน่งที่ดีที่สุดที่พบโดยอนุภาคอื่น เมื่อเวลาผ่านไปอนุภาคเหล่านั้นจะเคลื่อนที่ไปสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุดในพื้นที่การค้นหา และผลลัพธ์สุดท้ายคือค่าที่เหมาะสมที่สุด [18]



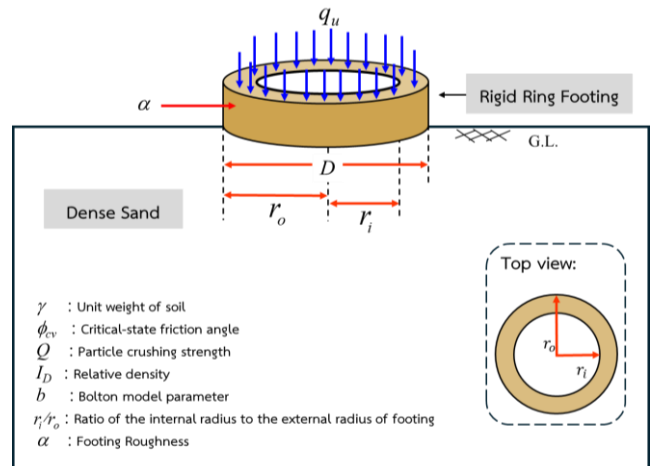
รูปที่ 1 โครงสร้างของแบบจำลอง ANFIS



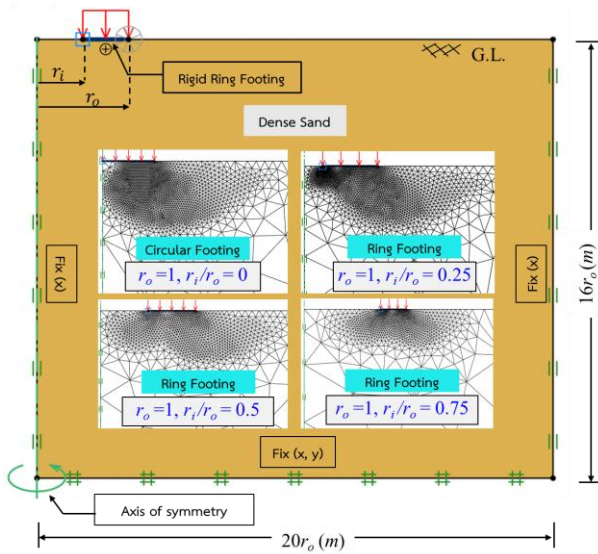
รูปที่ 2 กระบวนการทำงานของ hybrid ANFIS

4. ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการจำลองแบบไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะหฺลิมิตด้วยโปรแกรม OPTUM G2 [17] ในการศึกษาเพื่อวิเคราะห์หาค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานสูงสุดของฐานรากวงแหวนภายใต้การวิเคราะห์แบบเงื่อนไขแกนสมมาตร ซึ่งจะแสดงการจำลองการวิเคราะห์เพียงครั้งเดียวจากการใช้หลักการของเรื่องความสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3-4



รูปที่ 3 แบบจำลองของฐานรากวงแหวนวางบนดินทรายแน่น



รูปที่ 4 แบบจำลองของฐานรากวงแหวนวางบนดินทรายแน่นด้วยโปรแกรม Optum G2

4.1 แบบจำลองของดินทรายแน่นและฐานราก

จำลองวัสดุเป็นแบบดินทรายแน่นที่ใช้เกณฑ์การวิบัติของดินทรายแน่นด้วยแบบจำลองของ Bolton จากที่แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 2.2 และกำหนดให้ค่ามุมเสียดทานภายในมาจากการวิเคราะห์แบบเงื่อนไขแกนสมมาตร และกำหนดให้ฐานรากเป็นฐานรากที่มีความแข็งแรงมาก (Rigid) ด้วยการกำหนดให้วัสดุของฐานรากเป็น rigid ในโปรแกรม OPTUM G2 ซึ่งกล่าวไว้ว่าแบบจำลองที่ได้ทำการศึกษาจะเป็นการวิเคราะห์ปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานสูงสุดของความสามารถของดิน

4.2 เงื่อนไขขอบ

ในการกำหนดเงื่อนไขของขอบเขตของการหาปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากวงแหวน จะกำหนดขอบเขตแบบ Standard Fixities หรือเป็นการจำลองแบบให้ขอบเขตทางด้านซ้ายและทางด้านขวาของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวราบ (แกน x) และขอบเขตด้านล่างของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนที่ทั้งในแนวราบ (แกน x) และแนวตั้ง (แกน y) โดยเป็นลักษณะการจำลองเงื่อนไขขอบทั่วไปสำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบวิเคราะห์ที่ลิมิต

4.3 พารามิเตอร์ที่ศึกษา

พารามิเตอร์ที่ศึกษาประกอบไปด้วย 5 พารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (I_D), ค่ามุมเสียดทานภายในของดินทรายในสภาวะวิกฤต (ϕ_{cv}), ค่ากำลังรับแรงกดอัดของดิน (Q), ค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (γ), และอัตราส่วนปริมาตรภายในต่อปริมาตรภายนอกของฐานรากวงแหวน (r_i/r_o) โดยกำหนดให้ช่วงของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษามีดังนี้ $I_D = 0.5$ และ 1 , $\phi_{cv} = 30^\circ, 33^\circ$, และ 36° , $Q = 5.5, 8$, และ 10 , $\gamma = 16, 18, 20$, และ 22 kN/m^3 , และ $r_i/r_o = 0, 0.25, 0.5$, และ 0.75

