

การประยุกต์ใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบวาฬสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ หลายประเภทภายใต้เงื่อนไขด้านกรอบเวลาแบบยืดหยุ่น

กิตติพงษ์ ม้าลำพอง^{1*} และ กนกพร ศรีปฐมสวัสดิ์²

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ

กรุงเทพฯ 10800

Received: 20 February 2023; Revised: 28 March 2023; Accepted: 28 April 2023

บทคัดย่อ

วิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบวาฬ (Whale optimization algorithm: WOA) เป็นวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่เลียนแบบมาจากพฤติกรรมการล่าเหยื่อของวาฬที่ประกอบไปด้วย การค้นหาเหยื่อ บีบวงล้อม และโจมตีเหยื่อ ขั้นตอนการค้นหาคำตอบประกอบไปด้วยการหาคำตอบแบบสุ่มกระจาย (Exploration) และการหาคำตอบในพื้นที่ใกล้เคียง (Exploitation) ซึ่งทำให้ผลของคำตอบที่ได้มีคุณภาพที่ดี งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธี WOA ร่วมกับวิธีค้นหาเฉพาะที่ (Local search: LS) มาใช้ในการปรับปรุงคำตอบ เรียกว่าวิธี WOA-LS สำหรับการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะหลายประเภทภายใต้เงื่อนไขด้านกรอบเวลา (Heterogeneous vehicle routing problem with time windows: HVRPTW) ที่มีกรอบเวลาแบบยืดหยุ่น (Soft time windows) โดยมีขั้นตอนการแก้ปัญหาประกอบด้วย การปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธี WOA-LS ที่ประกอบด้วย จำนวนวาฬ (Number of populations) และจำนวนรอบการค้นหาคำตอบ (Number of iterations) โดยใช้วิธีทากูชิ (Taguchi orthogonal arrays) ในการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) นำผลค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาทดสอบการหาคำตอบกับปัญหาเทียบเคียงที่มีตำแหน่งของลูกค้าแตกต่างกันจำนวนทั้งหมด 56 ปัญหา และนำคำตอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับวิธีค้นหาแบบต้องห้าม (Tabu Search: TS) ผลการหาคำตอบพบว่าวิธี WOA-LS สามารถหาคำตอบได้ดีกว่าวิธี TS จำนวน 9 ปัญหาจาก 56 ปัญหา และสามารถหาคำตอบได้เท่ากับวิธี TS จำนวน 4 ปัญหาจากทั้งหมด 56 ปัญหา โดยมีค่าเฉลี่ยของคำตอบทั้งหมดทุกปัญหามากกว่าค่าเฉลี่ยคำตอบของวิธี TS 3.29% ผลการหาคำตอบแสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีประสิทธิภาพที่ดีในการแก้ปัญหา

คำสำคัญ: การจัดเส้นทางยานพาหนะ, เงื่อนไขด้านกรอบเวลา, วิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบวาฬ, พารามิเตอร์ที่เหมาะสม, การออกแบบการทดลอง

* Corresponding author. E-mail: kittipong.m@cit.kmutnb.ac.th

¹ นักศึกษาปริญญาโท สาขาการจัดการเทคโนโลยีวิศวกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

An Application of Whale Optimization Algorithm for Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows

Kittipong Malampong^{1,*} and Kanokporn Sripathomswat²

Department of Industrial Engineering Technology, College of Industrial Technology
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 1518 Pracharat 1 Road. Wongsawang
Bangsue Bangkok 10800

Received: 20 February 2023; Revised: 28 March 2023; Accepted: 28 April 2023

Abstract

The Whale Optimization Algorithm (WOA) is a metaheuristic algorithm inspired by the hunting behavior of whales, which involves searching for search for prey, encircling prey, and bubble-net attacking. The WOA consists of exploration phase and exploitation phase, aimed at achieving high-quality solutions. This study proposes the application of the WOA method, combined with Local Search (LS) method, named WOA-LS, to solve the Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Time Windows (HVRPTW) under soft time window constraints. The problem-solving process includes adjusting the appropriate parameters of the WOA-LS method, such as the number of populations and the number of iterations, using Taguchi orthogonal arrays and analysis of variance (ANOVA). The parameter results are then used to solve the problem and compare the solutions with those obtained by the Tabu Search (TS) method for 56 benchmark problems with different customer locations. The results show that the WOA-LS method outperforms the TS method for 9 of the 56 problems and achieves the same results for 4 problems. The average solution quality of the WOA-LS method is 3.29% higher than that of the TS method, indicating that the proposed method is effective in solving the problem.

Keywords: vehicle routing problem, time windows, whale optimization algorithm, appropriate parameters, design of experiment

* Corresponding author. E-mail: kittipong.m@cit.kmutnb.ac.th

¹ Master's degree in College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Assistant Professor in College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

1. บทนำ

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle routing problem: VRP) เป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญในการจัดการต้นทุนโลจิสติกส์ซึ่งได้รับความสนใจในการศึกษาวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง รูปแบบของปัญหาเริ่มต้นนำเสนอโดย Dantzing and Ramzer [1] ได้ทำการศึกษาปัญหา VRP ที่มีการขนส่งสินค้าตามปริมาณความต้องการสินค้าที่แตกต่างกัน มีวัตถุประสงค์เพื่อหาคำตอบของเส้นทางยานพาหนะรวมทั้งหมดที่มีระยะทางน้อยที่สุด โดยมีข้อจำกัดหลักอยู่ 3 ข้อ คือ ยานพาหนะต้องเดินทางออกจากคลังสินค้าและกลับมาที่คลังสินค้า ลูกค้านั่งต้องได้รับสินค้าทั้งหมดจากยานพาหนะเพียงคันเดียว และปริมาณความต้องการสินค้าในแต่ละเส้นทางต้องไม่เกินปริมาณความจุของยานพาหนะ ต่อมารูปแบบของปัญหาได้มีการขยายขอบเขตการศึกษาในหลายด้าน รวมทั้งมีการเพิ่มเงื่อนไขและข้อจำกัดที่สอดคล้องกับสภาพปัญหาจริง เช่น การจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีคลังสินค้ามากกว่า 1 แห่ง (Multi-depot vehicle routing problem) การจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีการส่งมอบและรับสินค้าได้ (Vehicle routing problem with pickup and deliveries) การจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีการขนส่งสินค้ากลับมายังคลังสินค้า (Vehicle routing problem with backhauls) เป็นต้น

