

การออกแบบที่เหมาะสมของโครงถักเหล็กในระนาบโดยขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของวาฟ

สิทธิศักดิ์ อันสนั่น¹ อัศนัย ทาเภา² และเรืองรุทธ์ ชีระโรจน์^{1*}

sitthisak.ans@gmail.com¹, assanai.ta@rmuti.ac.th², raungrut.c@msu.ac.th^{1*}

¹สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

²สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานวิทยาเขตขอนแก่น

Received: February 7, 2024 Revised: May 25, 2024 Accepted: June 19, 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของวาฟ (WOA) สำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของโครงถักเหล็กในระนาบที่มีตัวแปรการออกแบบที่ไม่ต่อเนื่อง ตามมาตรฐาน AISC วิธีกำลังที่ยอมให้ (ASD) โดยเลือกใช้หน้าตัดเหล็กจากตารางเหล็กมาตรฐานเพื่อหาน้ำหนักที่น้อยที่สุดของโครงสร้าง ซึ่ง WOA มีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมโดยเลียนแบบพฤติกรรมการล่าเหยื่อแบบพิเศษของวาฟที่เรียกว่า การพ่นฟองอากาศ โดยการออกแบบที่เหมาะสมของโครงถักเหล็กในระนาบนี้ถูกพัฒนาโดยใช้โปรแกรม Visual Studio 2015 เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีนี้ จึงทำการทดสอบกับตัวอย่างโครงถักเหล็กในระนาบจำนวน 2 ตัวอย่างจากงานที่ผ่านมา ได้แก่ ตัวอย่างโครงถักเสาไฟฟ้า และโครงถักโครงหลังคา และเปรียบเทียบคำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA กับขั้นตอนวิธี HCA และวิธีการออกแบบตามประสบการณ์ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธี WOA มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่ดีกว่าวิธีการที่นำมาเปรียบเทียบ โดยสามารถออกแบบได้น้ำหนักที่เบากว่าอยู่ในช่วงร้อยละ 11.04 ถึง 16.60

คำสำคัญ: ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของวาฟ การออกแบบโครงถักเหล็ก การออกแบบที่เหมาะสม

Optimum Design of Plane Steel Truss using Whale Optimization Algorithm

Sittisak Ansanan¹, Assanai Tapao² and Raungrut Cheerarot^{1*}
sitthisak.ans@gmail.com¹, assanai.tapao@gmail.com², raungrut.c@msu.ac.th^{1*}

¹Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

²Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Isan

Received: February 7, 2024 Revised: May 25, 2024 Accepted: June 19, 2024

Abstract

This paper aims to present the application of the Whale Optimization Algorithm (WOA) to design the optimal plane steel truss with discrete design variables according to the ASD methods by AISC standard. Angle sections are selected from the standard table of steel sections to find the minimum weight of structure. The WOA finds an optimal solution by simulating the special hunting behavior of whales called bubble-net. This optimal plane steel truss design is developed by Visual Studio 2015. To demonstrate the effectiveness of this algorithm, the WOA is tested by two examples of steel plane trusses from literature, namely transmission tower truss and roof truss. The results obtained by the WOA are compared with the HCA and the experience-based design method. The results show that the WOA outperforms the compared methods in finding the optimal solution. It can be designed with a lighter weight in the range of 11.04 to 16.60 %

Keywords: Whale optimization algorithm, Design of steel truss, Optimum design

1. บทนำ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence, AI) เพื่อใช้ในแก้ปัญหาในทางวิศวกรรมที่มีข้อจำกัดและความซับซ้อน [1] ซึ่งขั้นตอนวิธีเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic algorithm) จัดเป็นระบบปัญญาประดิษฐ์ชนิดหนึ่งที่ได้แรงบันดาลใจจากปรากฏการณ์ทางกายภาพ พฤติกรรมหรือแนวคิดการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต งานวิจัยที่ผ่านมาจำนวนมากได้พิสูจน์แล้วว่าประสิทธิภาพอย่างมากในการแก้ปัญหาการออกแบบโครงสร้าง [2] โดยขั้นตอนวิธีที่นิยมได้แก่ ขั้นตอนวิธีทางพันธุกรรม (Genetic algorithm, GA) ที่ได้แรงบันดาลใจจากทฤษฎีการวิวัฒนาการของดาร์วิน ขั้นตอนวิธีอาณานิคมมด (Ant colony optimization, ACO) ที่ได้แรงบันดาลใจจากพฤติกรรมการหาอาหารของมด และขั้นตอนวิธีฝูงอนุภาค (Particle swarm optimization, PSO) ที่เลียนแบบพฤติกรรมทางสังคมของกลุ่มสิ่งมีชีวิต [3] ซึ่งขั้นตอนวิธีเมตาฮิวริสติกจะเริ่มต้นกระบวนการด้วยการสร้างประชากรแบบสุ่มและค่อยๆ ปรับปรุงค่าความเหมาะสมโดยรวมของประชากรอย่างเป็นระบบ [2] และเนื่องจากกระบวนการสร้างประชากรแบบสุ่มนี้จึงทำให้สามารถหลีกเลี่ยงค่าตอบที่เหมาะสมเฉพาะแห่ง (Local optimum) ได้เป็นอย่างดี [4] ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ขั้นตอนวิธีเมตาฮิวริสติกเป็นที่นิยมอย่างมาก

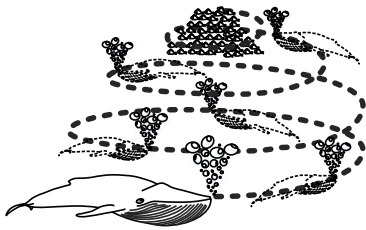
ขั้นตอนวิธีการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของวาฬ (Whale optimization algorithm : WOA) [5] เป็นหนึ่งในขั้นตอนวิธีเมตาฮิวริสติกที่มีกระบวนการในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมโดยการเลียนแบบพฤติกรรมการหาอาหารของวาฬหลังค่อม โดย Touna [6] ใช้ขั้นตอนวิธี WOA ในการแก้ปัญหาเศรษฐศาสตร์การจ่ายกำลังไฟฟ้า (Economic dispatch) โดยใช้ระบบทดสอบมาตรฐานของ IEEE 30-Bus ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับขั้นตอนวิธีอื่นๆ ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ Mostafa และคณะ [7] นำขั้นตอนวิธี WOA มาใช้ในการแบ่งส่วนของดัดในภาพที่สร้างด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic resonance imaging, MRI) ซึ่งพบว่าผลการทดสอบที่ได้จากขั้นตอนวิธี WOA มีความแม่นยำร้อยละ 96.75 เมื่อวัดด้วยดัชนีความคล้ายคลึงกันของโครงสร้างและร้อยละ 97.50 เมื่อวัดด้วยดัชนีความคล้ายคลึงกัน Gautam และ Biswas [8] นำ