4.4 การแบ่งแบบจำลองออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ

แบบจำลองเป็นแบบเงื่อนไขแกนสมมาตร ชิ้นส่วนของดินเป็นชิ้นส่วนรูปแบบสามเหลี่ยม มีการใช้ฟังก์ชันการคำนวณแบบวนซ้ำจำนวน 5 ครั้งในพื้นที่ที่เกิดค่ากำลังรับแรงเฉือนสูง โดยกำหนดให้จำนวนเอลิเมนต์เริ่มต้นที่ 5,000 และจำนวนเอลิเมนต์สุดท้ายที่ 10,000 เพื่อเพิ่มความถูกต้องและความแม่นยำต่อผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทาน

4.5 การสร้างแบบจำลอง Hybrid ANFIS

ในการสร้างแบบจำลอง hybrid ANFIS มีพารามิเตอร์นำเข้าที่จะใช้เพื่อการศึกษาในครั้งนี้ จำนวน 5 ตัวแปร คือ r_i/r_o , I_D , ϕ_{cv} , Q , และ γ โดยที่พารามิเตอร์จากที่กล่าวมาเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับหลักการของ Bolton รวมไปถึงขนาดของปัญหา และมีพารามิเตอร์ส่งออก คือ N_y ซึ่งเป็นผลเฉลยค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานที่ได้รับจากการใช้วิธี FELA ในการวิเคราะห์ โดยได้มีการกำหนดข้อมูลนำเข้า (Input Parameter) และข้อมูลส่งออก (Output Parameter) เป็นข้อมูลแบบมาตรฐาน (Standardized) และข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ คือ 288 ข้อมูล ซึ่งจะถูกแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 กลุ่ม โดย 70% ของข้อมูล เป็นข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการฝึกอบรม (Training) เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง hybrid ANFIS และ 30% ของข้อมูล จะนำมาใช้สำหรับทดสอบ (Testing) จากนั้นจะกำหนดโครงสร้างของแบบจำลอง ANFIS รวมไปถึงจำนวนกฎฟัซซีและประเภทสมาชิกของฟังก์ชัน โดยเริ่มต้นการฝึกแบบจำลองจะใช้ข้อมูลฝึกอบรม และเพิ่มประสิทธิภาพของอัลกอริทึม GA และ PSO โดยใช้เครื่องมือของ MATLAB การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง hybrid GA-ANFIS และ PSO-ANFIS โดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบเพื่อตรวจสอบความสามารถในการนำไปใช้ของแบบจำลอง และการปรับแต่งหรือปรับโครงสร้างแบบจำลองเพิ่มเติมจะทำการปรับพารามิเตอร์ GA-ANFIS และ PSO-ANFIS เพื่อปรับปรุงผลลัพธ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 และตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลสำหรับแบบจำลอง hybrid ANFIS

Hyper-parameter	Description/Value	
Type of model	GA-ANFIS	PSO-ANFIS
Population Size	300	300
Maximum Number of Iterations	500	500
Crossover Percentage	0.7	-
Mutation Percentage	0.5	-
Mutation Rate	0.1	-
Selection Pressure	8	-
Gamma	0.2	-
Number of Fuzzy Rules	50	50
Inertia Weight	-	1
Inertia Weight Damping Ratio	-	0.99
Personal Learning Coefficient (C ₁)	-	1
Global Learning Coefficient (C ₂)	-	2

4.6 การวัดผลความแม่นยำของแบบจำลอง ANFIS

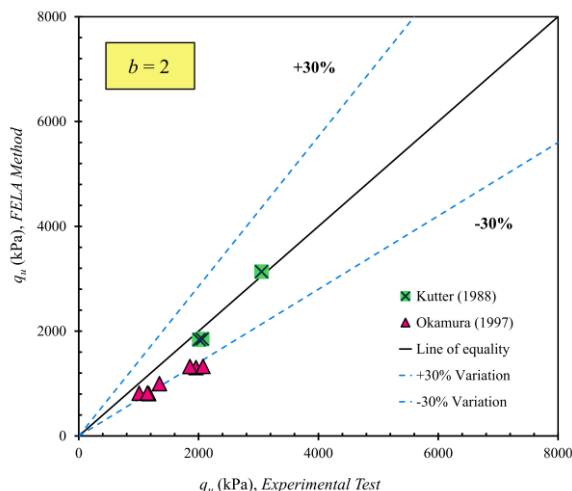
ในการวัดผลความสามารถของการใช้แบบจำลอง hybrid ANFIS เพื่อตรวจสอบว่าการทำนายปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากมีความแม่นยำมากน้อยเพียงใด โดยใช้วิธีการวัดผลทางสถิติ 3 วิธี ได้แก่ ค่า

สัมประสิทธิ์การทำนาย (Root Mean Squared, R^2), ค่าเฉลี่ยผลต่างสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error, MAE), และรากของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Squared Error, RMSE) และหากผลลัพธ์ของการใช้แบบจำลอง hybrid ANFIS ที่มีความแม่นยำจะให้ค่า $R^2 = 1$, MAE และ RMSE เท่ากับ 0