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะหลายประเภท (Heterogeneous vehicle routing problem: HVRP) เป็นปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีการใช้ยานพาหนะหลายประเภทและความจุในการจัดเส้นทางให้บริการลูกค้า รูปแบบของปัญหาแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะหลายประเภทโดยมีการกำหนดจำนวนและความจุของยานพาหนะในแต่ละประเภท (Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem: HFVRP) นำเสนอโดย Taillard [2] และปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะหลายประเภทโดยมีการกำหนดความจุแต่ไม่กำหนดจำนวนยานพาหนะในแต่ละประเภท (Fleet size and mix vehicle routing problem: FSMVRP) นำเสนอโดย Golden et al. [3] ต่อมาได้มีการเพิ่มเติมเงื่อนไขเรื่องต้นทุนคงที่ (Fixed cost) สำหรับยานพาหนะและต้นทุนแปรผันตามระยะทางการขนส่ง (Variable cost) โดย Ferland and Michelon [4] นำเสนอปัญหา FSMVRP ที่

พิจารณาต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผัน เช่นเดียวกับ Li, Golden and Wasil [5] นำเสนอปัญหา HFVRP ที่พิจารณาต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันเช่นกัน

เงื่อนไขด้านกรอบเวลา (Time windows: TW) เป็นการเพิ่มเงื่อนไขให้กับปัญหา VRP โดยเงื่อนไขด้านกรอบเวลานี้คำนึงถึงกรอบเวลาที่ลูกค้าต้องการรับบริการโดยลูกค้าแต่ละรายมีการกำหนดกรอบเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดการรับบริการ แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ กรอบเวลาแบบเคร่งครัด (Hard time windows) เป็นข้อจำกัดที่ยานพาหนะต้องเดินทางมาถึงและให้บริการภายในกรอบเวลาที่กำหนดเท่านั้น และกรอบเวลาแบบยืดหยุ่น (Soft time windows) เป็นข้อจำกัดที่ยานพาหนะสามารถเดินทางมาถึงก่อนกรอบเวลาเริ่มต้นได้แต่จะต้องรอจนถึงกรอบเวลาเริ่มต้นจึงจะเริ่มให้บริการได้โดยไม่เสียค่าปรับ

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะหลายประเภทภายใต้เงื่อนไขด้านกรอบเวลา (Heterogeneous vehicle routing problem with time windows: HVRPTW) เป็นการเพิ่มเงื่อนไขที่สอดคล้องกับสถานการณ์ในปัจจุบันที่การขนส่งสินค้าประกอบไปด้วยยานพาหนะหลายประเภทที่มีความจุโดยมีการกำหนดจำนวนยานพาหนะไว้ล่วงหน้าก่อนการจัดเส้นทาง ซึ่งลูกค้ามีการกำหนดช่วงเวลาในการรับสินค้า โดย Jiang et al. [6] ได้นำปัญหาเทียบเคียง VRPTW ของ Solomon [7] มาทำการเพิ่มเงื่อนไขโดยกำหนดจำนวนความจุ ต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันของยานพาหนะแต่ละประเภท โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาต้นทุนรวมที่น้อยที่สุด

ปัญหา HVRPTW เป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมเชิงการจัด (Combinatorial optimization problem) ซึ่งอยู่ในกลุ่มปัญหาแบบยาก (NP-hard problem) การหาคำตอบที่ดีที่สุดสามารถทำได้เมื่อปัญหามีขนาดเล็กและมีข้อจำกัดไม่มาก แต่เมื่อปัญหามีขนาดใหญ่และมีข้อจำกัดที่ซับซ้อนมากขึ้น การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีแม่นยำตรง (Exact method) อาจไม่สามารถหาได้หรือใช้เวลาในการหาคำตอบที่นาน วิธีการแก้ปัญหาก็เพื่อให้ได้ผลคำตอบแบบประมาณ (Approximate method) จึงได้รับความนิยมนำมาใช้แก้ปัญห โดยผลคำตอบที่ได้อาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด แต่เป็นคำตอบที่ยอมรับได้และมีค่าใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดซึ่งสามารถหาได้ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม

การแก้ปัญหา HVRPTW มีการนำวิธีการแก้ปัญหาที่หลากหลายมาใช้ โดยวิธีที่นิยมนำมาใช้คือ วิธีฮิวริสติกส์ และวิธีเมตาฮิวริสติกส์ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบแบบประมาณ ซึ่งสามารถหาคำตอบที่ดีได้ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม โดย Jiang et al. [6] นำวิธีค้นหาแบบต้องห้าม (Tabu search: TS) มาใช้แก้ปัญหา Paraskopoulou et al. [8] แก้ปัญหาด้วยวิธีค้นหาคำตอบย่านใกล้เคียงแบบแปรผัน (Variable neighborhood) ร่วมกับวิธี TS Molina et al. [9] ใช้วิธีหาคำตอบแบบอนานิคมมด (Ant colony system: ACS) ร่วมกับวิธีค้นหาเฉพาะที่ (Local search: LS) Jain et al. [10] แก้ปัญหา HVRPTW ที่มีสินค้าหลายชนิดด้วยวิธี ACS แบบปรับฟีโรโมนสองทาง (Two-pheromone trail ant colony system) ร่วมกับวิธี TS

วิธีการหาคำตอบด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบวาฬ (Whale optimization algorithm: WOA) นำเสนอโดย Mirjalili and Lewis [11] เป็นวิธีเมตาฮิวริสติกส์ที่จัดอยู่ในกลุ่มวิธีที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากธรรมชาติ (Naturally inspired) ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาคำตอบโดยอาศัยกลุ่มประชากร (Population-based search) เลียนแบบมาจากพฤติกรรมการล่าเหยื่อของวาฬที่ประกอบไปด้วย การค้นหาเหยื่อ การปีนวงล้อม และการโจมตีเหยื่อ ขั้นตอนการค้นหาคำตอบประกอบไปด้วยขั้นตอนการหาคำตอบแบบสุ่มกระจาย (Exploration) และขั้นตอนการหาคำตอบในพื้นที่ใกล้เคียง (Exploitation) ซึ่งทำให้ผลคำตอบที่ได้มีคุณภาพที่ดี เป็นวิธีเมตาฮิวริสติกส์ใหม่ที่ยังไม่ถูกนำไปใช้ในการแก้ปัญหาที่แพร่หลายมากนัก โดย Dewi and Utama [12] ได้นำวิธี WOA ร่วมกับวิธี TS มาใช้ในการแก้ปัญหา GVRP และปรับปรุงคำตอบด้วยวิธี LS Elmousel et al. [13] แก้ปัญหา CVRP โดยปรับวิธี WOA ให้เหมาะสมกับปัญหาแบบไม่ต่อเนื่อง Zhang et al. [14] ได้นำวิธี WOA มาใช้ในการแก้ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย (Traveling salesman problem) Yodwangjai and Malampong [15] ได้นำวิธี WOA ร่วมกับวิธี LS มาใช้ในการแก้ปัญหา VRPTW