ขั้นตอนวิธี WOA มาใช้ในการตรวจจับขอบของภาพสิ่งรบกวนเกาส์แบบบวก (Additive gaussian noise images) ซึ่งผลการทดสอบพบว่าขั้นตอนวิธี WOA มีประสิทธิภาพดีกว่าเทคนิคที่ใช้ในการตรวจจับขอบของภาพอื่นๆ และ Jiang และคณะ [9] ได้มีการพัฒนาขั้นตอนวิธี WOA และประยุกต์ใช้กับการออกแบบโครงถักที่เหมาะสม ซึ่งผลการทดลองพบว่าขั้นตอนวิธี WOA ที่ได้รับการพัฒนามีประสิทธิภาพดีกว่าขั้นตอนวิธีอื่นๆ ที่ถูกนำมาเปรียบเทียบ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าขั้นตอนวิธี WOA มีประสิทธิภาพที่สูงมากในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่มีความซับซ้อน และถึงแม้ว่า Jiang และคณะ เคยนำขั้นตอนวิธี WOA มาใช้กับการออกแบบโครงถักที่เหมาะสม แต่ในตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นไม่ได้คำนวณกำลังรับน้ำหนักของชิ้นส่วนตามมาตรฐานการออกแบบซึ่งเป็นเพียงการสมมติหน่วยแรงที่ยอมให้ของชิ้นส่วนเท่านั้น และหน้าตัดที่นำมาใช้นั้นไม่ใช่หน้าตัดจริง โดยกำหนดเพียงค่าพื้นที่หน้าตัดเท่านั้น และปราศจากคาร์ซีมไจเรชั่นที่ใช้ในการคำนวณอัตราส่วนความขรุขระที่ส่งผลต่อข้อจำกัดด้านความขรุขระและกำลังรับน้ำหนักของชิ้นส่วนโดยตรง จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ในการออกแบบโครงถักที่เหมาะสมตามมาตรฐานการออกแบบนั้นค่อนข้างซับซ้อน และงานวิจัยที่เคยนำเสนอไม่สามารถนำผลการออกแบบไปใช้ในการก่อสร้างได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี WOA ในการออกแบบโครงถักเหล็กในระนาบที่มีตัวแปรการออกแบบที่ไม่ต่อเนื่อง ตามมาตรฐาน AISI วิธีกำลังที่ยอมให้ (ASD) [10] เพื่อหาน้ำหนักที่น้อยที่สุดของโครงสร้าง โดยใช้หน้าตัดเหล็กฉากจากตารางเหล็กมาตรฐาน และใช้ตัวอย่างในการออกแบบจำนวน 2 ตัวอย่างจากงานที่เกี่ยวข้อง [11-12] และทำการเปรียบเทียบคำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA กับขั้นตอนวิธีการปีนเขา (Hill climbing algorithm, HCA) และวิธีการออกแบบตามประสบการณ์ เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีนี้ในการออกแบบโครงถักเหล็กในระนาบที่เหมาะสม

2. ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ

Mirjalili และ Lewis [5] ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของวาฬ (WOA) ครั้งแรกในปี ค.ศ. 2016 โดยได้แนวคิดมาจากพฤติกรรมการล่าเหยื่อของวาฬหลังค่อม (Humpback whales) ที่ชอบล่าฝูงกุ้งและฝูงปลาบริเวณผิวน้ำด้วยวิธีการล่าที่พิเศษที่เรียกว่าการพ่นฟองอากาศ (Bubble-net) ซึ่งการหาอาหารวิธีนี้สามารถทำได้โดยการสร้างฟองอากาศที่มีลักษณะเฉพาะตามแนววงกลมเพื่อต้อนฝูงปลาและกุ้งให้มาอยู่รวมกันที่ผิวน้ำดังรูปที่ 1 จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของขั้นตอนวิธี WOA ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 พฤติกรรมการพ่นฟองอากาศของวาฬหลังค่อม [5]

2.1 การล้อมเหยื่อ (Encircling prey) ในขั้นตอนวิธีนี้จะสมมติว่าคำตอบที่ดีที่สุดในปัจจุบันคือเหยื่อที่เป็นเป้าหมายหรือค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสม โดยหลังจากการกำหนดตัวแทนการค้นหาค่าที่ดีที่สุดแล้ว ตัวแทนการค้นหาค่าอื่นจะพยายามปรับปรุงตำแหน่งของตนไปยังตัวแทนการค้นหาค่าที่ดีที่สุด ซึ่งพฤติกรรมที่กล่าวมาสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$\bar{D} = \left| \bar{C} \cdot \bar{X}^*(t) - \bar{X}(t) \right| \quad (1)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (2)$$

เมื่อ X^* คือ ตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุด $\bar{X}$ คือ ตำแหน่งปัจจุบัน t คือ รอบการทำซ้ำปัจจุบัน $\bar{A}, \bar{D}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3) และ (4)

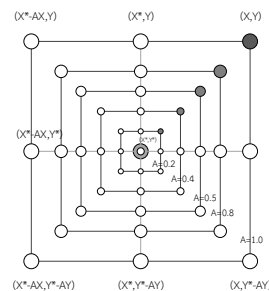
$$\bar{A} = 2\bar{a} \cdot \bar{r} - \bar{a} \quad (3)$$

$$\bar{C} = 2 \cdot \bar{r} \quad (4)$$

โดยที่ $\bar{a}$ คือ ค่าที่ลดลงเชิงเส้นจาก 2 ถึง 0 ในทุกรอบการทำซ้ำ และ $\bar{r}$ คือ ค่าสุ่มที่อยู่ในช่วง $[0,1]$

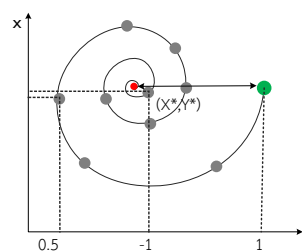
2.2 วิธีการโจมตีโดยการพ่นฟองอากาศ (Bubble-net attacking method) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพฤติกรรมการพ่นฟองอากาศของวาฬหลังค่อมมีการออกแบบให้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงไว้ 2 วิธีดังนี้

2.2.1 กลไกการล้อมเหยื่อแบบหดตัว (Shrinking encircling mechanism) ซึ่งวิธีนี้สามารถทำได้โดยการลดค่า $\bar{a}$ ในสมการที่ (3) โดยช่วงความผันผวนของค่าสัมประสิทธิ์ $\bar{A}$ จะลดลงด้วย ซึ่งกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ $\bar{A}$ คือค่าสุ่มในช่วง $[-a, a]$ โดยที่ $\bar{a}$ จะลดลงจาก 2 ถึง 0 ในทุกรอบการทำซ้ำ และค่าสัมประสิทธิ์ $\bar{A}$ มีค่าอยู่ในช่วง $[-1,1]$ ซึ่งตำแหน่งใหม่ของตัวแทนการค้นหาค่าสามารถกำหนดได้ทุกที่ระหว่างตำแหน่งเดิมกับตำแหน่งที่ดีที่สุดในปัจจุบัน ดังรูปที่ 2 ที่แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งที่เป็นไปได้จาก (X,Y) ไปยัง (X^*,Y^*) เมื่อ $\bar{A}$ มีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$