5. ผลการวิเคราะห์

5.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยในอดีตและปัจจุบัน

จากผลของการเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักงานวิจัยในอดีตและงานวิจัยในปัจจุบันระหว่างวิธีการทดสอบแบบ Centrifuge test และวิธี FELA สำหรับงานวิจัยในอดีตของ Kutter และ Okamura [19-20] เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าความสามารถในการรับน้ำหนัก (q_u) ของฐานรากวงแหวน ซึ่งผลของการทดสอบพบว่าค่าปรับแก้ (b) ที่ทำให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับข้อมูลทดสอบจริง (Centrifuge Test) มากที่สุด คือ ค่า $b = 2.0$ โดยได้จากการวิเคราะห์ขีดจำกัดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขอบเขตล่าง (LB) และขอบเขตบน (UB) และนำมาหาค่าเฉลี่ย (Avg) และในการศึกษาค้นคว้านี้ได้ใช้ค่า $b = 2.0$ เป็นค่าพารามิเตอร์ปรับแก้ที่เหมาะสมสำหรับฐานรากวงแหวน ภายใต้สภาวะแกนสมมาตรของการศึกษาครั้งนี้ ดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างระหว่างค่าจากการทดสอบปัจจุบันและค่าผลทดสอบในอดีตอยู่ในช่วง 1.5% - 10.5% โดยเฉพาะค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาของงานวิจัยของ Kutter [19] ให้ความสอดคล้องมากที่สุด เนื่องจากพบว่าค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินที่บ่งบอกถึงระดับความหนาแน่นของเม็ดดินจากการทดสอบของ Kutter มีค่าสูงกว่าการทดสอบของ Okamura ซึ่งเป็นอีกหนึ่งเหตุผลที่ทำให้การทดสอบของ Kutter มีค่าตรงกับ $b = 2.0$ มากกว่า รวมไปถึงค่าหน่วยน้ำหนักของดินจากการทดสอบของ Kutter มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยครั้งนี้มากกว่า



รูปที่ 5 ผลของการเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยในอดีตและผลการทดสอบปัจจุบัน

5.2 ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อฐานรากวงแหวนวางบนดินทรายแน่น

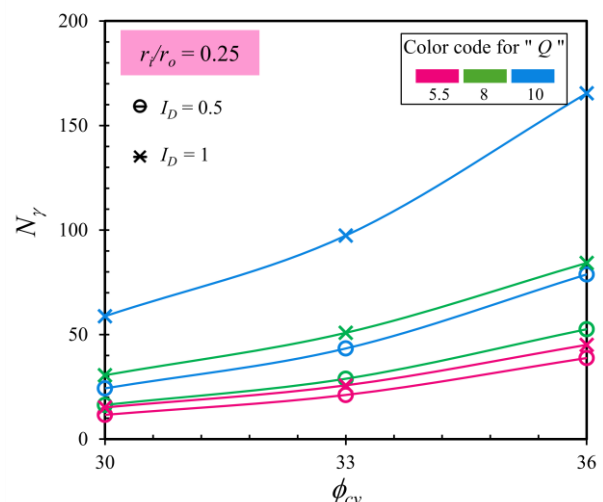
จากผลของการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่นำมาศึกษาหาค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากวงแหวนวางบนดินทราย Bolton พบว่า

ค่าพารามิเตอร์ได้แก่ r_i / r_o , I_D , ϕ_{cv} , Q , และ γ ที่ศึกษาที่มีการเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่ากำลังรับแรงแบกทานของฐานราก

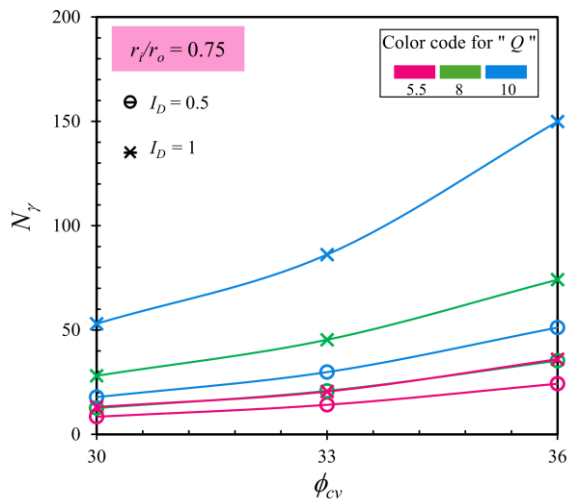
รูปที่ 6 แสดงการเพิ่มขึ้นของค่ามุมเสียดทานที่จุดวิกฤตและค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานโดยกำหนดให้ $Q = 5.5, 8$, และ 10 , $r_i / r_o = 0.25$ และ 0.75 , $\phi_{cv} = 30^\circ, 33^\circ$, และ 36° , $I_D = 0.5$ และ 1 , และ $\gamma = 18$ kN/m³ พบว่าผลลัพธ์ที่ได้แสดงการเพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้น การเพิ่มขึ้นของค่ามุมเสียดทานที่จุดวิกฤตและค่ากำลังรับแรงแบกทานของดินรวมไปถึงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ส่งผลให้ค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานมีค่าเพิ่มขึ้น

รูปที่ 7 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถรับแรงบดอัดของเม็ดดินและค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานโดยกำหนด $r_i / r_o = 0 - 0.75$, $\phi_{cv} = 30^\circ$ และ 36° , $Q = 5.5, 8$, และ 10 , $I_D = 0.5$ และ 1 , $\gamma = 22$ kN/m³ พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการรับแรงบดอัดของดินส่งผลให้ค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่า Q เป็นค่าที่แสดงถึงคุณสมบัติของกำลังต้านทานการบดอัดของดินทรายและเพื่อให้ดินทรายเกิดการขยายตัวจากพฤติกรรมของดินทรายแน่น ดินทรายจะต้องมีความสามารถในการรับแรงบดอัดที่เพียงพอ รวมไปถึงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เพิ่มมากขึ้นยังส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานเช่นกัน