จากปัญหา HVRPTW และวิธีการแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการนำวิธี WOA มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา HVRPTW ซึ่งเป็นวิธีที่ยังไม่เคยถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหานี้ การกำหนดค่าพารามิเตอร์

สำหรับการหาคำตอบของแต่ละปัญหามีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพและระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธี WOA สำหรับการแก้ปัญหา HVRPTW และได้นำวิธี LS มาใช้ในการปรับปรุงคำตอบเพื่อป้องกันการติดคำตอบเฉพาะที่ (Local optimal) เรียกว่าวิธี WOA-LS การออกแบบการทดลองใช้วิธีทากูชิ (Taguchi orthogonal arrays) นำมาทดสอบกับปัญหาเทียบเคียงของ Jiang et al. [6] การทดลองจะนำตัวแทนปัญหาในแต่ละกลุ่มมาทดลองหาค่าพารามิเตอร์และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และนำผลค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองไปทดสอบกับโจทย์ปัญหาเทียบเคียงจำนวนทั้งหมด 56 ปัญหา เพื่อหาคำตอบและเปรียบเทียบคำตอบกับวิธี TS ในงานวิจัยของ Jiang et al. [6]

2. กระบวนการหาคำตอบ

2.1 วิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบวาฬ

กระบวนการหาคำตอบด้วยวิธีหาค่าที่เหมาะสมแบบวาฬ มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การล้อมเหยื่อ (Encircling prey) เป็นขั้นตอนการล่าเหยื่อ โดยวาฬจะจดจำตำแหน่งเหยื่อและทำการล้อมเหยื่อไว้ ตำแหน่งเหยื่อจะถูกกำหนดด้วย $\vec{X}$ และตำแหน่งเหยื่อที่เป็นค่าคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการค้นหานั้นแทนด้วย $\vec{X}^*$ ซึ่ง $\vec{D}$ เป็นตำแหน่งระหว่างวาฬกับเหยื่อ โดยวาฬแต่ละตัวจะพยายามปรับปรุงตำแหน่งของตัวเองเข้าหาตำแหน่งคำตอบที่ดีที่สุด สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

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

เมื่อ $\vec{X}^*$ คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของคำตอบที่ดีที่สุด ในรอบการค้นหาปัจจุบัน

$\vec{X}$ คือ เวกเตอร์ตำแหน่งปัจจุบัน

t คือ รอบการค้นหาปัจจุบัน

$\vec{A}$ คือ เวกเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์การค้นหา คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$\vec{C}$ คือ เวกเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์การค้นหา คำนวณได้จากสมการที่ (4)

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

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

เมื่อ $\vec{r}$ คือ ค่าเวกเตอร์สุ่มระหว่าง 0 ถึง 1
 $\vec{a}$ คือ ค่าเวกเตอร์ที่ลดลงระหว่าง 2 ถึง 0
 เป็นเส้นตรงในรอบการค้นหา คำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$\vec{a} = 2 - \frac{2t}{T_{\max}} \quad (5)$$

เมื่อ $T_{\max}$ คือ จำนวนรอบการค้นหาสูงสุด
 ขั้นตอนที่ 2 วิธีการโจมตีด้วยฟองอากาศ (Bubble-net attacking method: exploitation phase) เลียนแบบจากพฤติกรรมการล่าเหยื่อของวาฬ โดยการพ่นฟองอากาศล้อมเหยื่อไว้ ซึ่งลักษณะการพ่นฟองอากาศมี 2 รูปแบบ คือ วิธีการล้อมแบบหดตัวและวิธีการเคลื่อนที่แบบเกลียว

รูปแบบที่ 1 วิธีการล้อมแบบหดตัว (Shrinking encircling mechanism) เป็นพฤติกรรมของการโจมตีด้วยฟองอากาศโดยการลดค่า $\vec{a}$ ในสมการที่ (3) ทำให้ช่วงความผันผวนของเวกเตอร์สัมประสิทธิ์การค้นหา $\vec{A}$ มีค่าลดลงด้วย โดย $\vec{a}$ จะมีค่าลดลงจาก 2 ถึง 0 เป็นเส้นตรงในรอบการค้นหา ตำแหน่งใหม่ของการค้นหาคำตอบสามารถกำหนดได้ทุกตำแหน่งระหว่างตำแหน่งเดิมกับตำแหน่งที่ดีที่สุดในรอบการค้นหาคำตอบปัจจุบัน

รูปแบบที่ 2 วิธีการเคลื่อนที่แบบเกลียว (Spiral update position) เป็นพฤติกรรมในการล่าเหยื่อของวาฬที่จะว่ายน้ำเคลื่อนที่เป็นวงกลมล้อมเหยื่อและหดตัวในเวลาเดียวกันเป็นลักษณะเกลียวยังสมการที่ (6)

$$\vec{X}(t+1) = \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) \quad (6)$$

$$\vec{D}' = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (7)$$

เมื่อ $\vec{D}'$ คือ ระยะห่างระหว่างตำแหน่งปัจจุบันและตำแหน่งที่ดีที่สุด

b คือ ค่าคงที่สมการเกลียวลอการิทึม

l คือ ค่าสุ่มระหว่าง [-1,1]

รูปแบบของการโจมตีด้วยฟองอากาศด้วยวิธีการล้อมแบบหดตัวและวิธีการเคลื่อนที่แบบเกลียวมีความเป็นไปได้ที่วาฬจะการเลือกวิธีการโจมตีวิธีใดวิธีหนึ่งจากความเป็นไปเป็นที่ได้จากการสุ่มดังสมการที่ (8)

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{if } p \leq 0.5 \\ \vec{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