รูปที่ 2 กลไกการล้อมเหยื่อแบบหดตัว [5]

2.2.2 การปรับปรุงตำแหน่งแบบเกลียว (Spiral updating position) โดยขั้นตอนแรกจะคำนวณระยะห่างและสร้างสมการแบบเกลียว ระหว่างตำแหน่งของวาฬและเหยื่อเพื่อเลียนแบบการเคลื่อนที่แบบเกลียวของวาฬหลังค่อมซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 และคำนวณได้ดังสมการที่ (5) และ (6)



รูปที่ 3 กลไกการปรับปรุงตำแหน่งแบบเกลียว [5]

$$\bar{X}(t+1) = \bar{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi t) + \bar{X}^*(t) \quad (5)$$

$$\bar{D} = |\bar{X}^*(t) - \bar{X}(t)| \quad (6)$$

โดยที่ b คือ ค่าคงที่สำหรับกำหนดรูปร่างของเกลียวลอการิทึม (Logarithm) l คือ ค่าสุ่มระหว่าง -1 ถึง 1

โดยทั่วไปวาทหลังค่อมจะว่ายน้ำรอบเหยื่อเป็นวงกลมที่ค่อยๆ หดตัวและว่ายน้ำเป็นเกลียวในเวลาเดียวกัน ซึ่งในการสร้างแบบจำลองที่เกิดขึ้นพร้อมกันนี้ มีความเป็นไปได้ประมาณร้อยละ 50 ที่จะเลือกระหว่างกลไกการล้อมเหยื่อแบบหดตัวกับการปรับปรุงตำแหน่งแบบเกลียว ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ (7) และ (8)

เมื่อ $p < 0.5$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}^*(t) - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (7)$$

เมื่อ $p \geq 0.5$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi t) + \bar{X}^*(t) \quad (8)$$

เมื่อ p คือ ค่าสุ่มตั้งแต่ 0 ถึง 1

2.2.3 การค้นหาเหยื่อ (Search for prey)

วาทหลังค่อมจะค้นหาเหยื่อแบบสุ่มตามตำแหน่งของกันและกัน โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (9) และ (10) ซึ่งกลไกนี้เป็นกลไกสำหรับการค้นหาทางกว้าง (Global search) ของขั้นตอนวิธี WOA

$$\bar{D} = \bar{C} \cdot \bar{X}_{rand} - \bar{X} \quad (9)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}_{rand} - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (10)$$

เมื่อ $\bar{X}_{rand}$ คือ ตำแหน่งที่ได้จากการสุ่ม

3. ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กตามมาตรฐาน AISC

ในงานวิจัยนี้ใช้มาตรฐานการออกแบบตามข้อกำหนดของ AISC วิธี ASD [10] ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณออกแบบที่ใช้สภาวะการใช้งาน (Service state) กล่าวคือแรงที่ได้จากการวิเคราะห์โดยทฤษฎีอิลาสติกภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน ต้องมีค่าไม่เกินค่าความต้านทานระบุของหน้าตัด (Nominal resistance) ทหารด้วยตัวคูณความปลอดภัย (Factor of safety) ดังสมการที่ (11)

$$Q_a \leq R_n / \Omega \quad (11)$$

เมื่อ Q_a คือ แรงต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งาน R_n คือ ความต้านทานระบุของหน้าตัด และ Ω คือ ตัวคูณความปลอดภัยมีค่าเท่ากับ 1.67

ในการออกแบบโครงสร้าง จะพิจารณาให้จุดต่อระหว่างองค์อาคารเป็นแบบหมุน (Hinge joint) ดังนั้นแรงภายในที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกจึงมีเฉพาะ แรงดึงและแรงอัดเท่านั้น ซึ่งทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงดึงและแรงอัดมีดังต่อไปนี้

3.1 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงดึง การวิบัติเนื่องจากแรงดึงในองค์อาคารรับแรงดึงอาจเกิดขึ้นได้จาก 2 กรณี คือ การครากบนพื้นที่หน้าตัดรวม และการขาดบนหน้าตัดสุทธิประสิทธิภาพ ณ จุดต่อ เพื่อให้สอดคล้องกับตัวอย่างการออกแบบที่นำมาเปรียบเทียบจากงานที่เกี่ยวข้อง [11-12] ที่ไม่มีการพิจารณาออกแบบจุดต่อ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่พิจารณาออกแบบจุดต่อ และกำหนดให้การวิบัติขององค์อาคารไม่เกิดการขาดบนหน้าตัดสุทธิประสิทธิภาพ กำลังรับแรงดึงเนื่องจากการครากแสดงดังสมการที่ (12)

$$T_n = F_y A_g \quad (12)$$

เมื่อ T_n คือ กำลังรับแรงดึงของหน้าตัด F_y คือ หน่วยแรงครากของชิ้นส่วน และ A_g คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน

3.2 ทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรับแรงอัด กำลังรับแรงอัดของหน้าตัดมีค่าดังสมการที่ (13)

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (13)$$

เมื่อ A_g คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน F_y คือ หน่วยแรงครากของชิ้นส่วน F_{cr} คือ หน่วยแรงอัดวิกฤตซึ่งคำนวณได้จากสมการ (14)

$$F_{cr} = \begin{cases} 0.877 F_e & , KL/r > 4.71 \sqrt{E/F_y} \\ \left(\frac{F_y}{0.658} \right) F_y & , KL/r \leq 4.71 \sqrt{E/F_y} \end{cases} \quad (14)$$

เมื่อ E คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น L คือ ความยาวของชิ้นส่วน F_e คือ หน่วยแรงอัดอิลาสติกจากสมการของออยเลอร์มีค่าเท่ากับ $\pi^2 E / (KL/r)^2$ และ K คือ สัมประสิทธิ์ความยาวประสิทธิภาพซึ่งเท่ากับ 1 สำหรับโครงสร้าง

4. สมการเป้าหมาย

สมการเป้าหมายของการศึกษานี้คือ ผลรวมของน้ำหนักของโครงสร้างที่น้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเป็นไปตามสมการที่ (15)

$$\text{minimize } W = \sum_{i=1}^{nm} A_i \rho_i L_i \quad (15)$$

เมื่อ W คือ น้ำหนักรวมของโครงสร้าง A คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กรูปพรรณ ρ คือหน่วยน้ำหนักของเหล็กรูปพรรณ L คือ ความยาวของเหล็กรูปพรรณ และ nm คือ จำนวนชิ้นส่วนของเหล็กรูปพรรณในโครงสร้าง

5. ขั้นตอนการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของวาทในการออกแบบโครงสร้าง