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินเทียบกับปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานโดยกำหนด $r_i / r_o = 0.25$, $\phi_{cv} = 30^\circ$ และ 36° , $Q = 5.5$ และ 10 , $I_D = 0.5 - 1$, $\gamma = 16 - 22$ kN/m³ พบว่าค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานเพิ่มขึ้นเนื่องจากค่า I_D เป็นค่าที่บ่งบอกถึงระดับความหนาแน่นของดินเม็ดหยาบว่ามีความหยาบมากน้อยเพียงใดซึ่งจะส่งผลต่อการเชื่อมประสานระหว่างกันของเม็ดดิน เมื่อค่า I_D ที่มีค่าสูงส่งผลให้ค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานมีค่าสูงกว่า I_D ที่มีค่าน้อย แต่เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ประกอบกับค่ามุมเสียดทานที่จุดวิกฤตที่ $\phi_{cv} = 30^\circ$ และ 36° พบว่าเมื่อค่ามุมเสียดทานที่จุดวิกฤตมีค่ามาก ($\phi_{cv} = 36^\circ$) จะทำให้ค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานมีค่าสูงกว่าค่ามุมเสียดทานที่จุดวิกฤตที่มีค่าน้อย ($\phi_{cv} = 30^\circ$)

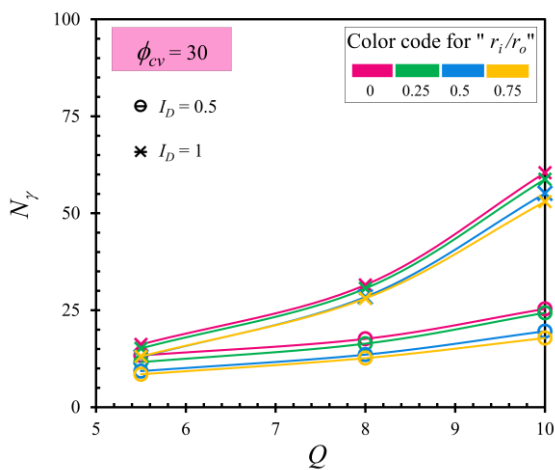


(ก) $I_D = 0.5$

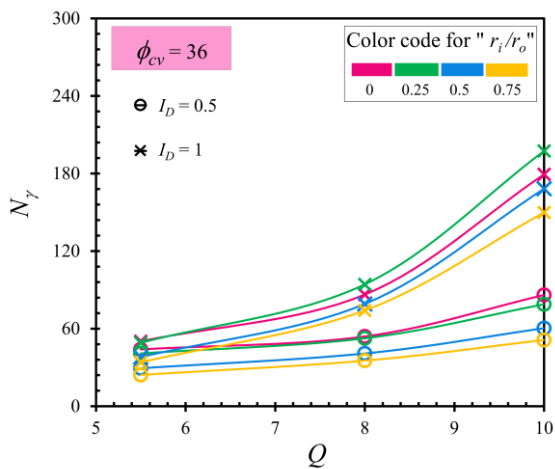


(จ) $I_D = 1$

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนรัศมีภายในต่อรัศมีภายนอกของฐานรากเทียบกับปัจจัยกำลังรับแรงแบกทาน

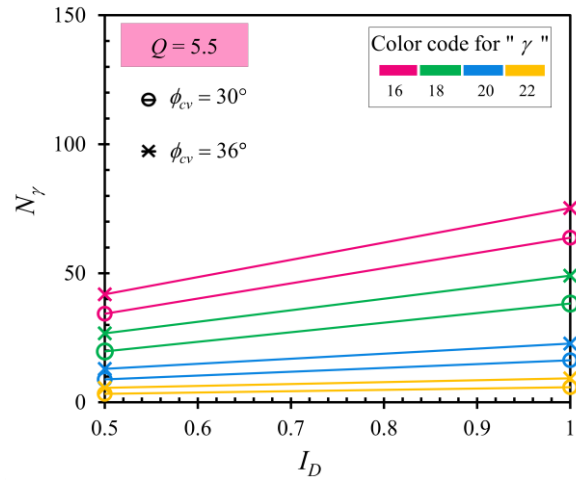


(ก) $\phi_{cv} = 30^\circ$

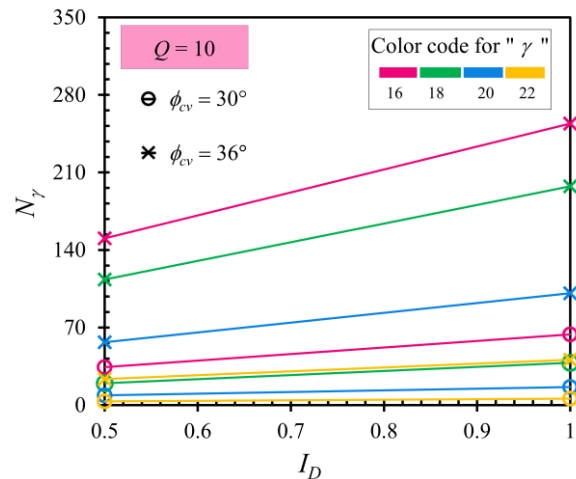


(ข) $\phi_{cv} = 36^\circ$

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับแรงกดอัดของเม็ดดินเทียบกับค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทาน



(ก) $Q = 5.5$

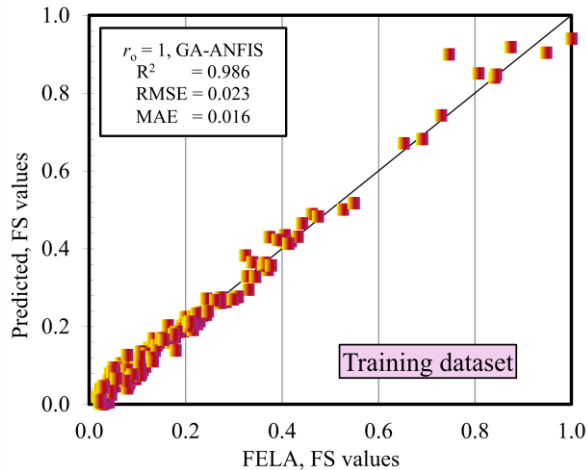


(ข) $Q = 10$

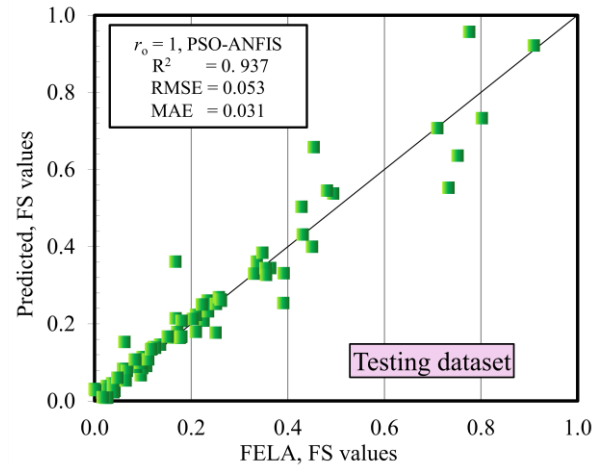
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดินเทียบกับปัจจัยกำลังรับแรงแบกทาน

5.3 ผลของการใช้งาน Hybrid ANFIS ในการหาค่ากำลังรับแรงแบกทาน

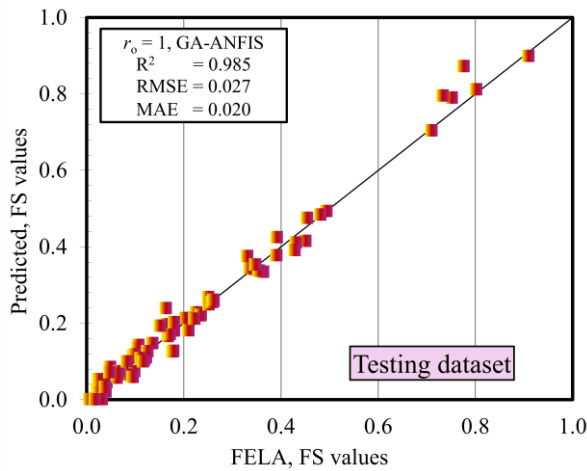
ตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง hybrid ANFIS จากการใช้แบบจำลองในการทำนายค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากวางบนดินทรายแน่นโดยแบบจำลองของ Bolton โดยผลเฉลยที่ได้จากวิธี FELA มาเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากวิธีการทำนายโดยแบบจำลอง hybrid ANFIS และจากผลของการทดสอบ พบว่าในกรณีของ PSO-ANFIS ช่วงของการฝึกอบรมข้อมูลให้ความแม่นยำสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 99.7% และมีค่า R^2 เท่ากับ 93.7% ในช่วงของการทดสอบและในส่วนกรณีของวิธี GA-ANFIS พบว่าระหว่างแบบจำลอง GA-ANFIS และ FELA มีความคลาดเคลื่อนอย่างมากเมื่อพิจารณาจากค่า RMSE ในช่วงของการฝึกอบรมและการทดสอบ มีค่าเท่ากับ 0.023 และ 0.027 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 9 และ 10 และตารางที่ 2



(ก) ชุดข้อมูลการฝึกอบรม

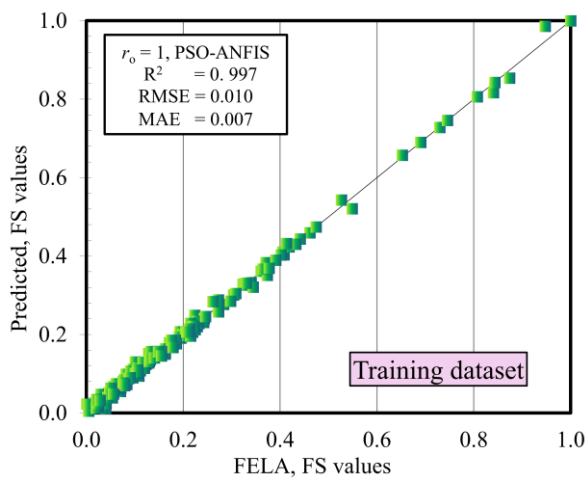


(ข) ชุดข้อมูลการทดสอบ



(ค) ชุดข้อมูลการทดสอบ

รูปที่ 9 การเปรียบเทียบปัจจัยกำลังรับแรงแบททานจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี FELA และการทำนายด้วย ANFIS-GA



(ง) ชุดข้อมูลการฝึกอบรม

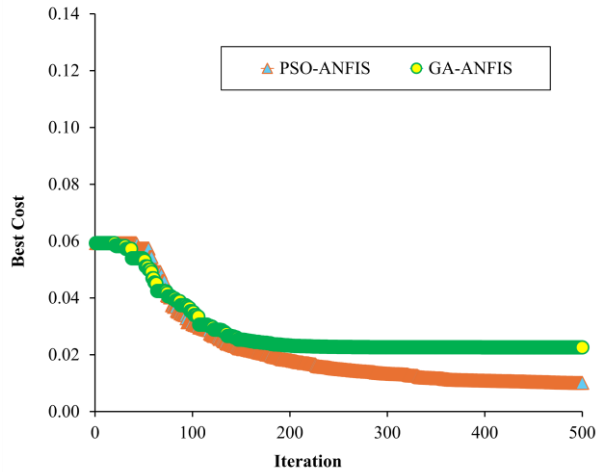
รูปที่ 10 การเปรียบเทียบปัจจัยกำลังรับแรงแบททานจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี FELA และการทำนายด้วย ANFIS-PSO