เมื่อ p คือ ค่าสุ่มระหว่าง 0 ถึง 1

ขั้นตอนที่ 3 การค้นหาเหยื่อ (Search for prey: exploration phase) นอกจากการโจมตีด้วยฟองอากาศแล้ววาฬจะค้นหาเหยื่อในตำแหน่งอื่นด้วยวิธีการสุ่ม ซึ่งค่า $\vec{A}$ ที่ได้จากการสุ่มจะมีค่ามากกว่า 1 หรือน้อยกว่า -1 เพื่อให้ตำแหน่งในการค้นหาเหยื่อไกลจากตำแหน่งเดิม เป็นขั้นตอนการค้นหาแบบสุ่มกระจาย (Exploration mechanism) โดยจะปรับปรุงตำแหน่งใหม่ที่ได้จากการสุ่ม $\vec{X}_{rand}$ แทนตำแหน่งที่ดีที่สุด การค้นหาแบบสุ่มกระจายจะทำเมื่อ $|\vec{A}| > 1$ ตามสมการที่ (9) และ (10) และเมื่อค่า $|\vec{A}| \leq 1$ จะทำการปรับปรุงตำแหน่งใหม่ตามสมการที่ (1) และ (2)

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

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

2.2 วิธีการค้นหาเฉพาะที่

วิธีการค้นหาเฉพาะที่ (Local search: LS) เป็นการปรับปรุงคำตอบโดยการนำตัวแทนคำตอบเบื้องต้นของการจัดเส้นทางยานพาหนะมาหาคำตอบในย่านใกล้เคียง (Neighborhood) เพื่อให้ได้ตัวแทนคำตอบที่หลากหลายและมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งบางครั้งอาจไม่ได้คำตอบที่ดีขึ้นกว่าเดิมแต่เป็นวิธีช่วยป้องกันไม่ให้คำตอบที่ได้ติดอยู่กับคำตอบเฉพาะที่ โดยวิธี LS ที่นำมาใช้ปรับปรุงคำตอบของปัญหา VRP ประกอบไปด้วยการปรับปรุงคำตอบภายในเส้นทาง (Intra route) และการปรับปรุงคำตอบระหว่างเส้นทาง (Inter route) ในงานวิจัยนี้ได้นำวิธี LS มาใช้ร่วมกับวิธี WOA ในขั้นตอนการค้นหาเหยื่อเพื่อช่วยป้องกันการติดกับคำตอบเฉพาะที่ โดยวิธี LS ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยวิธี Single insertion และวิธี 2-Opt สำหรับการปรับปรุงคำตอบภายในเส้นทาง และวิธี Shift 1-0 และวิธี Swap 1-1 สำหรับการปรับปรุงคำตอบระหว่างเส้นทาง

3. ปัญหาที่ใช้ในการทดลอง

ปัญหาที่นำมาทดลองในงานวิจัยนี้ เป็นโจทย์ปัญหาเทียบเคียงของ Solomon [7] ที่ประกอบไปด้วยชุดข้อมูลที่มีตำแหน่งที่ตั้งลูกค้า 3 ลักษณะ คือ แบบสุ่ม (Random: R) แบบกลุ่ม (Cluster: C) และแบบผสมสุ่มกับกลุ่ม (Random and Cluster: RC) ในแต่ละชุดข้อมูลมีการกำหนดข้อจำกัด

ของยานพาหนะที่มีกรอบเวลาแคบยานพาหนะมีความจุน้อยแทนด้วยเลข 1 และกรอบเวลากว้างยานพาหนะมีความจุมากแทนด้วยเลข 2 ซึ่งปัญหา HVRPTW ของ Jiang et al. [6] ได้มีการกำหนดประเภทยานพาหนะที่แตกต่างกันในแต่ละชุดข้อมูลแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ความจุน้อยแทนด้วย A ความจุปานกลางแทนด้วย B และความจุมากแทนด้วย C ในแต่ละชุดข้อมูลมีการกำหนดจำนวนยานพาหนะเวลากลับคลังสินค้า ต้นทุนคงที่และต้นทุนแปรผันที่แตกต่างกัน มีรายละเอียดของชุดข้อมูลปัญหา ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลปัญหา HVRPTW ที่นำมาทดสอบ

VT	NV	Cap.	LRT	FC	VC
HC1 (9 cases)					
A	20	100	1,000	30	1.0
B	5	200	1,236	80	1.2
HC2 (8 cases)					
A	20	400	3,000	100	1.0
B	5	500	3,390	140	1.2
HR1 (12 cases)					
A	10	50	180	80	1.0
B	15	80	200	140	1.2
C	10	120	230	250	1.4
HR2 (11 cases)					
A	10	300	800	45	1.0
B	5	400	1,000	75	1.2
HRC1 (8 cases)					
A	10	40	200	60	1.0
B	20	80	220	150	1.2
C	10	150	240	300	1.4
HRC2 (8 cases)					
A	10	100	900	150	1.0
B	5	200	960	350	1.2

วิธี WOA-LS ที่นำมาใช้แก้ปัญหาในงานวิจัยนี้มีพารามิเตอร์ประกอบด้วย จำนวนรอบการค้นหาคำตอบ (Number of iterations: NI) และจำนวนวาทที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ (Number of populations: NP) โดยที่แต่ละพารามิเตอร์มีค่าพารามิเตอร์ 5 ระดับ ดังตารางที่ 2 วิธีการออกแบบการทดลองใช้วิธีทาคุชิ ตามตารางการออกแบบการ

ทดลอง Taguchi L25 ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง อัลกอริทึมสำหรับการแก้ปัญหาเขียนด้วยโปรแกรมภาษาไพทอน (Python programming language)

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์วิธี WOA-LS ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ระดับพารามิเตอร์				
	1	2	3	4	5
จำนวนรอบการค้นหาคำตอบ	1,000	2,500	5,000	7,500	10,000
จำนวนวาท	2	4	6	8	10

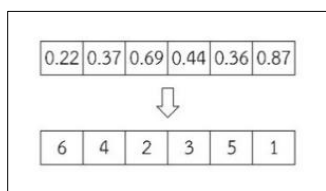
4. ขั้นตอนการค้นหาคำตอบวิธี WOA-LS

ขั้นตอนที่ 1 การสร้างตัวแทนคำตอบเริ่มต้นของวิธี WOA-LS ทำได้โดยการสร้างประชากรวาทเริ่มต้นที่มีจำนวนตามค่าพารามิเตอร์จำนวนวาทที่กำหนดในแต่ละการทดลอง โดยมีการระบุตำแหน่งของวาทด้วยเวกเตอร์ที่มีขนาดความยาวเวกเตอร์เท่ากับจำนวนลูกค้าในเส้นทางนั้น ตำแหน่งเวกเตอร์ถูกกำหนดด้วยเลขสุ่มที่มีค่าระหว่าง 0-1 ที่ไม่ซ้ำกัน ตัวอย่างการสร้างเวกเตอร์ตำแหน่งของวาทดังรูปที่ 1