ในขั้นตอนแรก จะทำการเตรียมตัวแปรการออกแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้พิจารณาให้ขนาดหน้าตัดเหล็กเป็นตัวแปรการออกแบบ โดยทำการจัดเรียงหน้าตัดจากน้อยไปมากตามน้ำหนัก และกำหนดค่าหมายเลข (ID) ให้กับแต่ละหน้าตัดโดยเริ่มจากหมายเลข 1 จนถึง n (เมื่อ n คือจำนวนหน้าตัด) จากนั้นในขั้นตอนการหาค่าที่เหมาะสม ตัวแปรการออกแบบหรือขนาดหน้าตัดของเหล็กจะเปรียบเสมือนตำแหน่งของวาท ดังนั้นในการหาค่าตำแหน่งใหม่ของวาทตามสมการการค้นหาค่า ID ของแต่ละหน้าตัดแทนตำแหน่งของวาท โดยค่าที่คำนวณได้จะต้องไม่น้อยกว่า 1 และไม่เกินค่า ID ที่มากที่สุด หากค่าที่ได้น้อยกว่า 1 หรือมากกว่าค่า ID ที่มากที่สุด ให้ใช้ค่าเท่ากับ 1 และเท่ากับค่า ID ที่มากที่สุด ตามลำดับ

ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธี WOA แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.1 กำหนดจำนวนประชากรของวาทเริ่มต้น และจำนวนรอบสูงสุด

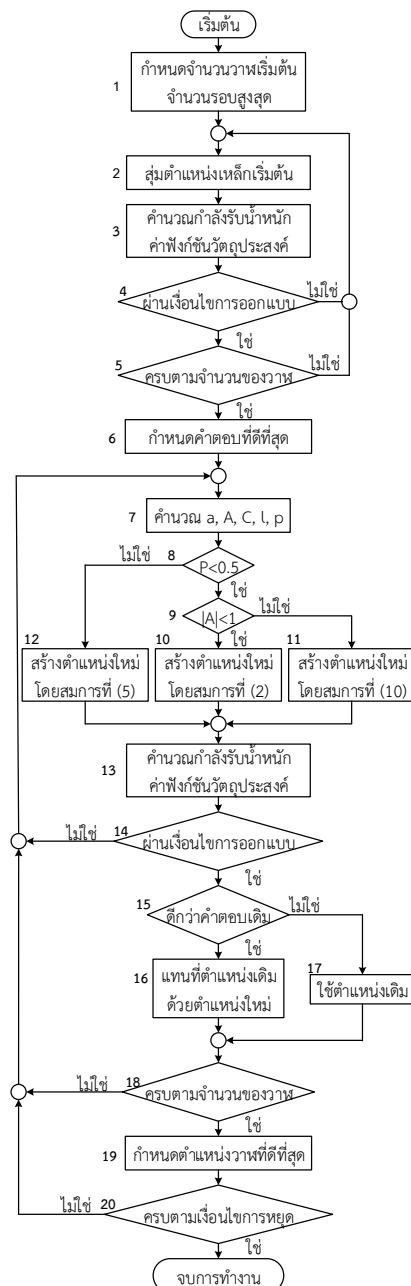
5.2 สุ่มหน้าตัดเหล็กรูปพรรณเริ่มต้นจากตารางเหล็ก

5.3 ทำการวิเคราะห์โครงสร้าง คำนวณกำลังรับน้ำหนักของชิ้นส่วนและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของโครงสร้าง

5.4 ตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบหรือไม่ หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5.2 อีกครั้ง

5.5 ตรวจสอบจำนวนของคำตอบว่าครบตามจำนวนประชากรของวาทที่กำหนดไว้หรือไม่ หากไม่ครบ ให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5.2 อีกครั้ง

5.6 กำหนดให้วาทที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด (น้ำหนักของโครงสร้างน้อยที่สุด) เป็นวาทที่มีคำตอบที่ดีที่สุด



รูปที่ 4 ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธี WOA ในการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสม

- 5.7 คำนวณค่า a , A , C , l , และ p
- 5.8 ตรวจสอบเงื่อนไข $p < 0.5$ หรือไม่ ถ้าใช่ให้ไปในขั้นตอนที่ 5.9 แต่ถ้าไม่ใช่ ให้ไปในขั้นตอนที่ 5.12
- 5.9 ตรวจสอบเงื่อนไข $|A| < 1$ หรือไม่ ถ้าใช่ให้ไปในขั้นตอนที่ 5.10 แต่ถ้าไม่ใช่ ให้ไปในขั้นตอนที่ 5.11
- 5.10 สร้างหน้าต่างใหม่ของเหล็ก โดยใช้กลยุทธ์การล้อมเหยื่อแบบหัดตัวตามสมการที่ (2)
- 5.11 สร้างหน้าต่างใหม่ของเหล็ก โดยใช้การสุ่มตำแหน่งเหล็กขึ้นมาใหม่ตามสมการที่ (10)
- 5.12 สร้างหน้าต่างใหม่ของเหล็ก โดยใช้กลยุทธ์การล้อมเหยื่อแบบเกลียวตามสมการที่ (5)
- 5.13 ทำการวิเคราะห์โครงสร้าง คำนวณกำลังรับน้ำหนักของชิ้นส่วนและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของโครงสร้าง
- 5.14 ตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขการออกแบบหรือไม่ หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5.7 อีกครั้ง
- 5.15 ตรวจสอบว่าคำตอบที่ได้ดีกว่าคำตอบเดิมหรือไม่ หากใช่ ให้ไปยังขั้นตอนที่ 5.16 แต่หากไม่ใช่ ให้ไปยังขั้นตอนที่ 5.17
- 5.16 แทนที่หน้าต่างเหล็กเดิมด้วยหน้าต่างเหล็กใหม่
- 5.17 ใช้หน้าต่างเหล็กเดิม (ไม่ทำการแทนที่หน้าต่างเหล็ก)
- 5.18 ตรวจสอบจำนวนของคำตอบว่าครบตามจำนวนประชากรของวาวที่กำหนดไว้หรือไม่ หากไม่ครบให้ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5.7 อีกครั้ง
- 5.19 กำหนดให้วาวที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด (น้ำหนักของโครงสร้างน้อยที่สุด) เป็นวาวที่มีคำตอบที่ดีที่สุด
- 5.20 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด หากจำนวนรอบการทำซ้ำครบตามจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้ ขั้นตอนวิธีจะหยุดการทำงาน แต่หากไม่ครบจะทำซ้ำในขั้นตอนที่ 5.7 อีกครั้ง

6. ตัวอย่างและผลการทดสอบ

สำหรับขั้นตอนวิธี WOA ถูกทดสอบบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 10 หน่วย