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง Hybrid ANFIS

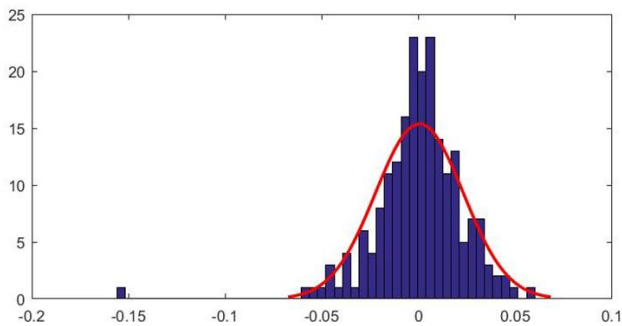
หัวข้อ		PSO-ANFIS		GA-ANFIS	
		Training	Testing	Training	Testing
Metric	R^2	0.997	0.937	0.986	0.985
	RMSE	0.010	0.053	0.023	0.027
	MAE	0.007	0.031	0.016	0.020

จากรูปที่ 11 แสดงกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพของอัลกอริทึม hybrid ANFIS โดยค่า best cost อยู่ในช่วง 0.010 ถึง 0.059 และกำหนดจำนวนการทำซ้ำสูงสุดอยู่ที่ 500 รอบ โดยจะสังเกตว่า PSO-ANFIS มีประสิทธิภาพสูงสุดจากการพิจารณาที่จุดสิ้นสุดพบว่าเส้นแนวโน้มที่ต่ำกว่าแบบจำลอง GA-ANFIS ในแง่ของการลดค่า RMSE เมื่อจำนวนของรอบการประมาณเพิ่มมากขึ้น หรือเมื่อการทำซ้ำมากกว่า 200 รอบ แต่เมื่อพิจารณาจำนวนรอบในการทำซ้ำที่ประมาณ 50 รอบ พบว่าประสิทธิภาพของ GA-ANFIS และ PSO-ANFIS มีค่าเท่ากัน

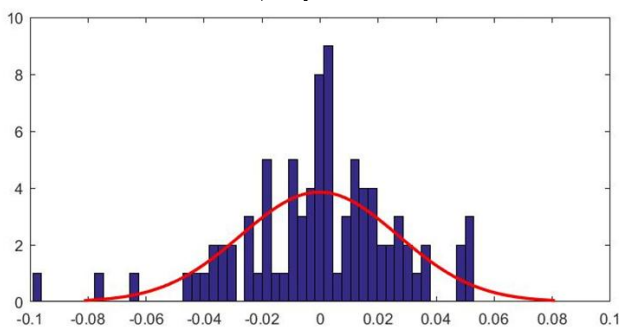
จากรูปที่ 12 (ก-ข) เมื่อพิจารณาจากแบบจำลอง GA-ANFIS สามารถสรุปผลเชิงตัวเลขจากภาพฮิสโตแกรมช่วงของค่าความคลาดเคลื่อน (Absolute Error) ของรูปที่ 12 (ก) พบค่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่ของช่วงการฝึกอบรม (Training) มีค่าประมาณ -0.05 ถึง +0.05 รูปที่ 12 (ข) ช่วงการทดสอบ (Testing) พบค่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่อยู่ที่ -0.08 ถึง +0.08 ซึ่งมีความเสถียรในการให้ค่าความผิดพลาดที่สม่ำเสมอทั้งในช่วงของการฝึกอบรม และการทดสอบ และเมื่อพิจารณารูปที่ 13 (ก-ข) จากแบบจำลอง PSO-ANFIS ในช่วงของการฝึกอบรม รูปที่ 13 (ก) พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่อยู่ในช่วง -0.03 ถึง +0.03 ซึ่งมีความแม่นยำมากกว่าเมื่อเทียบกับวิธี GA-ANFIS และรูปที่ 13 (ข) ช่วงของการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่อยู่ในช่วง -0.15 ถึง +0.15 แต่ก็มี Outliers บางค่าที่คลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ +0.18 และต่ำสุดประมาณ -0.21



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของค่า RMSE ในแบบจำลอง PSO-ANFIS และ GA-ANFIS สำหรับชุดข้อมูลทดสอบเมื่อเทียบกับจำนวนรอบการประมาณค่า

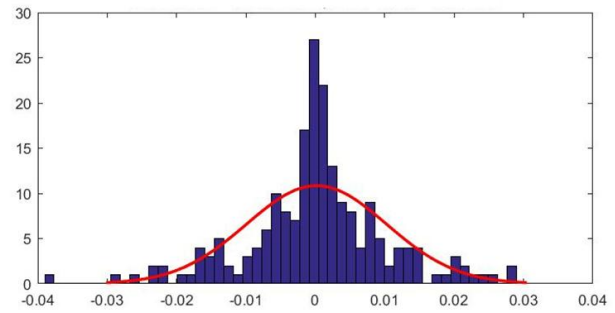


(ก) ชุดข้อมูลฝึกอบรม

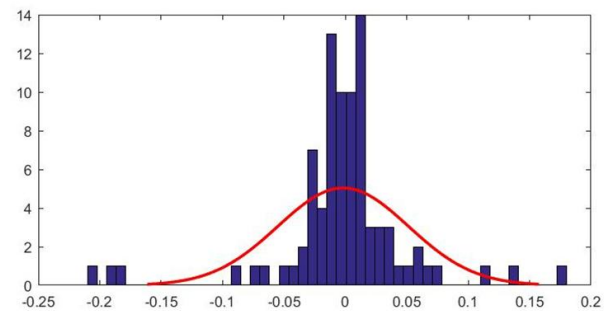


(ข) ชุดข้อมูลทดสอบ

รูปที่ 12 ฮิสโตแกรมของค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานระหว่างกระบวนการปรับขนาดข้อมูลด้วยแบบจำลอง GA-ANFIS สำหรับ (ก) ชุดข้อมูลฝึกอบรม และ (ข) ชุดข้อมูลทดสอบ