วาทตัวที่ 1	0.22	0.37	0.69	0.44	0.36	0.87
วาทตัวที่ 2	0.23	0.79	0.29	0.46	0.75	0.55
วาทตัวที่ 3	0.02	0.68	0.32	0.99	0.47	0.77
วาทตัวที่ 4	0.16	0.73	0.58	0.13	0.44	0.93

รูปที่ 1 ตัวอย่างการสร้างเวกเตอร์ตำแหน่งของวาท

ขั้นตอนที่ 2 หลังจากการสร้างเวกเตอร์ตำแหน่งของวาทแล้วจะทำการแปลงค่าตำแหน่งเวกเตอร์ให้เป็นตัวแทนคำตอบสำหรับปัญหา HVRPTW โดยในงานวิจัยนี้ได้นำวิธีการเรียงลำดับค่ามาก (Large Rank Value: LRV) มาใช้ในการเรียงลำดับตำแหน่งของเวกเตอร์จากค่ามากที่สุดไปค่าน้อยสุด ตัวอย่างการแปลงตำแหน่งเวกเตอร์ของวาทตัวที่ 1 ดังรูปที่ 2 โดยเมื่อมีการเรียงลำดับจากค่ามากที่สุดไปค่าน้อยสุดตามวิธี LRV ค่าที่มากที่สุดจะแทนตำแหน่งของลูกค้าลำดับที่ 1



รูปที่ 2 ตัวอย่างการแปลงตำแหน่งเวกเตอร์วาทตัวที่ 1

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าวัตถุประสงค์จากตำแหน่งของวาทแต่ละตัว $\bar{X}_i$ โดยตำแหน่งวาทที่ให้ค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดเท่ากับ $\bar{X}^*$

ขั้นตอนที่ 4 ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ a, A, C, l และ p

- สุ่มค่า p ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้า $p \geq 0.05$ ข้ามไปขั้นตอนที่ 9

- คำนวณค่า $|\bar{A}|$ ถ้าค่า $|\bar{A}| \geq 1$ ข้ามไปขั้นตอนที่ 7

ขั้นตอนที่ 5 ปรับปรุงตำแหน่งใหม่ของตำแหน่งวาทปัจจุบัน $\bar{X}$ ด้วยสมการที่ (1) และสมการที่ (2)

ขั้นตอนที่ 6 ปรับปรุงตำแหน่งใหม่ของวาท $\bar{X}$ ด้วยวิธี LS

ขั้นตอนที่ 7 สร้างตำแหน่งใหม่ของวาท $\bar{X}$ ด้วยวิธีการสุ่ม $\bar{X}_{rand}$

ขั้นตอนที่ 8 ปรับปรุงตำแหน่งใหม่ของตำแหน่งวาทปัจจุบัน $\bar{X}$ ด้วยสมการที่ (9) และสมการที่ (10)

ขั้นตอนที่ 9 ปรับปรุงตำแหน่งของวาทปัจจุบัน $\bar{X}$ ด้วยสมการที่ (6) และสมการที่ (7)

ขั้นตอนที่ 10 เมื่อครบจำนวนรอบค้นหาคำตอบแล้วให้หยุดการค้นหาคำตอบและแสดงผลคำตอบที่ดีที่สุด

5. ผลการดำเนินงานวิจัย

5.1 ผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

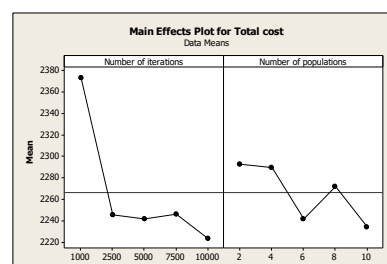
ผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการทดลองกับตัวอย่างโจทย์ปัญหาทั้ง 6 กลุ่ม คือ HC1, HC2, HR1, HR2, HRC1 และ HRC2 เมื่อนำผลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน วิเคราะห์ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม ได้ผลดังนี้

กลุ่มปัญหา HC1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากตารางที่ 3 พบว่าปัจจัยหลักทั้งสองมีค่า P -value < 0.05

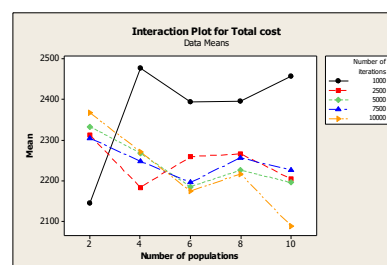
แสดงว่าปัจจัยหลักทั้งสองส่งผลต่อค่าคำตอบ แต่ปัจจัย NP มีค่า P -value ที่ใกล้เคียง 0.05 ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าคำตอบไม่มากจากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่าการกำหนดค่า NI เท่ากับ 10,000 และ NP เท่ากับ 6 และ 10 ให้ค่าคำตอบที่ดีมีค่าใกล้เคียงกันและเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วมพบว่าค่า P -value < 0.05 แสดงว่าปัจจัยร่วมส่งผลต่อค่าคำตอบอย่างมีนัยสำคัญจากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าการกำหนดค่าปัจจัยในแต่ละระดับส่งผลต่อค่าคำตอบไปในทิศทางเดียวกัน โดยการกำหนดค่า NI เท่ากับ 10,000 และ NP เท่ากับ 10 จะให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกลุ่มปัญหา HC1

Source	DF	SS	MS	F	P
NI	4	221074	55268.5	13.17	0.000
NP	4	43495	10873.7	2.59	0.048
Interaction	16	397120	24820.0	5.91	0.00
Error	50	209885	4197.7		
Total	74	871574			



รูปที่ 3 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักกลุ่มปัญหา HC1



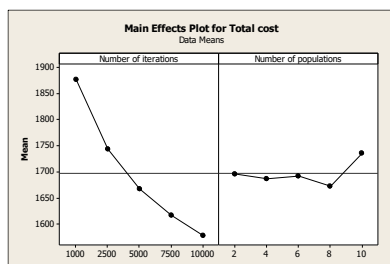
รูปที่ 4 การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมกลุ่มปัญหา HC1

กลุ่มปัญหา HC2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากตารางที่ 4 พบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าคำตอบ คือ NI