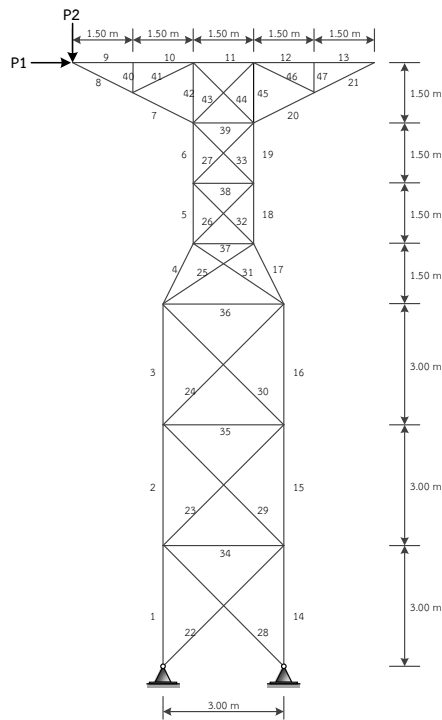
ประมวลผลกลาง (CPU) Intel Core i5-760 2.80 GHz และหน่วยความจำแรม (RAM) 4.00 GB ซึ่งใช้ภาษา Visual basic ในการพัฒนา โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ตัวอย่างการออกแบบที่เป็นตัวแทนของปัญหาการออกแบบโครงถักในระนาบจากงานที่เกี่ยวข้อง [11-12] จำนวน 2 ตัวอย่าง ประกอบด้วย โครงถักเสาไฟฟ้า และโครงถักโครงหลังคา ซึ่งเป็นโครงถักที่มีขนาดใหญ่ มีจำนวนชิ้นส่วนมาก และมีข้อจำกัดในการออกแบบที่ซับซ้อน และจะกำหนดหน้าต่างสำหรับออกแบบจากตารางเหล็กฉากจำนวน 59 หน้าตัด โดยทำการทดสอบตัวอย่างละ 25 ครั้ง เพื่อหาค่าสถิติของการออกแบบที่เหมาะสมและเปรียบเทียบการออกแบบที่เหมาะสมที่ได้รับจากขั้นตอนวิธี WOA กับ ขั้นตอนวิธีการปีนเขา (Hill climbing algorithm, HCA) ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่คล้ายกับการปีนเขาของนักปีนเขา [11] และผลการออกแบบของ Mongkol [12] ที่เป็นวิธีการออกแบบตามประสบการณ์

6.1 ตัวอย่างที่ 1 โครงถักเสาไฟฟ้า

โครงถักเสาไฟฟ้า 47 ชิ้นส่วน มีขนาดและความยาวดังรูปที่ 5 มีแรง P_1 และ P_2 กระทำเท่ากับ 3000 กก. และ 7000 กก. ตามลำดับ โดยมีโมดูลัสยืดหยุ่น (E) 2×10^6 กก./ตร.ซม. และหน่วยแรงคราก (F_y) 2500 กก./ตร.ซม. โดยจัดกลุ่มของชิ้นส่วนออกเป็น 4 กลุ่ม ดังตารางที่ 1 ซึ่งกลุ่มที่ 1 และกลุ่มที่ 2 คือชิ้นส่วนหลัก (Main leg) กลุ่มที่ 3 คือชิ้นส่วนในแนวทแยง (Diagonal member) และกลุ่มที่ 4 คือชิ้นส่วนในแนวนอน (Horizontal member) แต่ละชิ้นส่วนภายในกลุ่มจะใช้หน้าต่างขนาดเดียวกัน ดังนั้นคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดจึงมีค่าเท่ากับ $59^4 = 1.21 \times 10^7$ คำตอบ เพื่อให้สอดคล้องกับงานวิจัยที่นำมาเปรียบเทียบ [11] ในตัวอย่างนี้จึงไม่คำนึงถึงข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ด้านข้างของจุดต่อ

เพื่อหาพารามิเตอร์ (จำนวนประชากรของวาว และจำนวนรอบการทำซ้ำ) ของขั้นตอนวิธี WOA ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบโครงถักโครงถัก จะกำหนดจำนวนประชากรของวาวเท่ากับ 10, 20, 30, 40 และ 50 ตัว กำหนดจำนวนรอบการทำซ้ำสูงสุดเท่ากับ 200 รอบ เพื่อให้ครอบคลุมลักษณะการลู่เข้า และทำการทดสอบจำนวน 25 ครั้ง เพื่อหาค่าสถิติ (น้ำหนักที่เหมาะสมเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ของการ

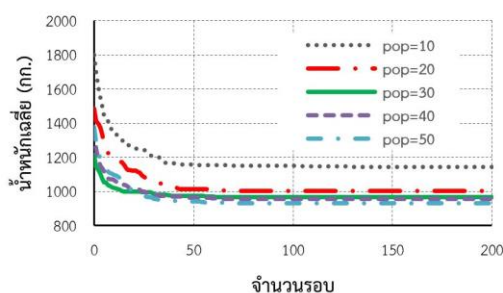
ออกแบบที่เหมาะสม โดยลักษณะการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยของจำนวนประชากรรวม (pop) ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักเฉลี่ยของโครงสร้างกับจำนวนรอบการทำซ้ำ



รูปที่ 5 โครงถักเสาไฟฟ้า

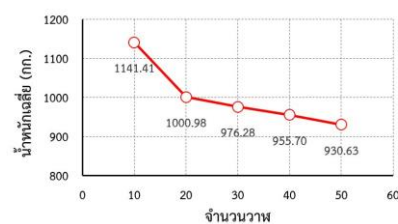
ตารางที่ 1 กลุ่มของชิ้นส่วนโครงถักเสาไฟฟ้า

กลุ่มที่	หมายเลขชิ้นส่วน
1	1, 2, 3, 14, 15, 16
2	4, 5, 6, 7, 8, 17, 18, 19, 20, 21
3	22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 41, 43, 44, 46
4	9, 10, 11, 12, 13, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 45, 47

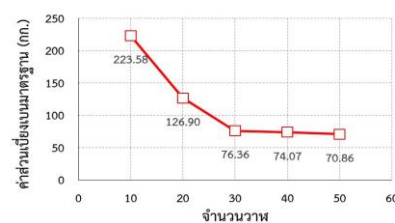


รูปที่ 6 การเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยของขั้นตอนวิธี WOA สำหรับจำนวนประชากรต่างๆในตัวอย่างที่ 1