(ก) ชุดข้อมูลฝึกอบรม



(ข) ชุดข้อมูลทดสอบ

รูปที่ 13 ฮิสโตแกรมของค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานระหว่างกระบวนการปรับขนาดข้อมูลด้วยแบบจำลอง PSO-ANFIS สำหรับ (ก) ชุดข้อมูลฝึกอบรม และ (ข) ชุดข้อมูลทดสอบ

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากวงแหวนบนดินทรายแน่นโดยใช้หลักการของ Bolton โดยการใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธี FELA ร่วมกับเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ด้วยอัลกอริทึมแบบ hybrid ANFIS โดยได้ทำการศึกษารูปร่างที่เกี่ยวของจำนวน 5 พารามิเตอร์ คือ อัตราส่วนรัศมีภายในต่อรัศมีภายนอกของฐานรากวงแหวน (r_i / r_o), ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (I_D), ค่ามุมเสียดทานภายในของทรายในสภาวะวิกฤต (ϕ_{cv}), ค่ากำลังรับแรงกดอัดของดิน (Q), และค่าหน่วยน้ำหนักของดิน (γ) และนำผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงแบกทานที่ได้จากวิธี FELA จากการศึกษาครั้งนี้มาเปรียบเทียบกับผลทดสอบของงานวิจัยในอดีต

จากผลของการทดสอบและการวิเคราะห์การเปรียบเทียบวิธี FELA กับผลการทดสอบของงานวิจัยในอดีตสำหรับการหาค่ากำลังรับแรงแบกทานของฐานรากบนดินทรายแน่น พบว่า พบว่าผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี FELA ให้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยจากการทดสอบด้วยวิธี Centrifuge test ในอดีตของ Kutter และ Okamura [19-20] ดังนั้น จึงเป็นการยืนยันความสามารถในการใช้ FELA และหลักการของ Bolton ในการศึกษาพฤติกรรมของดินทรายแน่น

งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นถึงผลการวิเคราะห์หาค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากวงแหวนบนดินทรายแน่นโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธี FELA ที่ได้จากการกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์ภายใต้เงื่อนไขสมมาตร และค่าพารามิเตอร์ปรับแก้ b กำหนดให้เท่ากับ 2.0 เพื่อให้ผลที่ได้สอดคล้องกับผลของการทดสอบ และยังทำให้ทราบว่าการเพิ่มขึ้นของ

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องส่งผลให้ค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานมีค่าเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาแบบจำลองแบบ machine learning แบบผสมผสานเพื่อพัฒนาแบบจำลองให้มีประสิทธิภาพในการทำนายค่ามากยิ่งขึ้น สำหรับผลของการวิเคราะห์ปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานจากการใช้แบบจำลอง hybrid ANFIS ได้แก่ GA-ANFIS และ PSO-ANFIS เพื่อทำนายค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทาน โดยแบบจำลอง PSO-ANFIS มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบจำลอง GA-ANFIS โดยสามารถให้ความแม่นยำสูงสุดเมื่อพิจารณาจากค่า $R^2 = 99.7\%$ ในช่วงการฝึกอบรมที่ให้การทำนายที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด และค่า $R^2 = 93.7\%$ ในช่วงของการทดสอบรวมถึงให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดในส่วนของการค่า RMSE และ MAE ของแบบจำลอง PSO-ANFIS สามารถลดข้อผิดพลาดของการทำนายได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยเฉพาะในช่วงการฝึกซึ่งให้ผลลัพธ์เท่ากับ 0.01 และ 0.007 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ดีกว่า GA-ANFIS ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากการเปลี่ยนแปลงของค่า RMSE ในแบบจำลอง PSO-ANFIS และ GA-ANFIS สำหรับชุดข้อมูลทดสอบเมื่อเทียบกับจำนวนรอบการประมาณค่ากระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพของอัลกอริทึม hybrid ANFIS จากการสังเกตจะพบว่า PSO-ANFIS มีประสิทธิภาพสูงสุดจากการพิจารณาที่จุดสิ้นสุดพบว่าเส้นแนวโน้มที่ต่ำกว่าแบบจำลอง GA-ANFIS ในแง่ของการลดค่า RMSE เมื่อจำนวนของรอบการประมาณเพิ่มมากขึ้น หรือเมื่อการทำซ้ำมากกว่า 200 รอบ แต่เมื่อพิจารณาจำนวนรอบในการทำซ้ำที่ประมาณ 50 รอบ พบว่าประสิทธิภาพของ GA-ANFIS และ PSO-ANFIS มีค่าเท่ากัน