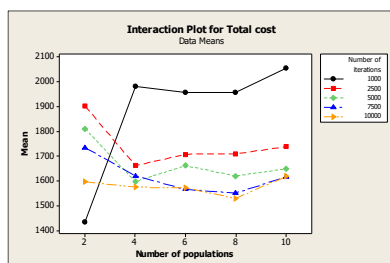
ซึ่งมีค่า $P\text{-value} < 0.05$ ส่วน NP มีค่า $P\text{-value} > 0.05$ แสดงว่าไม่ส่งผลต่อคำตอบ จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า การกำหนดค่า NI เท่ากับ 10,000 ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด และการกำหนดค่า NP เท่ากับ 2, 4, 6 และ 8 ให้ค่าคำตอบที่ใกล้เคียงกันและเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม พบว่ามีค่า $P\text{-value} < 0.05$ แสดงว่าปัจจัยร่วมส่งผลต่อคำตอบอย่างมีนัยสำคัญ จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า การกำหนดปัจจัยในแต่ละระดับส่งผลต่อคำตอบไปในทิศทางเดียวกัน โดยการกำหนดค่า NI เท่ากับ 10,000 และ NP เท่ากับ 8 จะให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกลุ่มปัญหา HC2

Source	DF	SS	MS	F	P
NI	4	834930	208733	27.97	0.000
NP	4	33016	8254	1.11	0.364
Interaction	16	986263	61641	8.26	0.000
Error	50	373172	7463		
Total	74	2227381			



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักกลุ่มปัญหา HC2



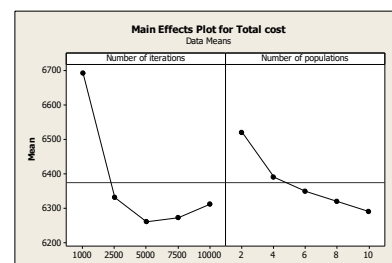
รูปที่ 6 การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมกลุ่มปัญหา HC2

กลุ่มปัญหา HR1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากตารางที่ 5 พบว่าปัจจัยหลักทั้งสองมีค่า $P\text{-value} < 0.05$

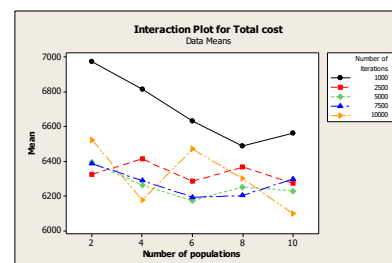
แสดงว่าปัจจัยหลักทั้งสองส่งผลต่อคำตอบ จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่า การกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP เท่ากับ 10 ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด และเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม พบว่ามีค่า $P\text{-value}$ ใกล้เคียงกับ 0.05 แสดงว่าปัจจัยร่วมส่งผลต่อคำตอบค่อนข้างน้อยหรืออาจไม่ส่งผล จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าการกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP เท่ากับ 10 จะให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกลุ่มปัญหา HR1

Source	DF	SS	MS	F	P
NI	4	1941696	485424	24.71	0.000
NP	4	473788	118447	6.03	0.000
Interaction	16	590100	36881	1.88	0.046
Error	50	982406	19648		
Total	74	3987990			



รูปที่ 7 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักกลุ่มปัญหา HR1



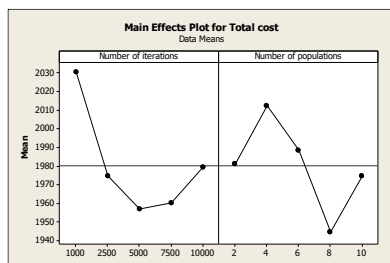
รูปที่ 8 การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมกลุ่มปัญหา HR1

กลุ่มปัญหา HR2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากตารางที่ 6 พบว่าปัจจัยหลักทั้งสองมีค่า $P\text{-value} < 0.05$ แสดงว่าปัจจัยหลักทั้งสองส่งผลต่อคำตอบ แต่ปัจจัย NP มีค่า $P\text{-value}$ ที่ใกล้เคียง 0.05 ซึ่งอาจส่งผลต่อคำตอบไม่มากนัก

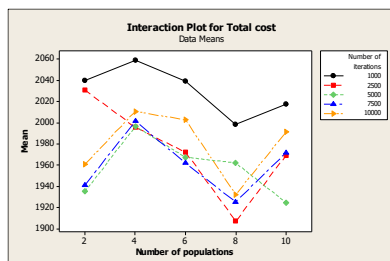
จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่า การกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP เท่ากับ 8 ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด และเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม พบว่ามีค่า $P\text{-value} > 0.05$ แสดงว่าปัจจัยร่วมไม่ส่งผลต่อค่าคำตอบ จากรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่า การกำหนดค่า NI และ NP ในแต่ละระดับไม่ส่งผลต่อค่าคำตอบ โดยการกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP เท่ากับ 8 จะให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกลุ่มปัญหา HR2

Source	DF	SS	MS	F	P
NI	4	52381	13095.1	3.93	0.008
NP	4	35836	8959.0	2.69	0.042
Interaction	16	27767	1735.4	0.52	0.924
Error	50	166589	3331.8		
Total	74	282572			



รูปที่ 9 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักกลุ่มปัญหา HR2



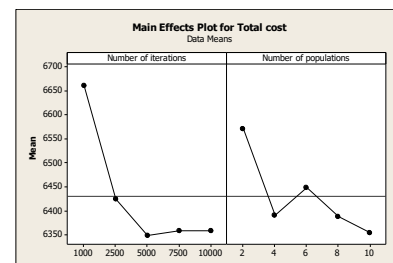
รูปที่ 10 การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมกลุ่มปัญหา HR2

กลุ่มปัญหา HRC1 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน จากตารางที่ 7 พบว่าปัจจัยหลักทั้งสองมีค่า $P\text{-value} < 0.05$ แสดงว่าปัจจัยหลักทั้งสองส่งผลต่อค่าคำตอบ จากรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่า การกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP

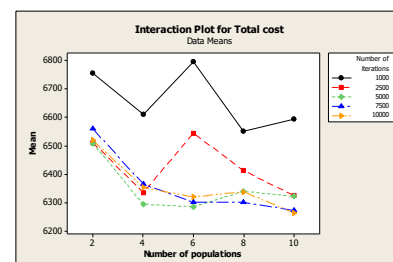
เท่ากับ 10 ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด และเมื่อพิจารณาปัจจัยร่วม พบว่ามีค่า $P\text{-value} > 0.05$ แสดงว่าปัจจัยร่วมไม่ส่งผลต่อค่าคำตอบ จากรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่า การกำหนด NI และ NP ในแต่ละระดับไม่ส่งผลต่อค่าคำตอบ โดยการกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP เท่ากับ 10 จะให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกลุ่มปัญหา HRC1

Source	DF	SS	MS	F	P
NI	4	1047830	261958	13.01	0.000
NP	4	434591	108648	5.40	0.001
Interaction	16	196512	12282	0.61	0.861
Error	50	1006458	20129		
Total	74	2685391			