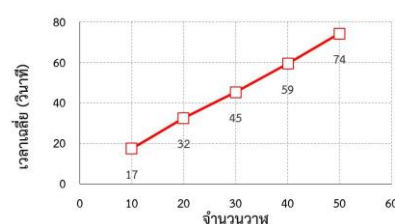
จากรูปที่ 6 พบว่าเมื่อจำนวนประชากรรวมเพิ่มขึ้น ขั้นตอนวิธี WOA มีอัตราการเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเฉลี่ยได้เร็วขึ้น และมีแนวโน้มที่เข้าสู่คำตอบที่ดีกว่า เพราะหากเพิ่มจำนวนประชากร จะทำให้โอกาสในการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมมีมากขึ้น เนื่องจากคุณลักษณะที่เป็นแบบสุ่มของขั้นตอนวิธีเมตาฮิวริสติกประชากรการค้นหาละถูกส่งกระจายไปยังพื้นที่การค้นหาได้ครอบคลุมยิ่งขึ้น ดังนั้นโอกาสในการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมจึงเพิ่มมากขึ้นและมีอัตราการเข้าสู่ที่เร็วขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mirjalili และ Lewis [5] ที่พบว่า เมื่อประชากรการค้นหามีจำนวนมากขึ้น การประมาณค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดก็ยิ่งดีขึ้นด้วย โดยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เหมาะสมเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และเวลาที่ใช้ในการทดสอบกับจำนวนประชากรรวมต่างๆแสดงดังรูปที่ 7 - 9 ตามลำดับ



รูปที่ 7 น้ำหนักที่เหมาะสมเฉลี่ยของขั้นตอนวิธี WOA สำหรับจำนวนประชากรต่างๆในตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 8 ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของขั้นตอนวิธี WOA สำหรับจำนวนประชากรต่างๆในตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 9 เวลาที่ใช้ในการทดสอบเฉลี่ยของขั้นตอนวิธี WOA สำหรับจำนวนประชากรต่างๆในตัวอย่างที่ 1

จากรูปที่ 7 - 9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนประชากรวาทเพิ่มขึ้น น้ำหนักที่เหมาะสมเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีแนวโน้มที่ลดลง ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบจะเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาค่าเหล่านี้พบว่าเมื่อประชากรวาทเท่ากับ 30 ตัว ขั้นตอนวิธี WOA พบน้ำหนักที่เหมาะสมเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีความเหมาะสม และยังใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมอีกด้วย โดยค่าน้ำหนักที่เหมาะสมเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ค้นพบมากกว่าค่าที่ค้นพบจากการกำหนดประชากรวาทเท่ากับ 50 ตัว ร้อยละ 4.90 และ 7.76 ตามลำดับ ในขณะที่เวลาที่ใช้ในการทดสอบเมื่อกำหนดจำนวนประชากรวาทเท่ากับ 30 ตัว มีค่าน้อยกว่าเวลาที่ใช้เมื่อประชากรวาทเท่ากับ 50 ตัว อย่างมาก กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เมื่อประชากรวาทเท่ากับ 30 ตัว นั้นเพียงพอแล้วในการออกแบบโครงสร้างประเภทนี้ อีกทั้งยังลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมได้อย่างรวดเร็วเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6 ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกใช้จำนวนประชากรวาทเท่ากับ 30 ตัว และใช้จำนวนรอบการทำงานสูงสุด 100 รอบ

ค่าสถิติของการออกแบบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA และขนาดหน้าตัดเหล็กที่เหมาะสมที่สุดของตัวอย่างนี้แสดงดังตารางที่ 2 จากตารางพบว่าขั้นตอนวิธี WOA สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ค่าตอบเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 870.80, 976.28 และ 76.36 กก. ตามลำดับ โดยใช้จำนวนรอบการทำงานเท่ากับ 100 รอบ หรือคิดเป็นจำนวนครั้งที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างเท่ากับ 3000 ครั้ง ซึ่งขั้นตอนวิธี WOA ค้นพบคำตอบที่มีน้ำหนักน้อยกว่าขั้นตอนวิธี HCA [11] ที่ออกแบบตามข้อกำหนด AISI วิธีกำลังที่ยอมให้ (ASD) [10] ซึ่งเหมือนกับข้อกำหนดการออกแบบที่ใช้กับงานวิจัยนี้ ร้อยละ 16.60 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าขั้นตอนวิธี WOA มีประสิทธิภาพดีกว่าขั้นตอนวิธี HCA ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ คือ ขั้นตอนวิธี WOA มีกลไกในการเปลี่ยนค่าคำตอบใหม่ (ขั้นตอนการค้นหาเหยื่อ) เพื่อลดโอกาสในการติดอยู่ที่จุดที่เหมาะสมเฉพาะแห่ง (Local optimum) ของคำตอบที่ค้นพบ แต่ขั้นตอนวิธี HCA ไม่มีกลไกนี้ ดังนั้นขั้นตอนวิธี HCA จึงไม่สามารถหลบหนีจากจุดที่เหมาะสมเฉพาะแห่งได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Morteza KT และคณะ [13] ที่พบว่า

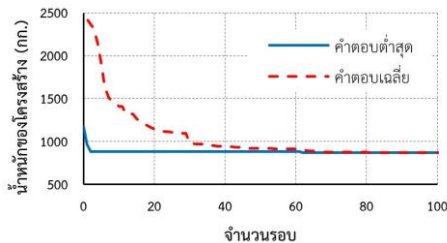
ขั้นตอนวิธี HCA เป็นวิธีการที่ดีสำหรับการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมเฉพาะแห่ง แต่ไม่สามารถรับประกันได้ว่าขั้นตอนวิธีนี้จะค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Global optimum) อีกทั้งขั้นตอนวิธี WOA เป็นวิธีการที่อิงตามประชากร (Population base algorithm) ที่มีการสุ่มคำตอบเริ่มต้นที่หลากหลาย แต่ขั้นตอนวิธี HCA เป็นขั้นตอนวิธีคำตอบเชิงเดี่ยว (Single solution base algorithm) ที่มีเพียงคำตอบเริ่มต้นเพียงค่าเดียว ดังนั้นขั้นตอนวิธี WOA จึงมีโอกาสมากกว่าที่จะค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ในขณะที่การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี HCA จะขึ้นอยู่กับคำตอบเริ่มต้นดังที่แสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดหน้าตัดที่เหมาะสมที่สุดที่ถูกค้นพบโดยขั้นตอนวิธี WOA ในทุกกลุ่มชิ้นส่วน มีขนาดเล็กกว่าขนาดหน้าตัดที่ขั้นตอนวิธี HCA ค้นพบ ดังนั้นจึงส่งผลให้น้ำหนักของโครงสร้างของขั้นตอนวิธี WOA น้อยกว่าขั้นตอนวิธี HCA โดยเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA กับตัวอย่างนี้เท่ากับ 45.21 วินาที ที่จำนวนวาท 30 ตัว

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 1 โครงถักเสาไฟฟ้า

กลุ่มที่	HCA[13]	งานวิจัยนี้(WOA)
1	L125x75x7	L100x100x7
2	L125x75x10	L100x100x7
3	L100x75x7	L80x80x6
4	L75x75x6	L70x70x6
น้ำหนัก (กก.)	1044.15	870.80
ค่าเฉลี่ย (กก.)	-	976.28
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (กก.)	-	76.36
ร้อยละความประหยัด	-	16.60

ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA แสดงดังรูปที่ 10 ซึ่งแสดงคำตอบที่ดีที่สุดที่เป็นน้ำหนักของโครงสร้างที่น้อยที่สุดของประชากรวาททั้งหมดในแต่ละรอบการทำงาน และคำตอบเฉลี่ยที่เป็นน้ำหนักของโครงสร้างเฉลี่ยของประชากรวาททั้งหมดในแต่ละรอบการทำงาน จากรูปพบว่าขั้นตอนวิธี WOA ลู่เข้า

สู่คำตอบที่เหมาะสมอย่างรวดเร็ว โดยเริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบการทำซ้ำที่ 62 และค่าเฉลี่ยของคำตอบที่เหมาะสมของกลุ่มประชากรในแต่ละรอบการทำซ้ำลดลงอย่างต่อเนื่องและเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมในที่สุด ซึ่งเป็นไปตามกลไกการปรับปรุงคำตอบของขั้นตอนวิธีนี้



รูปที่ 10 การเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA ในตัวอย่างที่ 1 โครงถักเสาไฟฟ้า

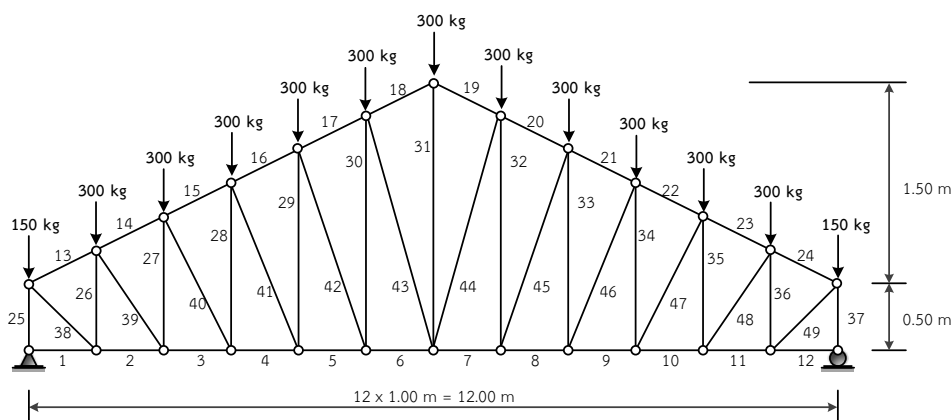
6.2 ตัวอย่างที่ 2 โครงถักโครงหลังคา

โครงถักโครงหลังคามีขนาดของชิ้นส่วนและแรงที่มากระทำแสดงดังรูปที่ 11 โดยมีโมดูลัสยืดหยุ่น (E) 2.1×10^6 กก./ตร.ซม. หน่วยแรงคราก (F_y) 2500 กก./ตร.ซม. และทำการจัดกลุ่มของโครงสร้างออกเป็น 3 กลุ่ม โดยกำหนดให้ชิ้นส่วนหมายเลข 1-24 (Top chord, bottom chord) เป็นกลุ่มที่ 1 ชิ้นส่วนหมายเลข 24-37 (Vertical member) เป็นกลุ่มที่ 2 และชิ้นส่วนหมายเลข 38-49 (Diagonal member) เป็นกลุ่มที่ 3 โดยแต่ละชิ้นส่วนภายในกลุ่มจะใช้หน้าตัดเหล็กชนิดเดียวกัน ดังนั้นคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดจึงเท่ากับ $59^3 = 2.05 \times 10^5$ คำตอบ ในตัวอย่างนี้ นอกจากพิจารณาให้แต่ละชิ้นส่วนต้องสามารถต้านทานแรงภายในที่เกิดขึ้นตามมาตรฐานการออกแบบ

แล้ว ยังคำนึงถึงข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ของจุดต่ออีกด้วยซึ่งกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 3.33 ซม.

จากตัวอย่างการออกแบบโครงถักเสาไฟฟ้าก่อนหน้าที่มีตัวแปรการออกแบบและข้อจำกัดการออกแบบที่คล้ายคลึงกับตัวอย่างนี้ พบว่าเมื่อประชากรราวเท่ากับ 30 ตัว ขั้นตอนวิธี WOA พบน้ำหนักที่เหมาะสมเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีความเหมาะสม และยังใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมอีกด้วย ดังนั้น ในตัวอย่างการออกแบบโครงถักโครงหลังคาที่ทำการศึกษาในส่วนนี้จะกำหนดใช้ประชากรราวเท่ากับ 30 ตัว เช่นเดียวกับตัวอย่างการออกแบบโครงถักก่อนหน้า ค่าสถิติของการออกแบบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA และขนาดหน้าตัดเหล็กที่เหมาะสมที่สุดของตัวอย่างนี้แสดงดังตารางที่ 3 จากตารางพบว่าขั้นตอนวิธี WOA สามารถค้นพบคำตอบที่เหมาะสมได้เท่ากับ 121.53 กก. ซึ่งน้อยกว่าผลการออกแบบของ Mongkol [12] ที่เป็นวิธีการออกแบบตามประสบการณ์ร้อยละ 11.04 โดยค่าเฉลี่ยและ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 130.83 และ 13.39 กก. ตามลำดับ มีจำนวนรอบการทำซ้ำเท่ากับ 100 รอบ หรือคิดเป็นจำนวนครั้งที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างเท่ากับ 3000 ครั้ง และเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมในตัวอย่างนี้เท่ากับ 44.45 วินาที

เนื่องจากผลการออกแบบของ Mongkol ใช้ข้อกำหนด AISI วิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable stress design) [12] ในการออกแบบ ซึ่งมีสมการที่ใช้

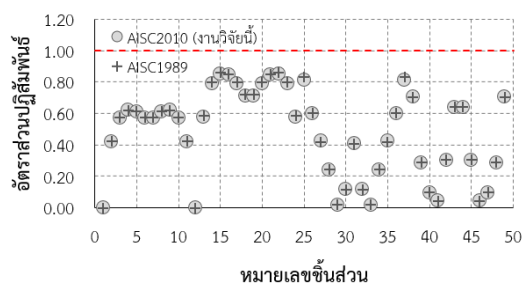


รูปที่ 11 โครงถักโครงหลังคา

ในการคำนวณกำลังรับแรงอัดของชิ้นส่วนที่แตกต่างจากข้อกำหนด AISC วิธีกำลังที่ยอมให้ (Allowable strength design) [10] ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และอาจส่งผลต่อผลการออกแบบที่เหมาะสม ดังนั้น ในส่วนนี้จึงทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงภายในที่เกิดขึ้นและกำลังรับแรงของแต่ละชิ้นส่วนของผลการออกแบบที่เหมาะสมที่ค้นพบโดยขั้นตอนวิธี WOA กับข้อกำหนดทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 12 โดยพบว่าค่าของอัตราส่วนปฏิสัมพันธ์ของทุกชิ้นส่วนที่ออกแบบตามข้อกำหนดทั้งสองมีค่าไม่เกิน 1 ซึ่งหมายความว่า หน้าตัดสามารถต้านทานแรงภายในที่เกิดขึ้นได้อย่างเพียงพอ และจากรูปยังแสดงให้เห็นอีกว่า ค่าอัตราส่วนปฏิสัมพันธ์ของแต่ละชิ้นส่วนที่ออกแบบตามข้อกำหนดทั้งสองมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ความแตกต่างของข้อกำหนดการออกแบบสำหรับตัวอย่างนี้ ไม่มีผลต่อผลการออกแบบที่เหมาะสมที่ขั้นตอนวิธี WOA ค้นพบ