จากภาพฮิสโตแกรมของค่าความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่าปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานด้วยอัลกอริทึม hybrid ANFIS พบว่า จากแบบจำลอง GA-ANFIS ค่าความคลาดเคลื่อนที่พบมากที่สุดอยู่ในช่วงการฝึกอบรม (training) มีค่าประมาณ -0.05 ถึง +0.05 ซึ่งมีความเสถียรในการให้ค่าความผิดพลาดที่สม่ำเสมอทั้งในช่วงของการฝึกอบรมและการทดสอบจากแบบจำลอง PSO-ANFIS ในช่วงของการฝึกอบรม พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่อยู่ในช่วง -0.03 ถึง +0.03 ซึ่งมีความแม่นยำมากกว่าเมื่อเทียบกับวิธี GA-ANFIS และช่วงของการทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่อยู่ในช่วง -0.15 ถึง +0.15 แต่ก็มี Outliers บางค่าที่คลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ +0.18 และต่ำสุดประมาณ -0.21 และแบบจำลอง PSO-ANFIS มีค่าขอบเขตของความผิดพลาดแคบกว่าโดยเฉพาะในช่วงการฝึกอบรมจึงสามารถลดความคลาดเคลื่อนในการทำนายค่า N_f ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า GA-ANFIS แต่โดยรวมแล้ววิธีการต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ถือเป็นอีกทางเลือกในการพัฒนางานในด้านวิศวกรรมฐานรากโดยเฉพาะฐานรากวงแหวนและยังทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของดินทรายแน่น Bolton มากขึ้น ซึ่งจะประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาปัจจัยกำลังรับแรงแบกทานของฐานรากวงแหวนวางบนดินทรายแน่นและยังถือว่าผลเฉลยที่ได้จากการทำนายมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยที่ได้จากวิธี FELA อีกทั้งยังคาดหวังว่าผลลัพธ์ที่ได้นี้จะมีประโยชน์ต่อวิศวกรในแง่ของการนำไปพิจารณาออกแบบฐานรากและเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อนักวิจัยต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bowles, J. E. 1996. Foundation analysis and design. New Delhi, India: McGraw-Hill.
- [2] Sargazi, O., and E. S. Hosseini. 2017. Bearing capacity of ring footings on cohesionless soil under eccentric load. Comput. Geotech. 92 (Dec): 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.08.003>.
- [3] Bolton, M. D. (1986). The strength and dilatancy of sand. Geotechnique, 36(1), 65-78.
- [4] Veiskarami, M., Jahanandish, M., & Ghahramani, A. (2012). Stress level-based bearing capacity of foundations: Verification of results with 131 case studies. KSCE Journal of Civil Engineering, 16, 723-732.
- [5] Tang, C., Phoon, K. K., Zhang, L., & Li, D. Q. (2017). Model uncertainty for predicting the bearing capacity of sand overlying clay. International Journal of Geomechanics, 17(7), 04017015.
- [6] Tang, C., & Phoon, K. K. (2017). Model uncertainty of Eurocode 7 approach for bearing capacity of circular footings on dense sand. International Journal of Geomechanics, 17(3), 04016069.
- [7] Tang, C., & Phoon, K. K. (2019). Evaluation of stress-dependent methods for the punch-through capacity of foundations in clay with sand. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 5(3), 04019008.
- [8] วิทยา จิตชัยเจริญ และ สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ (2566). การวิเคราะห์กำลังแบกทานของฐานรากวางบนดินทรายแน่นโดยใช้แบบจำลองของ Bolton. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28, ภูเก็ต, 24-26 พฤษภาคม 2566, 8:28-GTE37-1.
- [9] Sloan, S. W. (2013). Geotechnical stability analysis. Géotechnique, 63(7), 531-571.
- [10] Jang, J.S.R. ANFIS: Adaptive network-based fuzzy inference system. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 1993, 23, 665–683. [CrossRef]
- [11] Stanley A. R., D. H. Oliver, and Y. Srinivas. 2015. An automatic inversion tool for geoelectrical resistivity data using supervised learning algorithm of adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS). Modeling Earth Systems and Environment 1: 6.
- [12] Eberhart, R., and J. Kennedy. 1995. A new optimizer using particle swarm theory. Paper presented at the Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science.
- [13] Mitchell M (1998) An introduction to genetic algorithms. MIT Press, Cambridge
- [14] Ramezanizadeh, M.; Ahmadi, M.H.; Nazari, M.A.; Sadeghzadeh, M.; Chen, L. A review on the utilized machine learning approaches for modeling the dynamic viscosity of nanofluids. Renew. Sustain. Energy Rev. 2019, 114, 109345. [CrossRef]
- [15] Saeidian B, Mesgari MS, Ghodousi M (2016) Evaluation and comparison of genetic algorithm and bees algorithm for location-allocation of earthquake relief centers. Int J Disaster Risk Reduct 15:94–107
- [16] Nourani V, Pradhan B, Ghaffari H, Sharifi SS (2014) Landslide susceptibility mapping at Zonouz Plain, Iran using genetic programming and comparison with frequency ratio, logistic

- regression, and artificial neural network models. *Nat Hazard* 71(1):523–547
- [17] OptumG, O. (2020). Copenhagen, Denmark: Optum Computational Engineering. See <https://optumce.com/>. Accessed, 1.
- [18] Beni, G., and W. Jing. 1993. *Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 703–712.
- [19] Kutter, B., A. Abghari, and J. Cheney. 1988. “Strength parameters for bearing capacity of sand.” *J. Geotech. Eng.* 114 (4): 491–498. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1988\)114:4\(491\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:4(491)).
- [20] Okamura, M., J. Takemura, and T. Kimura. 1997. “Centrifuge model tests on bearing capacity and deformation of sand layer overlying clay.” *Soils Found.* 37(1): 73–88. <https://doi.org/10.3208/sandf.37.73>.