รูปที่ 11 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักกลุ่มปัญหา HRC1

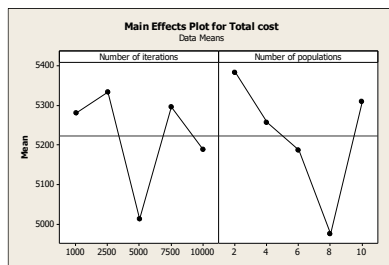


รูปที่ 12 การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมกลุ่มปัญหา HRC1

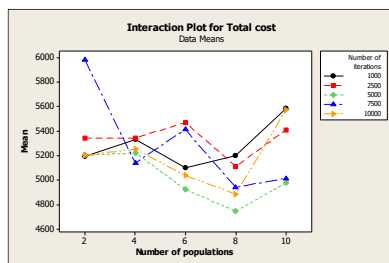
ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนกลุ่มปัญหา HRC2

Source	DF	SS	MS	F	P
NI	4	331245	82811	1.53	0.241
NP	4	482431	120608	2.22	0.112
Error	16	867327	54208		
Total	24	1681003			

กลุ่มปัญหา HRC2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากตารางที่ 8 พบว่าปัจจัยหลักทั้งสองมีค่า $P\text{-value} > 0.05$ แสดงว่าปัจจัยหลักทั้งสองไม่ส่งผลต่อค่าคำตอบ จากรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่า การกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP เท่ากับ 8 ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 14 การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมที่การกำหนดค่า NI เท่ากับ 5,000 และ NP เท่ากับ 8 ให้ค่าคำตอบที่ดีที่สุด



รูปที่ 13 การวิเคราะห์ปัจจัยหลักกลุ่มปัญหา HRC2



รูปที่ 14 การวิเคราะห์ปัจจัยร่วมกลุ่มปัญหา HRC2

ตารางที่ 9 ผลการทดลองการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

กลุ่มปัญหา	พารามิเตอร์	
	NI	NP
HC1	10,000	10
HC2	10,000	8
HR1	5,000	10
HR2	5,000	8
HRC1	5,000	10
HRC2	5,000	8

จากผลการทดลองการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธี WOA-LS โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนการวิเคราะห์ปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมของตัวแทนปัญหา

HVRPTW ทั้ง 6 กลุ่ม พบว่าการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในแต่ละระดับส่งผลต่อค่าคำตอบที่ได้มีความแตกต่างกัน โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของปัญหาในกลุ่ม HC มีการกำหนดค่า NI มากกว่าปัญหาในกลุ่ม HR และ HRC ส่วนการกำหนดค่า NP ของปัญหาในกลุ่ม 1 มีการกำหนดค่ามากกว่าปัญหาในกลุ่ม 2 โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของปัญหาแต่ละกลุ่มดังตารางที่ 9

5.2 การเปรียบเทียบคำตอบของวิธี WOA-LS กับวิธี TS

จากผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ได้หาค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาทดสอบกับปัญหา HVRPTW จำนวน 56 ปัญหา โดยทำการทดลองซ้ำจำนวน 10 ครั้ง ได้ผลคำตอบและผลการเปรียบเทียบคำตอบกับวิธี TS ดังตารางที่ 10

ผลคำตอบของวิธี WOA-LS เปรียบเทียบกับวิธี TS พบว่าในกลุ่มปัญหา HC ได้ผลคำตอบที่ดีกว่าวิธี TS จำนวน 3 ปัญหา คือ ปัญหา HC204 ผลคำตอบดีกว่า 0.93% ปัญหา HC207 ผลคำตอบดีกว่า 1.25% และปัญหา HC208 ผลคำตอบดีกว่า 0.36% ได้ผลคำตอบเท่ากับวิธี TS จำนวน 2 ปัญหา คือ ปัญหา HC103 และปัญหา HC105 โดยมีค่าเฉลี่ยของผลคำตอบในกลุ่มปัญหา HC1 มากกว่าวิธี TS 3.19% กลุ่มปัญหา HC2 มากกว่าวิธี TS 1.28% และค่าเฉลี่ยของผลคำตอบในกลุ่มปัญหา HC มากกว่าวิธี TS 2.14%

กลุ่มปัญหา HR ได้ผลคำตอบที่ดีกว่าวิธี TS จำนวน 3 ปัญหา คือ ปัญหา HR104 ผลคำตอบดีกว่า 1.46% ปัญหา HR111 ผลคำตอบดีกว่า 2.48% และปัญหา HR112 ผลคำตอบดีกว่า 0.52% ได้ผลคำตอบเท่ากับวิธี TS จำนวน 2 ปัญหา คือ ปัญหา HR207 ผล และปัญหา HR210 โดยมีค่าเฉลี่ยของผลคำตอบในกลุ่มปัญหา HR1 มากกว่าวิธี TS 3.18% กลุ่มปัญหา HR2 มากกว่าวิธี TS 4.74% และค่าเฉลี่ยของผลคำตอบในกลุ่มปัญหา HR มากกว่าวิธี TS 3.92%

กลุ่มปัญหา HRC ได้ผลคำตอบที่ดีกว่าวิธี TS จำนวน 3 ปัญหา คือ ปัญหา HRC102 ผลคำตอบดีกว่า 0.83% ปัญหา HRC106 ผลคำตอบดีกว่า 1.33% และปัญหา HRC207 ผลคำตอบดีกว่า 2.64% โดยมีค่าเฉลี่ยของผลคำตอบในกลุ่มปัญหา HRC1 มากกว่าวิธี TS 4.32% กลุ่มปัญหา HRC2 มากกว่าวิธี TS 2.86% และค่าเฉลี่ยของผลคำตอบในกลุ่มปัญหา HRC มากกว่าวิธี TS 3.59%