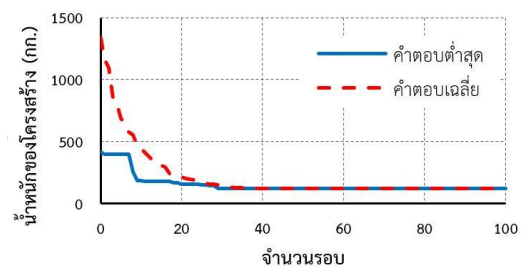
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลการออกแบบที่เหมาะสมของตัวอย่างที่ 2 โครงถักโครงหลังคา

กลุ่มที่	Mongkol [12]	งานวิจัยนี้(WOA)
1	L50x50x4	L45x45x4
2	L40x40x3	L25x30x3
3	L40x40x3	L40x40x3
น้ำหนัก (กก.)	136.61	121.53
ค่าเฉลี่ย (กก.)	-	130.83
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน(กก.)	-	13.39
ร้อยละความประหยัด	-	11.04



รูปที่ 12 อัตราส่วนปฏิสัมพันธ์ของคำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA ในตัวอย่างที่ 2

ลักษณะการลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA แสดงดังรูปที่ 13 ซึ่งแสดงคำตอบที่ดีที่สุดที่เป็นน้ำหนักของโครงสร้างที่น้อยที่สุดของประชากรวาททั้งหมดในแต่ละรอบการทำซ้ำ และคำตอบเฉลี่ยที่เป็นน้ำหนักของโครงสร้างเฉลี่ยของประชากรวาททั้งหมดในแต่ละรอบการทำซ้ำ จากรูปแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธี WOA ลู่เข้าสู่คำตอบที่มีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่เหมาะสมอย่างรวดเร็วและค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่เหมาะสมของกลุ่มประชากรในแต่ละรอบการทำซ้ำลดลงอย่างต่อเนื่องและลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดในที่สุด โดยขั้นตอนวิธี WOA เริ่มค้นพบคำตอบที่เหมาะสมในรอบการทำซ้ำที่ 40



รูปที่ 13 การลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมของขั้นตอนวิธี WOA ในตัวอย่างที่ 2 โครงถักโครงหลังคา

7. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธี WOA ในการออกแบบที่เหมาะสมของโครงถักเหล็กในระนาบ ตามมาตรฐาน AISC วิธีกำลังที่ยอมให้ เพื่อหาน้ำหนักรวมของโครงสร้างที่น้อยที่สุด โดยผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อจำนวนประชากรวาทเพิ่มขึ้น ขั้นตอนวิธี WOA มีแนวโน้มในการค้นพบคำตอบที่เหมาะสมได้ดีขึ้น และค้นพบคำตอบที่เหมาะสมได้รวดเร็วยิ่งขึ้น (เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมเร็วขึ้น) แต่เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบจะเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้พบว่าจำนวนประชากรวาทเท่ากับ 30 ตัว เป็นจำนวนประชากรที่มีความเหมาะสมสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมของโครงถักเหล็กในระนาบที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ และผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นอีกว่า ขั้นตอนวิธี WOA สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบโครงถักเหล็กในระนาบที่มีตัวแปรการออกแบบที่ไม่ต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งขั้นตอน

วิธี WOA ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่มีน้ำหนักเบากว่า ขั้นตอนวิธี HCA และผลการออกแบบของ Mongkol ร้อยละ 16.60 และ 11.04 ตามลำดับ

ถึงแม้ว่าขั้นตอนวิธี WOA ค้นพบคำตอบที่เหมาะสมที่มีน้ำหนักเบากว่าขั้นตอนวิธี HCA แต่ขั้นตอนวิธี WOA ใช้จำนวนรอบการทำซ้ำหรือจำนวนครั้งในการวิเคราะห์โครงสร้างมากกว่า สิ่งนี้ทำให้ขั้นตอนวิธี WOA ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมกว่า ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนาหรือปรับปรุงขั้นตอนวิธี WOA ให้ใช้เวลาน้อยลงในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม เพื่อให้การแก้ปัญหาการออกแบบที่เหมาะสมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

8. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณห้องวิจัยคอนกรีตและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Skandar H, Sadollah A, Bahreinejad A, Hamdi M. Water cycle algorithm–A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems. *Computers & Structures*. 2012;110:151-66.
- [2] Farshchin M, Maniat M, Camp CV, Pezeshk S. School based optimization algorithm for design of steel frames. *Engineering Structures*. 2018;171: 326-35.
- [3] Camp CV, Farshchin M. Design of space trusses using modified teaching–learning based optimization. *Engineering Structures*. 2014;62:87-97.
- [4] Mirjalili S, Mirjalili SM, Lewis A. Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*. 2014;69:46-61.
- [5] Mirjalili S, Lewis A. The whale optimization algorithm. *Advances in engineering software*. 2016;95:51-67.
- [6] Touma HJ. Study of the economic dispatch problem on IEEE 30-bus system using whale optimization algorithm. *International journal of engineering technology and sciences (IJETS)*. 2016;5(1):11-8.
- [7] Mostafa A, Hassanien AE, Houseni M, Hefny H. Liver segmentation in MRI images based on whale optimization algorithm. *Multimedia Tools and Applications*. 2017;76(23):24931-54.
- [8] Gautam A, Biswas M. Whale optimization algorithm based wedge detection for noisy image. *Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems*; 2018 June 14-15; Madurai, India: IEEE; 2019
- [9] Fengguo J, Lutong W, Lili B. An improved whale algorithm and its application in truss optimization. *Journal of Bionic Engineering*. 2021;18:721-32.
- [10] AISI, “Specifications for Structural Steel Buildings”, Chicago, Illinois, American Institute of Steel Construction, June 2010.
- [11] Sunisa T, Thaksin T. Optimum design of plane steel truss using heuristic. *Research and Development Journal of The Engineering Institute of Thailand*. 2011;22(3):25-30. (in Thai)
- [12] Mongkol J. Structural Steel Design (Allowable Stress Design Method) . Nakhon Ratchasima: Suranaree University of Technology; 2005. (in Thai)
- [13] Morteza KT, Seyed MK, Rahele Z, Fakhriye H. Improved hill climbing and simulated annealing algorithms for size optimization of trusses. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2013;7(2):135-8.