ตารางที่ 10 ผลคำตอบวิธี WOA-LS เปรียบเทียบกับคำตอบที่ดีที่สุด

Problem	TS	WOA-LS	%Dev.	Problem	TS	WOA-LS	%Dev.
HC101	1885.33	1905.10	1.04%	HR112	4252.71	4230.55	-0.52%
HC102	1890.66	1965.58	3.81%	HR201	1765.74	1875.28	5.84%
HC103	1908.04	1908.01	0.00%	HR202	1536.81	1634.95	6.00%
HC104	1809.78	1932.25	6.34%	HR203	1337.39	1389.44	3.75%
HC105	1854.73	1854.80	0.00%	HR204	1114.94	1189.78	6.29%
HC106	1880.64	1962.63	4.18%	HR205	1263.91	1384.42	8.70%
HC107	1839.52	1954.18	5.87%	HR206	1180.44	1282.43	7.95%
HC108	1826.49	1894.05	3.57%	HR207	1102.06	1102.06	0.00%
HC109	1799.22	1872.72	3.92%	HR208	1007.00	1049.61	4.06%
HC201	1313.28	1365.48	3.82%	HR209	1119.04	1185.29	5.59%
HC202	1283.58	1308.99	1.94%	HR210	1307.53	1307.53	0.00%
HC203	1259.97	1261.90	0.15%	HR211	1010.22	1051.68	3.94%
HC204	1256.09	1244.56	-0.93%	HRC101	5703.97	6185.18	7.78%
HC205	1325.84	1343.69	1.33%	HRC102	5556.02	5510.42	-0.83%
HC206	1263.63	1303.45	3.05%	HRC103	5438.89	5864.44	7.26%
HC207	1307.35	1291.21	-1.25%	HRC104	5331.41	5673.85	6.04%
HC208	1190.81	1186.52	-0.36%	HRC105	5705.79	6051.46	5.71%
HR101	5125.52	5482.40	6.51%	HRC106	5528.42	5455.74	-1.33%
HR102	4982.39	5193.44	4.06%	HRC107	5451.31	5759.74	5.35%
HR103	4661.22	4935.85	5.56%	HRC108	5322.31	5576.11	4.55%
HR104	4530.55	4465.43	-1.46%	HRC201	4501.65	4643.88	3.06%
HR105	4570.39	4809.18	4.97%	HRC202	4408.53	4706.02	6.32%
HR106	4431.31	4639.99	4.50%	HRC203	4321.87	4423.16	2.29%
HR107	4391.14	4571.16	3.94%	HRC204	4306.65	4580.84	5.99%
HR108	4280.05	4445.70	3.73%	HRC205	4452.88	4611.99	3.45%
HR109	4339.86	4566.24	4.96%	HRC206	4419.09	4584.10	3.60%
HR110	4272.25	4453.28	4.07%	HRC207	4343.55	4231.90	-2.64%
HR111	4366.32	4273.14	-2.18%	HRC208	4276.15	4312.06	0.83%

6. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการวิจัยการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของวิธี WOA-LS ในการแก้ปัญหา HVRPTW ได้นำโจทย์ปัญหาเทียบเคียงมาออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน วิเคราะห์ปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วม พบว่าการปรับค่าพารามิเตอร์ส่งผลต่อคำตอบที่ได้แตกต่างกัน จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาหาคำตอบกับโจทย์ปัญหาเทียบเคียงจำนวน 56 ปัญหา พบว่า

สามารถหาคำตอบที่ดีกว่าคำตอบของวิธี TS ได้จำนวน 9 ปัญหา และมีคำตอบเท่ากับวิธี TS จำนวน 4 ปัญหา โดยมีค่าเฉลี่ยของคำตอบทั้งหมดมากกว่าคำตอบของวิธี TS 3.29% จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าวิธี WOA-LS มีประสิทธิภาพในการหาคำตอบที่ดี งานวิจัยในอนาคตสามารถนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในการแก้ปัญหา HVRPTW อื่น โดยการพิจารณาลักษณะตำแหน่งที่ตั้งของลูกค้า กรอบเวลา และความจุของยานพาหนะ เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการหาคำตอบได้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. B. Dantzig and J. H. Ramser, "The truck dispatching problem," *Management Science.*, vol. 6, no. 1, pp. 80-91, 1959.
- [2] É. D. Taillard, "A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP," *RAIRO - Operations Research.*, vol. 33, pp. 1-14, 1999.
- [3] B. Golden, A. Assad, L. Levy and F. Gheysens, "The fleet size and mix vehicle routing problem," *Computers and Operations Research.*, vol. 11, pp. 49-66, 1984.
- [4] J. Ferland and P. Michelon, "The vehicle scheduling problem with multiple vehicle types," *Journal of the Operational Research Society.*, vol. 39, pp. 577-583, 1988.
- [5] F. Li, B. Golden and E. Wasil, "A record-to-record travel algorithm for solving the heterogeneous fleet vehicle routing problem," *Computers and Operations Research.*, vol. 34, no. 9, pp. 2734-2742, 2007.
- [6] J. Jiang, K. M. Ng, K. L. Poh, and K. M. Teo, "Vehicle routing problem with a heterogeneous fleet and time windows," *Expert Systems with Applications.*, vol. 41, no. 8, pp. 3748-3760, 2014.
- [7] M. M. Solomon, "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints," *Operations Research.*, vol. 35, no. 2, pp. 254-265, 1987.
- [8] D. C. Paraskevopoulos, P. P. Repoussis, C. D. Tarantilis, G. Ioannou, and G. P. Prastacos, "A reactive variable neighborhood tabu search for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows," *Journal of Heuristics.*, vol. 14, no. 5, pp. 425-455, 2008.
- [9] J. C. Molina, J. L. Salmeron and I. Eguia, "An ACS-based memetic algorithm for the heterogeneous vehicle routing problem with time windows," *Expert Systems with Applications.*, vol. 157, p. 113379, 2020.
- [10] J. J. De La Cruz, C. D. Paternina-Arboleda, V. Cantillo, and J. R. Montoya-Torres, "A two-phormone trail ant colony system - Tabu search approach for the heterogeneous vehicle routing problem with time windows and multiple products," *Journal of Heuristics.*, vol. 19, no. 2, pp. 233-252, 2013.
- [11] S. Mirjalili and A. Lewis, "The whale optimization algorithm," *Advances in Engineering Software.*, vol. 95, pp. 51-67, 2016.
- [12] S. K. Dewi and D. M. Utama, "A new hybrid whale optimization algorithm for green vehicle routing problem," *Systems Science and Control Engineering.*, vol. 9, pp. 61-72, 2021.
- [13] A. S. Elmousel, O. M. Khairy, O. M. Shehata, and E. I. Morgan, "A Novel Discrete Whale Optimization Algorithm for Solving the Capacitated Vehicle Routing Problem," in *2021 7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*, pp. 169-173, 2021.
- [14] J. Zhang, L. Hong, and Q. Liu, "An improved whale optimization algorithm for the traveling salesman problem," *Symmetry.*, vol. 13, no. 1, pp. 1-13, 2021.
- [15] S. Yodwangjai and K. Malampong, "An improved Whale Optimization lgorithm for vehicle routing problem with time windows," *The Journal of Industrial Technology.*, vol. 18, no. 1, pp. 104-122, 2022.